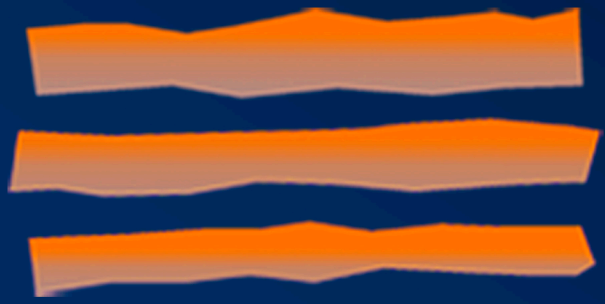
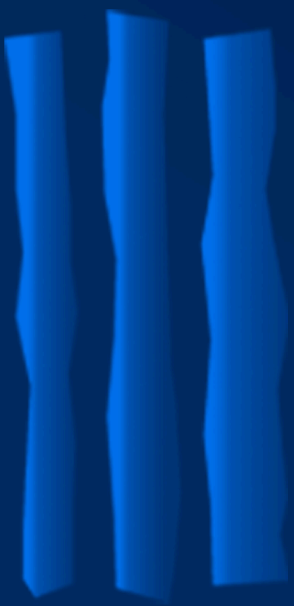


Universidad Pablo de Olavide, Sevilla



UNIVERSIDAD
PABLO DE OLAVIDE
SEVILLA

Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa



Journal of Quantitative Methods for
Economics and Business Administration

ISSN: 1886-516 X
D.L.: SE-2927-06



**REVISTA DE MÉTODOS CUANTITATIVOS
PARA LA ECONOMÍA Y LA EMPRESA**

**Journal of Quantitative Methods for
Economics and Business Administration**

Número 30. Diciembre de 2020.

ISSN: 1886-516X. D.L: SE-2927-06.

URL: <https://www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/index>

Editores:

Dr. Francisco Javier Blancas Peral
Universidad Pablo de Olavide
Ctra. de Utrera, km 1 - 41013
Sevilla (Spain).
Correo-e: fjblaper@upo.es

Dra. Macarena Lozano Oyola
Universidad Pablo de Olavide
Ctra. de Utrera, km 1 - 41013
Sevilla (Spain).
Correo-e: mlozoyo@upo.es

Comité Editorial:

Dr. S. Ejaz Ahmed, University of Windsor, Ontario (Canadá)
Dr. Adam P. Balcerzak, Nicolaus Copernicus University, Toruń (Polonia)
Dr. Carlos A. Coello Coello, CINVESTAV-IPN, México D.F. (México)
Dr. Ignacio Contreras Rubio, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla (España)
Dra. Manuela Coromaldi, University of Social Sciences UNISU, Roma (Italia)
Dr. Miguel Ángel Hinojosa Ramos, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla (España)
Dr. Matías Irigoyen Testa, Universidad Nacional del Sur, Buenos Aires (Argentina)
Dr. M. Kazim Khan, Kent State University, Ohio (EE.UU.)
Dr. Manuel Laguna, University of Colorado at Boulder, Colorado (EE.UU.)
Dra. María Amparo León Sánchez, Universidad de Pinar del Río (Cuba)
Dr. Jesús López-Rodríguez, Universidad de A Coruña, (España)
Dr. Cecilio Mar Molinero, University of Kent, Canterbury (Reino Unido)
Dra. Ana M. Martín Caraballo, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla (España)
Dra. M^a Carmen Melgar Hiraldo, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla (España)
Dr. Gábor Nagy, University of Kent, Canterbury (Reino Unido)
Dr. José Antonio Ordaz Sanz, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla (España)
Dr. Andrés Rodríguez-Pose, London School of Economics, Londres (Reino Unido)
Dr. José Manuel Rueda Cantuche, IPTS-DG J.R.Centre-European Commission
Dra. Mariagrazia Squicciarini, OECD, París (Francia)
Dra. Mariangela Zoli, Università degli Studi di Roma 'Tor Vergata', Roma (Italia)



Efecto de las barreras de innovación en la capacidad de absorción de las empresas innovadoras

CARPIO FREIRE, CARLOS RAÚL

Centrum Católica Graduate Business School - Pontificia Universidad Católica del Perú
Correo electrónico: rcarpiof@pucp.pe

AFCHA CHÁVEZ, SERGIO MOISÉS

Centrum Católica Graduate Business School - Pontificia Universidad Católica del Perú
Correo electrónico: safcha@pucp.pe

RESUMEN

El presente trabajo estudia la importancia de la capacidad de absorción de las empresas innovadoras y el efecto que en ella ejercen las barreras de innovación. Se revisa además la gestión de inversión en capacidad de absorción como promotor de innovación y se exponen las implicaciones al nivel de desempeño de las empresas en cuestiones de procesos y posición en el mercado. Se realiza el análisis mediante modelos de regresión lineal simple y múltiple. Finalmente, el impacto de la innovación en las empresas se obtuvo mediante un análisis de componentes principales.

Palabras clave: capacidad de absorción, barreras a la innovación, modelos de regresión, empresas innovadoras.

Clasificación JEL: O32.

MSC2010: 62J05; 62H25.

Effect of innovation barriers on the absorptive capacity of innovative companies

ABSTRACT

This paper studies the importance of the absorption capacity of innovative companies and the effect of innovation barriers on it. The management of absorption capacity investment as an innovation promoter is also reviewed and the implications are exposed to the level of performance of the companies in matters of processes and market position. The analysis is performed using simple and multiple linear regression models. Finally, the impact of innovation on companies was obtained through a Principal Component Analysis.

Keywords: absorption capacity, innovation barriers, regression models, innovative companies.

JEL classification: O32.

MSC2010: 62J05; 62H25.



1. Introducción.

La necesidad de reducir la pobreza y de poseer una mayor participación en el mercado latinoamericano y mundial, ha motivado a los gobiernos y a las empresas a concentrarse en la inversión para el desarrollo del capital humano en áreas como: conocimiento, ciencia, tecnología e innovación (Govindarajan & Trimble, 2013). Un caso reciente es el plan del gobierno de Ecuador para generar un cambio en la matriz productiva del país, con el objetivo de pasar de ser una economía primaria exportadora a ser una economía basada en el conocimiento, ha motivado una amplia inversión con fondos públicos que se destina a la creación de universidades, institutos y centros de investigación, con el propósito de obtener resultados en el desarrollo del talento humano, propuesto como el pilar fundamental del cambio de la matriz de producción de Ecuador (SENPLADES, 2012).

No son pocos los problemas encontrados para implementar estos cambios (Wagner, 2013); las empresas hacen esfuerzos continuos para enfrentar las barreras sistémicas y no sistémicas, también llamadas internas y externas que se les presentan para lograr la generación, adopción o implementación de la innovación en sus productos, procesos y su gestión (Madrid-Guijarro, García & Van Auken, 2009). El presente trabajo propone estudiar los factores que perciben los empresarios como barreras u obstáculos a los procesos innovativos de las empresas, desde la gerencia estratégica de la empresa al momento de tomar decisiones observando las competencias organizacionales y la capacidad de absorción del conocimiento.

2. Antecedentes.

Realizar una innovación exitosa depende de la combinación adecuada de varios factores que van desde el financiero hasta las demandas del mercado, pasando por el personal capacitado, así como la adecuada relación con el entorno empresarial (Ahmed & Shepherd, 2012). Pese a que el entorno político y jurídico puede presentar normas y proyectos de incentivo a la mejora y diversificación de procesos y productos, e incluso estimular el desarrollo de un adecuado sistema nacional de innovación, algunas empresas se abstienen de iniciar procesos innovativos. Esto, debido al reto y esfuerzo que dicho proceso implica; pero además, por encontrar factores que pueden percibirse como barreras que bloquean o inhiben dichos procesos (Woolthuis, Lankhuizen, & Gilsing, 2005).

El presente trabajo plantea examinar dichos factores, los tipos que se presentan y su relación con los procesos innovativos llevados a cabo por las compañías, aplicando el proceso de estudio científico acorde a la normativa de investigación en las ciencias administrativas (Sekaran & Bougie, 2009). Trabajos relevantes en esta área son los de Damanpour, Szabat y Evan (1989) estudiando la relación entre los diferentes tipos de innovación y el rendimiento organizacional; Cohen y Levinthal (1990) abordando el estudio de las capacidades absorptivas; Arundel (1997) sobre las estrategias de las empresas frente a los factores que obstaculizan la innovación; D'Este, Iammarino y von Tunzelmann (2012), analizando la percepción de estos factores como barreras y su influencia sobre las prioridades en políticas de fomento a la innovación (Holzl & Janger, 2013), aportando a la escasa literatura que sobre el tema hay en Latinoamérica, posibilitando nuevos estudios comparativos con otros conglomerados empresariales de la región.

3. Marco Teórico.

3.1. Competencias organizacionales.

Una de las preguntas más importantes en la administración estratégica es cómo las empresas logran ventajas competitivas de manera sostenible (Barney, Della, Sciarelli & Arikian, 2012). La generación de valor y ventajas competitivas son producto de las capacidades de aprendizaje que poseen las firmas

para procesar información obtenida de fuentes externas, entender nuevas ideas e implementarlas con el fin de mejorar los resultados de la empresa (Cohen & Levinthal, 1990).

Wang, Hermens, Huang y Chelliah (2015) demuestran la influencia positiva y significativa del conocimiento organizacional y la capacidad de aprendizaje y en el desempeño de las empresas. En virtud de ello, estudios teóricos han analizado cómo el conocimiento organizacional es adquirido, retenido, transformado y transmitido dentro de la empresa (Petersen, Pedersen & Sharma, 2003). Casillas, Moreno, Acebo, Gallego y Ramos (2009) proponen un modelo del proceso de gestión del conocimiento en las empresas que incluye: (a) conocimiento previo, (b) adquisición de nuevo conocimiento, (c) integración de conocimiento nuevo con el conocimiento previo, (d) acción y (e) retroalimentación.

Cuando se habla de aprendizaje organizacional corresponde a un proceso basado en el aprendizaje individual, a través del cual la organización genera conocimiento con el fin de adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno (Castañeda, 2015). Para Chiva y Alegre (2005) el aprendizaje organizacional puede ser entendido como el proceso de construcción social dentro de la empresa en donde se comparten creencias y significados.

Según Chen, Lin y Chang (2009) las capacidades de absorción contribuyen a la generación de habilidades de aprendizaje organizacional por medio de la adquisición, asimilación, transformación y explotación de conocimiento obtenido por fuentes externas de información. Sin embargo, es importante mencionar que el proceso de aprendizaje organizacional no es automático: para que ocurra es necesario generar condiciones organizacionales que permitan la difusión y gestión del conocimiento (Alegre, Pla-Barber, Chiva, & Villar, 2012).

El concepto de capacidades dentro de una organización fue definido por Richardson (1972) como la acumulación de conocimiento experiencial y habilidades que generan ventajas competitivas. Esta definición conceptualiza las capacidades desde un enfoque evolutivo y experiencial del conocimiento.

3.2. Capacidad de Absorción.

En los últimos años, el estudio de las capacidades dinámicas ha tomado relevancia debido a que permite entender cómo las empresas reconfiguran sus recursos y competencias para ajustarlo a las nuevas condiciones de entorno (Weerawardena, Mort, Liesch, & Knight, 2007). De esta manera, las capacidades dinámicas son definidas como la combinación de recursos difíciles de imitar que permiten reconfigurar los recursos de la organización ante la dinámica del mercado generando ventajas competitivas de manera sostenible (Açıkıllı & Yaşar, 2013; Eisenhardt & Martin, 2000).

La Capacidad de Absorción (CA) es uno de los temas más estudiados en el enfoque evolutivo de la administración estratégica. Es considerada una de las dimensiones de las capacidades dinámicas que estudia la gestión del conocimiento por medio de la capacidad de incorporación de conocimiento intra e inter organizacional (Camison & Villar-López, 2012). Por ello, la CA ha sido incluida en modelos que buscan explicar los determinantes de las diferentes dimensiones del desempeño empresarial (Neely & Hii, 1998).

Las primeras definiciones de CA asumen la importancia del conocimiento previo para la adopción de un nuevo conocimiento por medio de un proceso de asociación. Cohen y Levinthal (1989) definieron por primera vez a la CA como la habilidad de las firmas para reconocer el valor de nueva información externa, asimilarla y aplicarla para fines comerciales. Más adelante, Mowery y Oxley (1995) la definen como un amplio conjunto de habilidades necesarias para tratar el componente tácito de los conocimientos transferidos y la necesidad de la modificación de ese conocimiento importado para las necesidades de la empresa. Kim (1997) define a la CA como la capacidad que permite aprender y resolver problemas para la empresa.

Las definiciones anteriores indican implícitamente la necesidad de una transformación del conocimiento externo para que sea útil y pueda ser explotado con fines comerciales. Por ello, Zahra y George (2002) integran el proceso de aprendizaje por fuentes externas y lo dividen en cuatro dimensiones: (a) adquisición, (b) asimilación, (c) transformación y (d) explotación, que permiten conocer la capacidad potencial y real de las empresas en adoptar un conocimiento obtenido por fuentes externas. El avance de la CA por medio de estudios empíricos se debió a la operacionalización de los constructos por medio de un cuestionario de percepción que permite medir las cuatro dimensiones de CA.

La CA ha sido operacionalizada no solamente por medio de factores sino por medio de proxies relacionados a I+D y a patentes (Koçoğlu, Akgün & Keskin, 2015). En las medidas de CA basadas en I+D han sido adaptadas para identificar el efecto del tamaño y del sector de la empresa. Entre las formas de medir la CA encontramos las siguientes: (a) intensidad en I+D, definida como el gasto en I+D dividido por las ventas totales (Cohen & Levinthal, 1990; Tsai, 2001; Belderbos, Carree, Diederens, Lokshin & Veugelers, 2004; Lin, Wu, Chang, Wang & Lee, 2012; Oh, 2016; Fernald, Pennings, Van den Bosch, Commandeur, & Claassen, 2017); (b) número de patentes (Mowery, Oxley & Silverman, 1996; Ahuja & Katila, 2001); (c) cantidad de publicaciones académicas (Cockburn & Henderson, 2003); (d) variables dicotómicas vinculadas con las actividades de I+D (Oltra & Flor, 2003; Del Carpio-Gallegos & Miralles-Torner, 2018) entre las más utilizadas.

Estas medidas de CA basadas en el resultado de la I+D han sido criticadas ya que no capturan el proceso de la gestión del conocimiento externo, por lo que también se utilizan medidas multidimensionales de la CA (Zahra & George, 2002). Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la inversión en I+D es una condición necesaria para la creación de capacidad de absorción (Tsai, 2001). El aumento de la capacidad de absorción a través de inversiones en esfuerzos internos de I+D aumenta la eficacia de la información entrante (René, Carree, Diederens, Lokshin & Veugelers, 2004). Henderson y Cockburn (1996) sostienen que las inversiones en I+D pueden mejorar la capacidad de una empresa para reconocer, asimilar y explotar nueva información externa.

Las inversiones en I+D no solo contribuyen a la generación de innovación, sino que también al desarrollo de capacidades y competencias, que no suelen ser valoradas como resultado del proceso innovador (Oh, 2017). Con ello, la innovación no solo permite solucionar problemas y aprovechar oportunidades, sino que también genera conocimiento que puede ser transmitido dentro de la empresa y fuera de ella por medio de la interacción con los miembros externos de la red de negocios (Lin, Wu, Chang, Wang, & Lee, 2012).

En consecuencia, el uso de una medida de CA basado en la I+D ha sido ampliamente utilizada para el estudio de la innovación en diferentes unidades de análisis: (a) en el estudio de países (Mowery & Oxley, 1995; Keller, 1996; Liu & White, 1997; Pérez & Toro, 2018); (b) por diferentes tipos de industrias (Del Carpio Gallegos & Miralles Torner, 2018; Stock, Greis & Fischer, 2001); (c) a nivel interorganizacional (Backmann, Hoegl & Cordery, 2015; Lane & Lubatkin, 1998) y (d) a nivel organizacional (Cohen & Levinthal, 1990).

En la práctica las inversiones en I+D de una empresa se consideran un proxy válido para la CA, en donde existen diferentes argumentos que justifican su uso como se observa en la Tabla 1. La CA basada en inversión en I+D se constituye en un vínculo entre el conocimiento externo y el logro de altos niveles de desempeño de la innovación (Tsai, 2008; Hagedoorn, 2012; Catozzella, 2014). Oltra y Flor (2003) afirman que la posesión de CA, expresada desde un enfoque sistemático de la I+D, manifiesta una influencia positiva en la producción de innovación. Por lo tanto, las empresas con mayores inversiones en I+D, tendrán una mayor CA; esto a su vez le permitirá generar resultados innovadores más exitosos en el futuro y exhibirá un desempeño futuro más alto (Oh, 2017).

Tabla 1. Capacidad de Absorción (CA): Conceptualización y Operacionalización.

Nº.	Autores	Nombre del artículo	Indicador CA	Argumentos	Metodología
1	Stock, Greis & Fischer (2001)	Capacidad de absorción y desarrollo de nuevos productos.	Gasto en I+D/VENTAS	Cohen y Levinthal (1989, 1990) encontraron una relación positiva entre I&D y aprendizaje. Kamien y Schwartz (1982) revisaron un número de estudios que indican una fuerte correlación positiva entre la intensidad de I+D y las medidas de resultados de innovación.	Regresión de Mínimos Cuadrados
2	Tsai (2001)	Transferencia de conocimientos en redes intraorganizacionales: efectos de la posición de la red y de la capacidad abortiva en la innovación y el desempeño de la unidad de negocio.	Gasto en I+D/VENTAS	La capacidad de absorción de una unidad organizativa para el aprendizaje depende de su dotación de capacidades relevantes basadas en tecnología (Mowery et al., 1996). La inversión en I+D es una condición necesaria para la creación de capacidad de absorción. Como sugirieron Cohen y Levinthal (1989), la capacidad de utilizar el conocimiento externo es a menudo un subproducto de la inversión en I+D. Las unidades organizativas con un alto nivel de capacidad de absorción invierten más en su propia I+D y tienen la capacidad de producir más innovaciones.	Regresión jerárquica
3	Lin, Wu, Chang, Wang & Lee (2012)	El desempeño de la innovación de la alianza de I+D: la perspectiva de la capacidad de absorción.	Gasto en I+D/VENTAS	Una mayor intensidad indica la mayor capacidad tecnológica interna de la firma. Una empresa con un alto nivel de intensidad de I+D es más capaz de explotar vínculos con otras empresas y crear conocimiento.	Regresión Binomial Negativa
4	Oh (2017)	Capacidad de absorción, efectos secundarios de la tecnología y la sección transversal de las devoluciones de acciones.	Capital I&D/ Ventas de la firma	Según Chan et al. (2001) se calcula como un gasto acumulado de 5 años en I+D suponiendo una tasa de depreciación anual del 20%. Las inversiones en I+D pueden mejorar la capacidad de una empresa para reconocer, asimilar y explotar nueva información externa, a saber, "capacidad de absorción" (por ejemplo, Cohen & Levinthal, 1989, 1990; Henderson & Cockburn, 1996).	Regresión Fama-McBeth
5	Fernald, Pennings, Van den Bosch, Commandeur & Claassen (2017)	El papel moderador de la capacidad de absorción y los efectos diferenciales de las adquisiciones y alianzas en el desempeño de innovación de las grandes empresas farmacéuticas.	Gasto en I+D/VENTAS	La intensidad en I+D es el indicador que se usa con mayor frecuencia y toma como referencia el trabajo de Lin et al. (2012).	Regresión de Poisson

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Desempeño Innovador.

Cuando se habla de desempeño innovador, hay que tener en cuenta que éste corresponde a resultados en términos de desempeño de producto, proceso, marketing y organizacional (Alegre, Lapiedra & Chiva, 2005). Por ello, el estudio del desempeño innovador se orienta a diversos tipos de innovación. Es decir, la innovación como una estrategia empresarial, lleva a solucionar un problema o responder ante una oportunidad específica. Por tanto, la evaluación del resultado de la innovación debe estar vinculada al objetivo de la innovación.

En primera instancia, es necesario diferenciar entre la innovación desde el punto de una estrategia y la innovación como una capacidad organizacional, debido a que una empresa puede lograr una innovación, sin que esto signifique el logro de la capacidad de innovación, dado que la innovación puede ser adoptada por fuentes externas a la empresa.

Pese a las diferencias en los distintos tipos de innovación, estos pueden estar relacionados. De acuerdo con Utterback y Abernathy (1975), los resultados de innovación de productos y de procesos están relacionados, cuando se toma en consideración que la innovación involucra las funciones de las empresas. Desde la perspectiva del aprendizaje organizacional, no solo el desarrollo de la innovación sino también su implementación, aumenta el inventario de conocimiento de la empresa.

Por la complejidad del estudio de la innovación empresarial, sus antecedentes han sido estudiados desde diferentes perspectivas teóricas sin que esto implique el logro de una taxonomía comúnmente aceptada. Las características de la industria, de la empresa y del entorno en donde se desarrolla tienen una influencia no solo en el logro de altos niveles de innovación, sino también en las barreras que inhiben la innovación empresarial. Pese al amplio estudio del tema, el desempeño innovador de las empresas no solo no tiene un marco teórico comúnmente aceptado, sino que las diferentes formas de operacionalización en estudios empíricos han impedido la generalización de los resultados.

Para Sánchez, Juliao y Zuluaga (2013) una de las principales limitaciones en el estudio de la innovación es la dificultad para medir sus resultados. En el caso del estudio de los resultados de innovación de productos, las diferentes formas de operacionalización se basan en la definición propuesta por la OECD (2005a), que determina como productos innovadores a aquellos totalmente nuevos o productos significativamente mejorados (Arias-Pérez, Schafer-Elejalde & Aristizábal-Botero, 2014).

Para la operacionalización del desempeño innovador se han utilizado medidas de percepción y objetivas. Para las medidas de percepción del desempeño innovador, se han propuesto escalas construidas por ítems que recogen respuestas mediante escalas Likert. Entre algunas medidas de percepción de desempeño innovador están las propuestas por Sok y O’Cass (2011), Alegre, Lapiedra y Chiva (2006), Lee, Kim y Lee (2011). Mientras que, a partir de los criterios de desempeño de innovación del Manual de Oslo, se ha realizado el análisis factorial exploratorio para identificar estructuras factoriales subyacentes (Paula & Silva, 2018).

Respecto a indicadores objetivos de desempeño innovador, se han utilizado medidas de relacionadas al número de patentes y ventas de productos nuevos o mejorados (Yam, Lo, Tang & Law, 2011). En otros estudios, la operacionalización del desempeño innovador de productos está definida como una variable dummy en la que se determina la existencia o no de innovación de producto (Fernandes, Lourenço & Silva, 2014).

3.4. Pertinencia de la Capacidad de Absorción en el Desempeño Innovador.

Hoy en día, las empresas de todas las industrias se involucran y abren sus procesos a la innovación (Chesbrough, 2006). La capacidad de innovar progresivamente se ha vuelto más importante a medida que los estudios revelan que las “empresas innovadoras” tienden a tener una mayor rentabilidad, un

incremento en el valor de mercado, mejores calificaciones crédito y más probabilidades de supervivencia (Czarnitzki & Kraft, 2004).

Cohen y Levinthal (1989) sostienen que la CA es un recurso que permite integrar el conocimiento externo en el propio conocimiento de la empresa; este proceso contribuye fundamentalmente al desarrollo de su actividad de innovación (Leiponen, 2005). Puesto que las empresas logran ajustar su organización interna a los cambios en su entorno, exploran oportunidades e incluso soluciones y tienden a explotar la innovación para satisfacer sus necesidades (Zahra & George, 2002).

Varios estudios revelan que una buena CA puede promover que la empresa absorba y digiera el conocimiento, realizar la transferencia de tecnología rápidamente, contribuir al desarrollo de nuevos productos y posteriormente mejorar los resultados de la innovación (Lin & Cao, 2008). Así mismo, varios autores confirman que la CA favorece de manera directa (Lichtenthaler, 2009) e indirecta (Lane, Koka, & Pathak, 2006) al desempeño de la innovación.

Por ello, el estudio de la relación ha sido llevada a diferentes contextos. Las industrias de alta tecnología como la farmacéutica han comprobado que la CA es una variable crítica para mejorar el desempeño de innovación (Jeon, Hong, Ohm & Yang, 2015; Fernald et al., 2017); mismo criterio obtienen las industrias de baja tecnología como la de panadería y manufacturera (Chen, Lin & Chang, 2009). Además, diferentes estudios muestran que la CA de las pymes es una variable de alto impacto que mejora su desempeño innovador (Scuotto, Del Giudice & Carayannis, 2017; Zhai et al., 2018), debido a que facilita el proceso de adquisición de conocimiento externo (Palacios-Marqués, Soto-Acosta & Merigó, 2015).

En definitiva, la CA se ha considerado una base fundamental para el éxito de la innovación (Chang & Chob, 2008). Assink (2006) sostiene que el desarrollo de innovación no es un esfuerzo de una sola vez, sino que requiere un desarrollo continuo de la CA para mejorar la capacidad general de innovación de las empresas. Por esta razón las empresas están cooperando activamente con el entorno externo para lograr un desempeño de innovación global que asimismo mejore su creación de valor y productividad. Esto, a su vez, conducirá al logro de ventajas competitivas a largo plazo (Cepeda-Carrión, Cegarra-Navarro & Jiménez-Jiménez, 2012).

3.5. Factores limitantes en el desarrollo de la innovación

La investigación dirigida a comprender las innovaciones exitosas no es un tema reciente y en los últimos años ha tomado relevancia para las organizaciones (Anderson, De Dreu & Nijstad, 2004; Verhees & Meulenberg, 2004). Mirow, Hölzle y Gemünden (2007) indican que los factores que dificultan la innovación han generado interés y son estudiados con mayor frecuencia. Es innegable el valor que genera el identificar los factores clave que explican cómo se puede gestionar la innovación; sin embargo, la capacidad para aprender de los fallos y los desvíos es fundamental para el progreso (Pisano, 2006). Lograr la minimización de los obstáculos en la innovación se considera en realidad como una clave para el éxito innovador (Hall & Martin, 2005).

Por lo tanto, es importante que las empresas tomen en consideración las barreras presentes en el momento de emprender sus esfuerzos en innovación. Las barreras a la innovación son definidas como factores que impiden, retrasan o bloquean completamente la innovación (Mirow, Hoelzle & Gemuenden, 2008). El descubrimiento de dichas barreras permitirá que las empresas tomen conciencia de las dificultades que tendrán que enfrentar en el compromiso con las actividades de innovación (D'Este, Iammarino, Savona & von Tunzelmann, 2012).

La literatura relacionada con las barreras de innovación identifica dos líneas de investigación. La primera línea trata de explicar cómo los obstáculos influyen en la propensión e intensidad de la innovación. En esta dirección se analizan los efectos y las causas de las barreras financieras en otras dimensiones como la innovación organizativa (Blanchard, Huiban, Musolesi & Sevestre, 2012). Así mismo, otros estudios muestran que la falta de financiación restringe las inversiones en planta o

maquinaria (Bloom & Van Reenen, 2007; Hubbard, 1998) y reducen la disposición de las pequeñas y medianas empresas manufactureras para desarrollar actividades de I+D (Mancusi & Vezzulli, 2014).

La segunda línea trata de identificar y analizar los determinantes de las diversas clases de barreras según las características de las empresas. Sin embargo, esta segunda línea de investigación comparte características similares en cuanto a la estructura del análisis y la elección de variables. Una muestra de ello es el enfoque en los gastos de investigación y desarrollo (I+D) como principal insumo para la innovación (De-Oliveira & Rodil-Marzábal, 2019).

Pellegrino y Savona (2017) identificaron otros factores al menos tan importantes como las limitaciones financieras que explican las fallas de innovación de las empresas. Al analizar los datos a nivel de empresa del Reino Unido (Community Innovation Survey 2002-2010), estos autores encontraron que ciertos factores no financieros, como la estructura de mercado concentrada y la falta de demanda, determinan el desempeño limitado de la innovación de la empresa. En un estudio realizado recientemente, los autores identifican otro factor determinante en la innovación. Luengo-Valderrey y Moso-Díez (2019) señalan que las empresas interesadas en mejorar su actividad innovadora deben ser conscientes de la importancia de la cualificación de los trabajadores y en conjunto la gestión del conocimiento para generar un mejor desempeño de la innovación.

La innovación exitosa depende de que la empresa combine una gama de capacidades, incluida la capacidad para acceder a financiación, comprender las necesidades del mercado, reclutar personal altamente calificado y establecer interacciones efectivas con otros actores (De-Oliveira & Rodil-Marzábal, 2019). Las empresas innovadoras necesariamente se ven obligadas a enfrentar la mayoría, si no todos de estos desafíos. Por ello, es imprescindible tener en cuenta estos tipos de obstáculos para un análisis más coherente en el estudio del desempeño innovador.

4. Hipótesis a evaluar.

H1: La Capacidad de Absorción medida por inversión (gastos) en I+D influye en el Desempeño Innovador.

H2: La fuente de origen de la I+D influye en el Desempeño Innovador

H3: Las barreras afectan el desempeño innovador

H4: La inversión en innovación tuvo impacto en el desempeño de las empresas

5. Marco metodológico.

Desde la perspectiva de la capacidad de absorción, este estudio pretende analizar la relación existente entre la inversión en I+D en el desempeño innovador de las empresas ecuatorianas de la industria manufacturera. La investigación se dirige a este sector debido a que es uno de los más importantes para cualquier nación: la contribución del sector manufacturero al PIB real ha aumentado de 14,8% a 16% en las dos últimas décadas a nivel mundial. En el Ecuador, la industria de manufactura es el principal sector de generación de valor agregado, genera el 10,7% del total de empleo, representa el 13,6% del PIB y contiene el 8% del total de las empresas del país (Guerra & Martin, 2017).

En este estudio, se emplean los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) de la “Encuesta Nacional de Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación” del periodo 2012 - 2014 el cual provee información de 6.275 empresas en 4 sectores económicos de todas las provincias del Ecuador, de los cuales 3.775 corresponden a la industria manufacturera. Teniendo en

cuenta la información obtenida se realiza un análisis de regresión lineal y múltiple para relacionar el desempeño innovador de la empresa con la capacidad de absorción.

6. Análisis de resultados.

Se selecciona un grupo de empresas que cumplen ciertas condiciones de innovación. En primer lugar, identificamos aquellas empresas que habían realizado ventas de productos innovadores, en total 1.439, tomando como fundamento la definición de innovación en producto del Manual de Oslo (OCDE, 2005b). En segundo lugar, considerando el enfoque en el estudio de la capacidad de absorción, a través de la inversión en I+D, elegimos a las empresas que durante el periodo de estudio realizaron gastos en I+D independientemente de su origen interno o externo, que fueron 818. Por último, analizamos la intensidad de innovación de las compañías y, por lo tanto, seleccionamos aquellas que tenían al menos 1% de gastos en I+D respecto a su facturación, donde finalmente se obtienen 201 empresas objeto de análisis.

En Ecuador, la inversión en I+D ha permanecido estancada desde el año 2009 debido a la falta de apoyo externo y gubernamental (CEPAL, 2016). En 2014, la inversión I+D a nivel nacional permanece por debajo del 0,5% respecto al PIB, considerando la inversión mundial de 2,12% se confirma la baja propensión de inversión en I+D de los países latinoamericanos (Banco Mundial, 2014). Durante el mismo periodo, el 54% de las empresas encuestadas por el INEC afirman haber realizado inversiones en innovación, de las cuales un 32% corresponde a las empresas de la industria de manufactura.

Las empresas manufactureras con un grado de innovación significativo provienen en su mayoría de la región Sierra, un 80% aproximadamente, donde la industria manufacturera de la provincia de Pichincha está representada con 133 empresas, esto es el 60% del grupo de empresas. Mientras que el 20% de las empresas son originarias de la región Costa, de las cuales la provincia del Guayas es la de mayor participación con 43 empresas, un 19% del total, como se muestra en la Tabla 2. Estos resultados corresponden al hecho de que Pichincha y Guayas son consideradas las capitales comerciales del país.

Tabla 2. Distribución de Empresas por provincia.

Provincia	Frecuencia	Porcentaje acumulado
Azuay	10	4,6
Bolívar	2	5,5
Chimborazo	2	6,6
Guayas	43	26,0
Imbabura	13	31,9
Loja	1	32,3
Manabí	2	33,0
Napo	1	33,5
Pichincha	133	92,9
Tungurahua	16	100,0
Total	223	

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, es importante destacar que no hay un sector totalmente dominante en la industria manufacturera respecto al nivel de innovación empleada. Esto es un indicio de que el sector al que

pertenece una empresa no determina su intensidad de innovación para el caso ecuatoriano. Sin embargo, el mercado local identifica tres actividades de mayor innovación: la actividad de fabricación de sustancias y productos químicos con 39 empresas o un 17% del total, seguido de la elaboración de productos alimenticios con 26 empresas (11,6%) y la fabricación de maquinaria y equipo con 22 empresas (un 10% aproximadamente), como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución de Empresas por Actividad Económica.

Actividad Económica - CIU	Frecuencia	Porcentaje acumulado
Elaboración de productos alimenticios	26	11,5
Elaboración de bebidas	3	12,7
Fabricación de productos textiles	2	13,7
Fabricación de prendas de vestir	4	15,3
Fabricación de cueros y productos conexos	4	16,9
Producción de madera y fabricación de productos de madera y corcho, excepto muebles; fabricación de artículos de paja y	3	18,1
Fabricación de papel y de productos de papel	2	19,0
Impresión y reproducción de grabaciones	20	28,0
Fabricación de sustancias y productos químicos	39	45,5
Fabricación de productos farmacéuticos, sustancias químicas medicinales y productos botánicos de uso farmacéutico	13	51,6
Fabricación de productos de caucho y plástico	18	59,7
Fabricación de otros productos minerales no metálicos	13	65,7
Fabricación de metales comunes	10	70,1
Fabricación de productos elaborados de metal, excepto maquinaria y equipo	12	75,6
Fabricación de productos de informática, electrónica y óptica	3	77,0
Fabricación de equipo eléctrico	1	77,4
Fabricación de maquinaria y equipo	22	87,1
Fabricación de vehículos automotores, remolques y semirremolques	3	88,4
Fabricación de otros tipos de equipos de transporte	8	92,0
Fabricación de muebles	4	93,9
Otras industrias manufactureras	8	97,5
Reparación e instalación de maquinaria y equipo	6	100,0
Total	223	

Fuente: Elaboración propia.

La procedencia del capital es un factor importante a considerar por las empresas en economías en desarrollo. En Ecuador, la mayor parte del capital de las empresas es de origen nacional: tan solo un 2,77% corresponde a capital extranjero. Mismo panorama reflejan las empresas innovadoras objeto de este estudio, cuyo capital producto de inversión extranjera es solo el 1,37%. La inversión extranjera en

el país ha permanecido baja como resultado del entorno regulatorio inestable y el débil estado de derecho (CIA, 2019).

El flujo de capital principalmente interno puede ser un factor que desincentiva los esfuerzos de innovación, debido a que dicho capital es cuidadosa y tradicionalmente administrado. Las empresas manufactureras enfrentan además el desafío de ser un sector poco atractivo para la Inversión Extranjera Directa, debido a que para el año 2013 solo el 1% fue destinado a este sector, cifra que se ha incrementado al 7% sin ganar mayor representatividad para el 2018.

A pesar de ello, la industria manufacturera ecuatoriana, a lo largo del tiempo, no ha sido indiferente a la innovación. Existen empresas de gran trayectoria con ventas innovadoras y otras de reciente constitución. La empresa más antigua tiene 74 años a la fecha de cohorte de la encuesta y presenta una alta proporción en ventas innovadoras. Un 50% de las empresas con ventas innovadoras fueron creadas a partir de año 2000; sin embargo, el comportamiento respecto a las ventas en innovación no difiere en gran medida considerando las edades, debido a que existen empresas nuevas con bajo nivel de ventas en productos innovadores y empresas antiguas con alto nivel de ventas innovadoras.

Las empresas innovadoras en el Ecuador tienen un promedio de facturación de 5,5 millones de dólares. Un 39% de las ventas totales corresponden a productos innovadores. Sin embargo, las empresas en promedio destinan una cantidad mínima de 5% a la inversión I+D, un gasto promedio menor a 0,4 millones, de los cuales la inversión en I+D interna es más intensiva con un 82%. Las cifras mencionadas reflejan la subvaloración que tienen las empresas respecto a la inversión en I+D o la Capacidad de Absorción que es la variable de estudio.

Para probar las hipótesis planteadas inicialmente, se especifican varios modelos de regresión que analizan la relación entre la capacidad de absorción y el desempeño innovador de las empresas, así como el efecto de las barreras de innovación. En primer lugar, se analiza la existencia de multicolinealidad en los modelos para garantizar que no haya problema en los modelos; se calcularon los factores de inflación de varianza (VIF) para las variables. Los valores del VIF están por debajo del nivel crítico de 10, lo cual significa que la multicolinealidad no contamina los resultados (O'Brian, 2007). Por lo tanto, no se planteó ninguna preocupación seria sobre la multicolinealidad.

Tabla 4. Resultados del Análisis de Regresión.

Variable	Modelos		
	1	2	3
Intercepto	185686,93	196789,916	389948,549
CA (I+D)	2,27*		
I+D interna		2,25*	2,84**
I+D externo		0,329	1,127
Tamaño	26988,94***	27037,97***	26415,68***
Barrera de fondos			(-674863,26**)
Barrera de financiamiento			444396,242
Barrera de costo de innovación			4582,681
R ²	0,669	0,669	0,677

*p<.1, **p<.05, ***p<.01 significancia de la variable

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar la influencia de la capacidad de absorción sobre el desempeño innovador se estiman tres modelos. El primer modelo consiste en un análisis de regresión lineal para evaluar la veracidad de

la hipótesis principal. El modelo 2 corresponde a un análisis de regresión múltiple donde se desagrega la variable de inversión I+D desde su origen interno o externo. Posteriormente el modelo 3 analiza el efecto de las barreras de innovación basándose en la estructura del segundo modelo.

Con el objetivo de probar la H1, la hipótesis principal, se relacionan las variables correspondientes a las ventas innovadoras y la capacidad de absorción, tal como lo muestra la Tabla 3. Se encontró que la CA operacionalizada a través de la inversión en I+D tiene un efecto significativo y positivo en las ventas innovadoras.

Por medio de la estimación del modelo 2, donde la variable que contiene la inversión en I+D se desagrega, se encontró que la I+D interna tiene un efecto significativo en el desempeño innovador de las empresas, mientras que la I+D externa carece de significancia. Este resultado confirma la segunda hipótesis planteada, relativa a la importancia que tiene el origen de la inversión en I+D en el desempeño innovador.

Bajo la misma estructura se incluyó el efecto de las barreras innovadoras en la relación entre la capacidad de absorción y el desempeño innovador de las empresas ecuatorianas. La barrera de innovación enfocada en el costo fue seleccionada para el análisis debido a que es la barrera señalada como la más importante por las empresas analizadas. Esta barrera fue operacionalizada por medio de tres variables dummy que representan los obstáculos que las empresas enfrentan respecto a la disponibilidad de fondos dentro de la empresa, la falta de financiación de fuentes de externas y los costos altos de producto de las actividades de innovación.

Por último, para evaluar la H4 donde se relaciona el impacto de la inversión en innovación en el desempeño de las empresas, se utiliza un Análisis de Componente Principal (ACP). Por medio de este procedimiento se extraen las variables que aportan mayor información y se compactan en componentes de mayor relevancia.

Tabla 5. Resultados del ACP en el impacto de las innovaciones.

		Componente	
		1	2
C1: Desempeño de mercado	Impacto del “Aumentó la variedad de bienes o servicios” debido a la introducción de innovaciones	0,780	0,256
	Impacto del “Reemplazó los productos o procesos desactualizados” debido a la introducción de innovaciones	0,522	0,332
	Impacto del “Ingresó a nuevos mercados” debido a la introducción de innovaciones	0,795	0,145
	Impacto del “Incremento de la participación de mercado” debido a la introducción de innovaciones	0,850	-0,055
	Impacto del “Mejóro la calidad de bienes o servicios” debido a la introducción de innovaciones	0,709	0,265
	Impacto del “Mejóro la flexibilidad para producir bienes o servicios” debido a la introducción de innovaciones	0,620	0,468
C2: Desempeño de procesos	Impacto del “Aumentó la capacidad para producir bienes servicios” debido a la introducción de innovaciones	0,338	0,738
	Impacto del “Redujo los costos de producción por unidad de producción” debido a la introducción de innovaciones	0,240	0,895
	Impacto del “Redujo los costos de materiales y energía por unidad de producción” debido a la introducción de innovaciones	0,017	0,876

Fuente: Elaboración propia.

Dentro del impacto de la inversión de innovación en empresas ecuatorianas, el análisis revela una mejora en eficiencia empresarial a nivel de mercado y de procesos. Por lo tanto, la Capacidad de Absorción o inversión en I+D, como promotor de la innovación crea un ambiente para generar ventajas competitivas sostenibles, mediante la capacidad de incorporar conocimiento intra e interorganizacional que permite a las empresas reconfigurarse ante la dinámica del mercado y la incorporación de nuevas tecnologías en los procesos de la industria manufacturera.

7. Conclusiones.

Este estudio revela interesantes resultados que contribuyen al entendimiento del alcance y relevancia de la innovación en las empresas de la industria manufacturera ecuatoriana. En primera instancia, se valida el efecto positivo que ejerce la CA de la empresa sobre el desempeño innovador, tal como la teoría sugiere.

Las empresas ecuatorianas cada vez más se involucran en actividades para desarrollar innovación. Entre las principales motivaciones se encuentran llegar a ser empresas proactivas para identificar apropiadamente oportunidades en el Mercado. Así mismo, las compañías consideran a la innovación una herramienta no sólo para hacer frente a las amenazas de la competencia sino también para no perder participación en su mercado. Por ello, los gastos en I+D para aprovechar dicha información del entorno se han convertido en una inversión imprescindible para el proceso de innovación.

Esta investigación confirma que la actividad de I+D desarrollada por la empresa genera efectos diferentes si se considera la fuente de la información. Para la empresa ecuatoriana innovadora cada dólar que invierte en I+D externa, 18,75\$ son destinados a la inversión en I+D interna. En las empresas de la industria manufacturera la concurrencia en actividades de I+D interna generará resultados más innovadores que la I+D externa, esto no implica que estas empresas no han tenido información de fuentes externas, más bien, esto conlleva al entendimiento que para las empresas ecuatorianas es necesario que exista un proceso interno que configure la información interna y externa para que se genere la innovación.

Para un análisis más profundo, se examinan factores del entorno que obstaculizan la innovación. La barrera respecto a la disponibilidad de fondos es la más significativa, este resultado es coherente con el hecho de que la principal fuente de financiación de las empresas analizadas es de origen nacional o interno, por lo tanto, si esta fuente es limitada reduce la posibilidad de inversiones en I+D y por ende futuros desarrollos en innovación.

Dentro de la industria manufacturera ecuatoriana, una empresa que invierte al menos el 1% de sus ventas totales en I+D y no percibe ninguna barrera en su entorno podría tener una mejora del 4,03% en su facturación. Sin embargo, muchas empresas no pueden disfrutar de este beneficio debido a que la barrera de disponibilidad de fondos genera un impacto negativo en las ventas innovadoras y es muy probable que éstas sean las que menos invierten en I+D debido a que no obtienen el retorno esperado.

Estos hallazgos revelan la importancia de la inversión en I+D para el crecimiento financiero de las empresas; así mismo, hace énfasis en la necesidad de crear estrategias que le permitan superar aquellas barreras que impiden su innovación y la generación de ventajas competitivas.

Por medio del análisis del impacto de la innovación se descubren los efectos transversales de las actividades de I+D. Los esfuerzos de innovación no solamente generan una mejora en el rendimiento financiero, sino que conlleva la eficacia de otros resultados no financieros como es el desempeño de mercado y de procesos. La innovación ha permitido a las empresas incrementar su participación en el mercado como resultado de ofertar productos actualizados con mayor variedad, calidad y con valor agregado. Con respecto a los procesos, el impacto de la innovación ha permitido a las empresas

manufactureras ecuatorianas incrementar sus capacidades de producción a la par de una reducción de costos tanto en materia prima como en la producción debido a la optimización de recursos.

Como se ha visto a lo largo de la investigación, la innovación es un proceso de gran valor con influencia contundente en el desempeño empresarial tanto a nivel de ingresos como en el proceso de aprendizaje. La Capacidad de Absorción ha demostrado ser una competencia organizacional significativa para el aprovechamiento del conocimiento externo que en conjunto al desarrollo interno de la empresa mejora los procesos y las características de los productos, habilidad que permite adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno. Por lo tanto, los gastos en I+D deben verse como una condición necesaria para que las empresas manufactureras ecuatorianas logren tomar mejores decisiones, superar obstáculos y alcanzar mayores niveles de competitividad a nivel local e internacional.

8. Futuras Investigaciones.

En este estudio se analizan las empresas manufactureras que reportan ventas innovadoras a partir del desarrollo innovador de productos con inversiones en I+D activas dentro del periodo de análisis 2012-2014. Este sector es rico en diversidad tanto en actividades, tamaños, intensidad tecnológica como en edad o ubicación geográfica. Esta diversidad genera una gran limitación en la investigación: los datos proporcionados por el INEC dificultan un estudio particular que permita hallazgos más profundos y utilizables para un determinado de grupo de empresas.

Otra limitación presente es no poder contar con datos cuantitativos completos para cada período de análisis, por lo tanto, se validaron los modelos en base a datos de corte transversal que comprendían los tres años de estudio. A pesar de estas limitaciones, este estudio ha sido útil para revelar hallazgos interesantes y generar un avance en literatura sobre el efecto de la Capacidad de Absorción en Ecuador.

Referencias

- Açıkdilli, G., & Yaşar, D. (2013). Dynamic capabilities and entrepreneurial orientation in the new product development. *International Journal of Business and Social Science*, 4(11), 145-150.
- Ahmed, P. K., & Shepherd, C. D. (2012). *Administración de la Innovación*. México: Pearson Editorial.
- Ahuja, G., & Katila, R. (2001). Technological acquisitions and the innovation performance of acquiring firms: a longitudinal study. *Strategic Management Journal*, 22(3), 197-220.
- Alegre, J., Lapiedra, R., & Chiva, R. (2005). Propuesta y validación de una escala de medida del desempeño innovador de la empresa. *Documento presentado en el Congreso Nacional de la ACEDE*. La Laguna, España.
- Alegre, J., Lapiedra, R., & Chiva, R. (2006). A measurement scale for product innovation performance. *European Journal of Innovation Management*, 9(4), 333-346.
- Alegre, J., Pla-Barber, J., Chiva, R., & Villar, C. (2012). Organisational learning capability, product innovation performance and export intensity. *Technology Analysis & Strategic Management*, 24(5), 511-526.
- Anderson, N., De Dreu, C., & Nijstad, B. (2004). The routinization of innovation research: a constructively critical review of the state-of-the-science. *Journal of Organizational Behavior*, 25(2), 147-173.

- Arias-Pérez, J., Schafer-Elejaldé, G., & Aristizábal-Botero, C. (2014). Relación entre desempeño innovador y madurez de capacidades de conocimiento y competencia. *Entramado*, 10(1), 82-95.
- Arundel, A. (1997). Enterprise strategies and barriers to innovation. *Innovation Measurement and Policies*, 50, 101-108.
- Assink, M. (2006). Inhibitors of disruptive innovation capability: A conceptual model. *European Journal of Innovation Management*, 9(2), 215-233.
- Backmann, J., Hoegl, M., & Cordery, J. L. (2015). Soaking It Up: Absorptive Capacity in Interorganizational New Product Development Teams. *Journal of Product Innovation Management*, 32(6), 861-877.
- Banco Mundial (2014). *Databank*. Recuperado de https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?locations=EC-1W&name_desc=false
- Barney, J., Della, V., Sciarelli, M., & Arikan, A. (2012). The role of resource-based theory in strategic management studies: Managerial implications and hints for research. En G. Battista, *Handbook of research on competitive strategy* (págs. 109-146). Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Belderbos, R., Carree, M., Diederén, B., Lokshin, B., & Veugelers, R. (2004). Heterogeneity in R&D cooperation strategies. *International Journal of Industrial Organization*, 22(8-9), 1237-1263.
- Blanchard, P., Huiban, J.-P., Musolesi, A., & Sevestre, P. (2012). Where there is a will, there is a way? Assessing the impact of obstacles to innovation. *Industrial and Corporate Change*, 22(3), 679-710.
- Bloom, N., & Van Reenen, J. (2007). Measuring and Explaining Management Practices Across Firms and Countries. *The Quarterly Journal of Economics*, 122(4), 1351-1408.
- Camison, C., & Villar-López, A. (2012). On how firms located in an industrial district profit from knowledge spillovers: Adoption of an organic structure and innovation capabilities. *British Journal of Management*, 23(3), 361-382.
- Casillas, J., Moreno, A., Acebo, F., Gallego, M., & Ramos, E. (2009). An integrative model of the role of knowledge in the internationalization process. *Journal of World Business*, 44(3), 311-322.
- Castañeda, D. (2015). Condiciones para el aprendizaje organizacional. *Estudios Gerenciales*, 31(134), 62-67.
- Catozzella, V. (2014). The catalysing role of in-house R&D in fostering complementarity among innovative inputs. *Industry and Innovation*, 21(3), 179-96.
- CEPAL (2016). Ciencia, tecnología e innovación en la economía digital. *Segunda Reunión de la Conferencia de Ciencia, Innovación y TIC de la CEPAL* (pp. 19-22). San José.
- Cepeda-Carrión, G., Cegarra-Navarro, J.G., & Jiménez-Jiménez, D. (2012). The effect of absorptive capacity on innovativeness: Context and information systems capability as catalysts. *British Journal of Management*, 23(1), 110-129.
- Chan, L.K., Lakonishok, J., & Sougiannis, T. (2001). The Stock Market Valuation of Research and Development Expenditures. *The Journal of Finance*, 56, 2431-2456.
- Chang, D.R., & Chob, H. (2008). Organizational memory influences new product success. *Journal of Business Research*, 61(1), 13-23.

- Chen, Y.-S., Lin, M.-J. J., & Chang, C.-H. (2009). The positive effects of relationship learning and absorptive capacity on innovation performance and competitive advantage in industrial markets. *Industrial Marketing Management*, 38(2), 152-158.
- Chesbrough, H. (2006). *Open Business Models: How to Thrive in the New Innovation Landscape*. Boston, MA: Harvard Business Press.
- Chiva, R., & Alegre, J. (2005). Organizational learning and organizational knowledge toward the integration of two approaches. *Management Learning*, 31(6), 49-68.
- CIA. (26 de 06 de 2019). *Central Intelligence Agency*. Recuperado de The World Factbook: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ec.html>
- Cockburn, I.M., & Henderson, R.M. (2003). Absorptive Capacity, Coauthoring Behavior, and the Organization of Research in Drug Discovery. *The Journal of Industrial Economics*, 46(2), 157-182.
- Cohen, W.M., & Levinthal, D.A. (1990). Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35, 128-152.
- Cohen, W., & Levinthal, D. (1989). Innovation and learning: The two faces of R&D. *Economic Journal*, 99(397), 569-596.
- Czarnitzki, D., & Kraft, K. (2004). Control Management and Innovative Activity. *Review of Industrial Organization*, 24(1), 1-24.
- D'Este, P., Iammarino, S., Savona, M., & von Tunzelmann, N. (2012). What hampers innovation? Revealed barriers versus deterring barriers. *Research Policy*, 41(2), 482-488.
- Damanpour, F., Szabat, K., & Evan, W. (1989). The relationship between types of innovation and organizational performance. *Journal of Management Studies*, 26(6), 587-601.
- Del Carpio, J.F., & Miralles, F. (2018). Absorptive capacity and innovation in low-tech companies in emerging economies. *Journal of Technology Management & Innovation*, 13(2), 3-11.
- De-Oliveira, F., & Rodil-Marzábal, Ó. (2019). Structural characteristics and organizational determinants as obstacles to innovation in small developing countries. *Technological Forecasting and Social Change*, 140(C), 306-314.
- Eisenhardt, K., & Martin, J. (2000). Dynamic capabilities: What are they? *Strategic Management Journal*, 21(10), 1105-1121.
- Fernald, K.D., Pennings, H.P., Van den Bosch, J.F., Commandeur, H.R., & Claassen, E. (2017). The moderating role of absorptive capacity and the differential effects of acquisitions and alliances on Big Pharma firms' innovation performance. *PLOS ONE*, 12(2), 1-22.
- Fernandes, A., Lourenço, L., & Silva, M. (2014). Influence of Quality Management on the Innovative Performance. *Revista Brasileira de Gestao de Negocios*, 16(53), 575-593.
- Govindarajan, V., & Trimble, C. (2013). *Innovación Inversa*. Bogotá: Carvajal Educación S.A.S.
- Guerra, F.J., & Martin-Montaner, J.A. (2017). Desarrollo Histórico de la Industria Manufacturera Ecuatoriana y su matriz de exportación. *Revista Publicando*, 4(2), 504-521.
- Hagedoorn, W. N. (2012). Is there complementarity or substitutability between internal and external R&D strategies? *Research Policy*, 41(6), 1072-1083.

- Hall, J., & Martin, M. (2005). Disruptive technologies, stakeholders and the innovation value-added chain: a framework for evaluating radical technology development. *R&D Management*, 35(3), 273-284.
- Henderson, R., & Cockburn, I. (1996). Scale, scope, and spillovers: the determinants of research productivity in drug discovery. *RAND Journal of Economics*, 27, 32-59.
- Holzl, W., & Janger, J. (2013). Does the analysis of innovation barriers perceived by high growth firms provide information on innovation policy priorities? *Technological Forecasting & Social Change*, 80, 1450-1468.
- Hubbard, R.G. (1998). Capital-Market Imperfections and Investment. *Journal of Economic Literature*, 36(1), 193-225.
- Jeon, J., Hong, S., Ohm, J., & Yang, T. (2015). Causal Relationships among Technology Acquisition, Absorptive Capacity, and Innovation Performance: Evidence from the Pharmaceutical Industry. *PLoS ONE*, 10(7), 1-14.
- Kamien, M., & Schwartz, N. (1982). *Market Structure and Innovation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Keller, W. (1996). Absorptive capacity: On the creation and acquisition of technology in development. *Journal of Developmental Economics*, 49, 199-210.
- Kim, D. (1997). From imitation to innovation: The dynamics of Korea's technological learning. *Harvard Business School Press*.
- Koçoglu, I., Akgün, A.E., & Keskin, H. (2015). The differential relationship between absorptive capacity and product innovativeness: a theoretically derived framework. *International Business Research*, 8(7), 108-120.
- Lane, P.J., & Lubatkin, M. (1998). Relative absorptive capacity and interorganizational learning. *Strategic Management Journal*, 19, 461-477.
- Lane, P. J., Koka, B.R., & Pathak, S. (2006). The Reification of Absorptive Capacity: A Critical Review and Rejuvenation of the Construct. *Academy of Management Review*, 31(4), 833-863.
- Lee, Y., Kim, S., & Lee, H. (2011). The impact of service R&D on the performance of Korean information communication technology small and medium enterprises. *Journal of Engineering and Technology Management*, 28(1), 77-92.
- Leiponen, A. (2005). Skills and innovation. *International Journal of Industrial Organization*, 23(5-6), 303-323.
- Lichtenthaler, U. (2009). Absorptive capacity, environmental turbulence, and the complementarity of organizational learning processes. *Academy of Management Journal*, 52(4), 822-846.
- Lin, C., Wu, Y.-J., Chang, C., Wang, W., & Lee, C.-Y. (2012). The alliance innovation performance of R&D alliances: the absorptive capacity perspective. *Technovation*, 32(5), 282-292.
- Lin, J., & Cao, J. (2008). Study on the knowledge-sharing mechanism of knowledge management of cluster enterprises. *Science & Technology Progress and Policy*, 4, 161-164.
- Liu, X., & White, R.S. (1997). The relative contributions of foreign technology and domestic inputs to innovation in Chinese manufacturing industries. *Technovation*, 17, 119-125.

- Luengo-Valderrey, M.J., & Moso-Díez, M. (2019). Interaction Between Knowledge Management Activities, Innovation Barriers and Innovation Performance: Spanish High and Medium Technology Firms. *Journal of the Knowledge Economy*, 10(1), 298-317.
- Madrid-Guijarro, A., García, D., & Van Auken, H. (2009). Barriers to Innovation among Spanish Manufacturing SMEs. *Journal of Small Business Management*, 47(4), 465-488.
- Mancusi, M.L., & Vezzulli, A. (2014). R&D and Credit rationing in SMEs. *Economic Inquiry*, 52(3), 1153-1172.
- Mirow, C., Hoelzle, K., & Gemuenden, H. (2008). The ambidextrous organization in practice: barriers to innovation within research and development. *Academy of Management Proceedings*, 1-6.
- Mirow, C., Hölzle, K., & Gemünden, H. (2007). Systematisierung, Erklärungsbeiträge und Effekte von Innovationsbarrieren. *Journal für Betriebswirtschaft*, 57(2), 101-134.
- Mowery, D.C., Oxley, J.E., & Silverman, B.S. (1996). Strategic alliances and interfirm knowledge transfer. *Strategic Management Journal*, 17(S2), 77-91.
- Mowery, D., & Oxley, J. (1995). Inward technology transfer and competitiveness: The role of national innovation systems. *Cambridge Journal of Economics*, 1, 67-93.
- Neely, A., & Hii, J. (1998). Innovation and business performance: a literature review. *The Judge Institute of Management Studies, University of Cambridge*, 1-57.
- O'Brian, R. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality and Quantity*, 41(5), 673-690.
- OECD (2005a). The measurement of scientific and technological activities. En *Proposed guidelines for collecting and interpreting technological data*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- OECD (2005b). *Manual de Oslo: Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación*. Oslo, Noruega: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Oh, J.-M. (2017). Absorptive capacity, technology spillovers, and the cross-section of stock returns. *Journal of Banking & Finance*, 85, 146-164.
- Oltra, M.J., & Flor, M. (2003). The Impact of Technological Opportunities and Innovative Capabilities on Firms' Output Innovation. *Creativity and Innovation Management*, 12(3), 137-144.
- Palacios-Marqués, D., Soto-Acosta, P., & Merigó, J.M. (2015). Online social networks as an enabler of innovation in organizations. *Management Decision*, 53(9), 1906-1920.
- Paula, F., & Silva, J. (2018). The impact of alliances and internal R&D on the firm's innovation and financial performance. *Brazilian Business Review*, 15, 533-550.
- Pellegrino, G., & Savona, M. (2017). No money, no honey? Financial versus knowledge and demand constraints on innovation. *Research Policy*, 46(2), 510-521.
- Pérez, E.O., & Toro, I. (2018). Study of the realized absorptive capacity in the organizations of Colombia and Brazil. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 11(4), 617-631.
- Pisano, G. (2006). Can science be a business? Lessons from Biotech. *Harvard Business Review*, 84(10), 114-125.
- René, B., Carree, M., Diederenc, B., Lokshin, B., & Veugelers, R. (2004). Heterogeneity in R&D cooperation strategies. *International Journal of Industrial Organization*, 22(8-9), 1237-1263.

- Richardson, G. (1972). The Organisation of Industry. *The Economic Journal*, 82(327), 883-896.
- Sánchez, I., Juliao, J., & Zuluaga, J. (2013). La relación entre las redes externas de trabajo y el desempeño innovador de las pymes colombianas: un análisis del rol moderador del ambiente industrial. *Estudios Gerenciales*, 29, 339-349.
- Scuotto, V., Del Giudice, M., & Carayannis, E. (2017). The effect of social networking sites and absorptive capacity on SMES' innovation performance. *Journal of Technology Transfer*, 42, 409-424.
- Sekaran, U., & Bougie, R. (2009). *Research Methods for Business* (Quinta ed.). Cornwall, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- SENPLADES (2012). *Transformación de la matriz productiva*. Quito: Ediecuatorial.
- Sok, P., & O'Cass, A. (2011). Achieving superior innovation-based performance outcomes in SMEs through innovation resource-capability complementarity. *Industrial Marketing Management*, 40, 1285-1293.
- Stock, G.N., Greis, N.P., & Fischer, W.A. (2001). Absorptive capacity and new product development. *The Journal of High Technology Management Research*, 12(1), 77-91.
- Tsai, W. (2001). Knowledge Transfer in Intraorganizational Networks: Effects of Network Position and Absorptive Capacity on Business Unit Innovation and Performance. *Academy of Management Journal*, 44(5), 996-1004.
- Tsai, W. (2008). External technology acquisition and firm performance: A longitudinal study. *Journal of Business Venturing*, 23(1), 91-112.
- Utterback, J.M., & Abernathy, W.J. (1975). A dynamic model of process and product innovation. *Omega*, 3(6), 639-656.
- Verhees, F., & Meulenber, M. (2004). Market orientation, innovativeness, product innovation, and performance in small firms. *Journal of Small Business Management*, 42(2), 134-154.
- Wagner, T. (2013). *Crear Innovadores*. Bogotá, Colombia: Simon & Schuster, Inc.
- Wang, K., Hermens, A., Huang, K.-P., & Chelliah, J. (2015). Entrepreneurial orientation and organizational learning on SME's innovation. *International Journal of Organizational Innovation*, 7(4), 65-75.
- Weerawardena, J., Mort, G., Liesch, P., & Knight, G. (2007). Conceptualizing accelerated internationalization in the born global firm: A dynamic capabilities perspective. *Journal of World Business*, 42(3), 294-306.
- Woolthuis, R. K., Lankhuizen, M., & Gilsing, V. (2005). A system failure framework for innovation policy design. *Technovation*, 25, 609-619.
- Yam, R.C., Lo, W., Tang, E.P., & Law, A.K. (2011). Analysis of sources of innovation, technological innovation capabilities, and performance: An empirical study of Hong Kong manufacturing industries. *Research Policy*, 40(3), 391-402.
- Zahra, S., & George, G. (2002). Absorptive capacity: A review, reconceptualization, and extension. *Academy of Management Review*, 27(2), 185-203.
- Zhai, Y.-M., Sun, W.-Q., Tsai, S.-B., Wang, Z., Zhao, Y., & Chen, Q. (2018). An Empirical Study on Entrepreneurial Orientation, Absorptive Capacity, and SMEs' Innovation Performance: A Sustainable Perspective. *Sustainability*, 10(2), 314.



Análisis del mercado laboral en Andalucía: factores determinantes del empleo y perfil del trabajador

SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, FRANCISCA J.

Departamento de Economía, Métodos Cuantitativos e Historia Económica
Universidad Pablo de Olavide
Correo electrónico: fsansan@upo.es

SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, ANA MARÍA

Departamento de Economía, Métodos Cuantitativos e Historia Económica
Universidad Pablo de Olavide
Correo electrónico: amsansan@upo.es

RESUMEN

En este trabajo se estudian características sociales y laborales de los trabajadores en la región de Andalucía, realizando un diagnóstico de la realidad sociolaboral en el año 2017. Se aplica un modelo de elección discreta de tipo Logit y un Análisis de Correspondencias Múltiple. Los resultados muestran que la situación laboral de los trabajadores está determinada por factores socioculturales, como el género, el nivel de estudios y la edad. El perfil del trabajador indica que existe una relación directa entre la edad y el nivel de estudios con las condiciones laborales. La crisis económica y financiera tiene un mayor impacto sobre las condiciones laborales de los hombres en mayor medida que en las mujeres.

Palabras clave: empleo, género, crisis, Logit, correspondencias múltiples.

Clasificación JEL: J21; O18; R11.

MSC2010: 82-05.

Analysis of the labor market in Andalusia: determinants of employment and worker profile

ABSTRACT

Social and labor characteristics of the workers of the region of Andalusia are studied, making a diagnosis of the socio-labor reality in 2017. A discrete choice model of Logit type and a Multiple Correspondence Analysis is applied. The results show that the labor situation of the workers is determined by sociocultural factors, such as gender, educational level and age. The profile of the worker indicates that there is a direct relationship between age and educational level with working conditions. The economic and financial crisis has a greater impact on the working conditions of men to a greater extent than on women.

Keywords: employment, gender, crisis, Logit, multiple correspondences.

JEL classification: J21; O18; R11.

MSC2010: 82-05.



1. Introducción.

La crisis económica y financiera que ha sufrido España ha afectado gravemente al mercado laboral, produciéndose una fuerte pérdida de puestos de trabajo, un deterioro de las condiciones laborales y por consiguiente de la calidad del empleo (Merino et al., 2012).

En los últimos años el mercado laboral ha sufrido grandes cambios, algunos de ellos debidos a la introducción de nuevas tecnologías, provocando la sustitución de personas por máquinas en la ejecución de muchas tareas, teniendo como consecuencia mayor desempleo (OIT, 2017). Sin embargo, podría generarse empleo para remediar el desempleo tecnológico, ello dependerá de que los trabajadores puedan reubicarse en nuevos puestos de trabajo (OIT, 2018). El empleo ha pasado de tener un carácter seguro y estable, a inseguro y temporal. Es imprescindible tener un conocimiento detallado de la realidad de un determinado territorio para poder cambiarla, ya que esto permitirá elaborar propuestas que incidan en la mejora de los problemas localizados. Además, el conocimiento de los factores que determinan el empleo tendrá como finalidad que los distintos planes, programas y estrategias a implementar en el mercado laboral reduzcan las tasas de desempleo mediante la creación de puestos de trabajo.

El mercado laboral español es problemático (García-Cintado et al., 2014), destacando especialmente el caso de la Comunidad Autónoma de Andalucía, en la que se recogen altas y persistentes tasas de paro y donde la contratación de tipo temporal tiene un elevado peso. Desde la perspectiva económica, el empleo se relaciona con el capital humano que agrega al individuo como trabajador a la empresa para generar valor añadido y poder cumplir los exigentes requisitos de productividad del mercado laboral (Moreno, 2015).

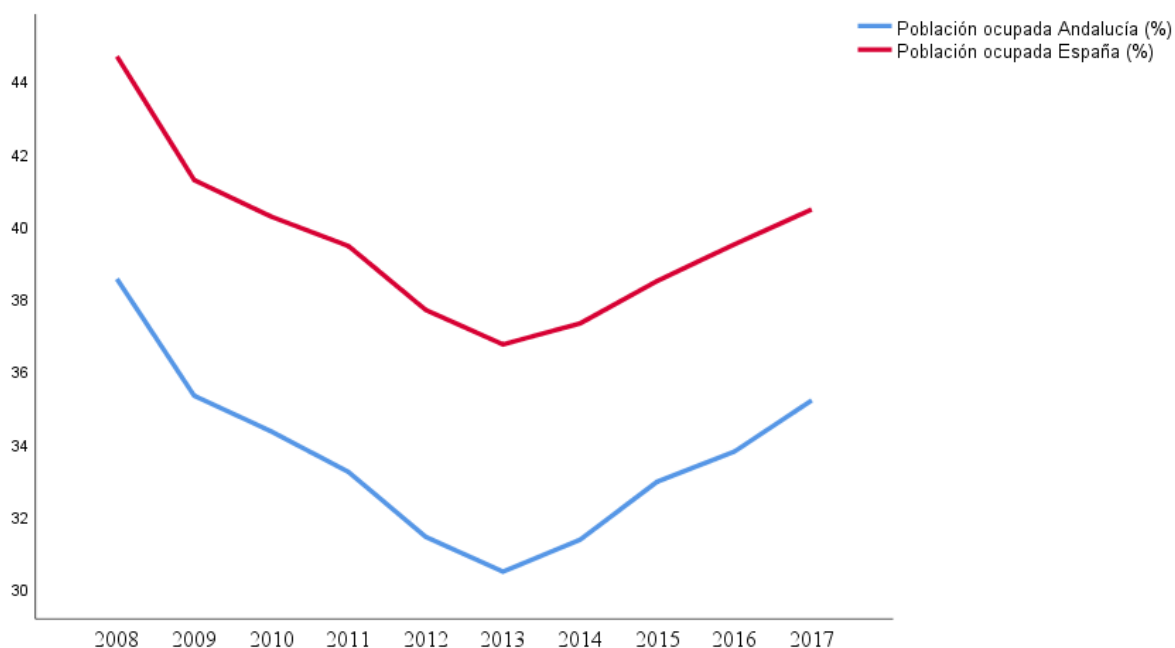
Son numerosos los debates existentes en la literatura científica sobre las causas de las altas tasas de desempleo en España. Una de las líneas de investigación existentes intenta explicar los niveles de desempleo como consecuencia de las carencias formativas, factor que en situaciones de crisis económica ha acentuado las dificultades para integrar en el mercado laboral a determinados colectivos, entre ellos los jóvenes, con poca formación y escasa cualificación (Ramón, 2011; Cabrales et al., 2013). Por el contrario, otra línea de trabajo subordina el elevado desempleo a los problemas del sistema productivo español, aferrado durante años al sector de la construcción, lo que ha provocado que el desempleo se convierta en un fenómeno estructural en España (Felgueroso, 2012). Algunos de estos trabajos analizan empíricamente factores como las competencias, las capacidades, las motivaciones personales, la situación familiar, los estudios y la propia estructura del mercado laboral, para mostrar los posibles desajustes existentes entre dichos factores y la situación laboral del individuo (Rodríguez, 2009; OIT, 2013; Dolado et al., 2013).

Durante la última década, el desempleo ha sido un problema económico y social importante en España. La tasa de desempleo de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) para el año 2017 se situó en el 5,5%, mientras que en España ha sido del 17,22%, siendo una de las más altas de la OCDE. Andalucía es una de las regiones españolas con mayor tasa de paro (25,50%) (Instituto Nacional de Estadística, 2017), lo que hace muy necesario conocer los factores que determinan el mercado laboral en la región andaluza; solo así podrán tomarse medidas y realizar acciones que permitan mejorar la situación laboral en la región, sirviendo a su vez de orientación básica y eficaz a la hora de tomar cualquier decisión a nivel institucional.

La Figura 1 permite comparar la evolución del empleo en España y en Andalucía durante el periodo 2008-2017. Para este estudio se analiza la variable población ocupada (medida en %), extraída de la Encuesta de Población Activa (EPA), proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística (INE). El comportamiento de la población ocupada a nivel nacional y regional tiene una tendencia muy similar, estando claramente marcado por la crisis económica, siendo a partir del año 2008 cuando la población ocupada sufrió un gran desplome, aunque desde el año 2013 se observa una constante recuperación en el empleo. Obsérvese que los porcentajes de población ocupada en la Comunidad Autónoma andaluza

son bastante inferiores a los nacionales, lo que pone de manifiesto la necesidad de conocer la realidad del territorio andaluz en materia laboral para poder cambiarla.

Figura 1. Evolución de la población ocupada en España y en Andalucía.



Fuente: Elaboración propia.

Dentro de un contexto económico en el que los estudios sobre la situación laboral cobran, si cabe, una mayor relevancia y teniendo en cuenta las limitaciones existentes en torno a este tema, la propuesta de análisis que aquí se presenta tiene como objetivo el estudio del mercado laboral en la Comunidad Autónoma de Andalucía a partir de determinadas características socioeconómicas, con la finalidad de establecer un diagnóstico de la situación laboral de la región y con ello determinar los factores que influyen en el mercado laboral. El estudio plantea un segundo objetivo con el que se persigue diseñar un perfil de los trabajadores andaluces, lo que también facilitaría el análisis sobre la posible evolución y prospección del mercado de trabajo regional con base en el comportamiento de las distintas variables que lo configuran.

Los datos utilizados para el análisis empírico hacen referencia a la Comunidad Autónoma de Andalucía en el año 2017 y se recogen a través de una encuesta de elaboración propia. Siempre que la situación económica sea estable, pueden ser extensibles y válidos a otras regiones españolas, debido a la similitud en las tendencias de las variables socioeconómicas analizadas a nivel regional.

El procedimiento planteado para la consecución de los objetivos del trabajo se divide en dos partes. La primera trata de determinar los factores que influyen en la situación laboral y para ello se aplicarán diferentes técnicas estadísticas como son el test Chi-Cuadrado (χ^2) de independencia y la definición de un modelo de elección discreta de tipo Logit. El modelo Logit permitirá identificar las características que ocasionan la conducta de un individuo ante un proceso de decisión. La segunda parte permitirá diseñar el perfil del trabajador andaluz, aplicándose un Análisis de Correspondencias Múltiple. Se determinará un espacio vectorial con un número de factores (o dimensiones) para explicar la información, con ello se reducirá el problema inicial, donde la distancia matemática entre los individuos indica el grado de asociación entre ellos.

Los resultados muestran que la situación laboral en Andalucía depende de variables socioculturales y demográficas como son el género, la edad y el nivel de estudios. Mientras que los

rasgos que definen el perfil del trabajador hacen referencia a tres dimensiones: características de tipo personal, del puesto de trabajo y del efecto de la crisis económica sobre el trabajador.

2. Metodología.

Para el desarrollo del trabajo se utilizan diferentes técnicas de investigación para el análisis del mercado de trabajo, consistentes básicamente en la aplicación del método científico a la realidad, características y circunstancias del mercado laboral, con un enfoque interdisciplinar y empleando un conjunto diversificado de instrumentos.

Participantes

La población objeto de estudio son los residentes en la región de Andalucía de 16 o más años (ver Tabla 1). El diseño muestral utilizado ha sido un muestreo aleatorio estratificado con afijación proporcional a un nivel de confianza del 95%. El error máximo de la muestra considerado es del 5%. Parece razonable una estratificación de la población andaluza en ocho categorías, atendiendo a cada una de las provincias andaluzas.

Tabla 1. Población andaluza y situación laboral por provincias (año 2017).

Provincia	Población de 16 y más años (miles de personas)	Población ocupada (miles de personas)	Población parada (miles de personas)
Almería	568,8	264,1	85,2
Cádiz	1020,5	397,8	172,8
Córdoba	653,3	270,4	106,1
Granada	756,3	326,9	113,5
Huelva	428,8	183,5	58,0
Jaén	536,5	216,3	79,1
Málaga	1357,1	589,9	170,7
Sevilla	1580,9	699,7	224,3
Total	6902,2	2948,6	1009,7

Fuente: Elaboración propia.

Para la selección de las unidades muestrales se utilizó un muestreo aleatorio simple. Las personas que participaron en la encuesta fueron seleccionadas al azar entre las ocho provincias andaluzas, teniendo en cuenta las cuotas consideradas para cada provincia según la afijación proporcional (Tabla 2). El tamaño muestral asciende a un total de 650 personas. La encuesta se realizó entre los meses de noviembre y diciembre del año 2017 en Andalucía.

Tabla 2. Tamaño muestral por provincias.

Provincia	Cuotas (%)	Tamaño muestral (personas)
Almería	8	54
Cádiz	15	96
Córdoba	9	62
Granada	11	71
Huelva	6	40
Jaén	8	51
Málaga	20	128
Sevilla	23	149

Fuente: Elaboración propia.

Instrumentos

Para la recogida de información se ha utilizado un cuestionario de elaboración propia (ver Anexo) que se ha estructurado en dos bloques que recogen información de:

- a) Variables socio-demográficas: edad, género, zona de residencia, provincia, estado civil, nivel académico, hijos y situación laboral.
- b) Variables que analizan la situación laboral de los individuos que se encuentran trabajando: tipo de cotización, tipo de contrato, jornada laboral, puesto que ocupa en la empresa, sector, salario neto, puesto acorde con la titulación, situación laboral afectada por la crisis, elementos en los que se ha visto afectada la situación laboral por la crisis económica y financiera que ha afectado a España en el periodo que va de 2008 a 2013.

Validación del cuestionario

Para la validación del cuestionario se aplica un Análisis Factorial Exploratorio. La medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO=0,708) verifica la adecuación muestral y la prueba de esfericidad de Barlett (Chi-Cuadrado=335,971; $p=0,000<0,01$) indica que la correlación entre los ítems es adecuada para aplicar dicha técnica. La consistencia interna muestra un Alfa de Cronbach de 0,720, indicando la alta fiabilidad del cuestionario en la población estudiada. El análisis permite extraer dos factores, que explican el 41,1% y 26,5% de la variación respectivamente, explicando el 67,6% de la variación total.

Procedimiento

Para determinar los factores que influyen sobre la variable que recoge si el individuo trabaja o no, se utiliza el test Chi-Cuadrado (χ^2) de independencia. Esta medida se complementará con el coeficiente Q de Yule para indicar una medida de la relación entre variables nominales dicotómicas. Una vez determinadas las variables entre las que existe relación, se aplicará el modelo de elección discreta para explicar cómo es dicha relación de dependencia y así poder cuantificarla. El modelo facilita la tarea de identificación de las características o factores que provocan un efecto o comportamiento de un individuo como respuesta a una causa o ante un proceso de decisión determinado. Si el proceso de decisión presenta solamente dos alternativas posibles, como es nuestro estudio, se habla de modelos de elección binaria; en concreto, el modelo que se aplica es el conocido como Logit. Mediante este modelo se identificarán los factores que provocan la respuesta de un individuo a una causa o ante un proceso de decisión definido. El uso del modelo Logit está ampliamente contrastado en el ámbito de la investigación (ver, por ejemplo, Berbegal & Canntonet, 2004; Chávez & Medina, 2012; Villacís & Reis, 2016; Lee & Little, 2017; Pourhoseingholi et al., 2010).

El modelo Logit se basa en la función de distribución logística. Si se denota a esta función por $F(\cdot)$, se tiene que:

$$Y_i = F(X_i' \beta) + \varepsilon_i$$

De esta forma:

$$\begin{aligned} E[Y_i|X_i] &= P[Y_i = 1|X_i] = P_i[Y_i|X_i] = P_i = F(X_i' \beta) = \Lambda(X_i' \beta) = \\ &= \Lambda(Z_i) = \frac{e^{Z_i}}{1 + e^{Z_i}} = \frac{1}{1 + e^{-Z_i}} = \frac{1}{1 + e^{-X_i' \beta}} \end{aligned}$$

y

$$P(Y_i = 0|X_i) = 1 - P_i = 1 - \frac{1}{1 + e^{-X_i' \beta}} = \frac{1}{1 + e^{X_i' \beta}}$$

Así pues, la estimación del modelo proporciona la cuantificación de la probabilidad de elegir la opción 1, es decir:

Dada la no linealidad del modelo, se tiene que:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_i &= \hat{P}_i = \Lambda(X_i' \hat{\beta}) = \frac{1}{1 + e^{-X_i' \hat{\beta}}} \\ \frac{P_i}{1 - P_i} &= \frac{\frac{1}{1 + e^{-Z_i}}}{\frac{1}{1 + e^{Z_i}}} = e^{Z_i} \quad , \end{aligned}$$

de donde:

$$Z_i = X_i' \beta = \ln \left(\frac{P_i}{1 - P_i} \right) = L_i.$$

L_i recibe el nombre de logit representando el logaritmo neperiano de la razón de la probabilidad a favor de la alternativa 1, es decir:

$$\beta_k = \frac{\partial L_i}{\partial X_{ki}}$$

Los parámetros miden el cambio en el *logit* ocasionado por un cambio unitario en la variable X_k ; esto es, cuánto varía el logaritmo de la razón de probabilidades a favor de la ocurrencia de la opción 1, ante incrementos unitarios de X_k , no el efecto marginal de un cambio unitario en X_k sobre la probabilidad de ocurrencia de la opción 1, P_i . Es importante reseñar que el signo de β_k sí indica el sentido del cambio en la probabilidad, aunque no su cuantía.

Para determinar la segunda propuesta de investigación, que llevará al diseño del perfil de los trabajadores andaluces, se aplicará el Análisis de Correspondencias (Benzécri, 1973; Greenacre, 1984). El objetivo que persigue el Análisis de Correspondencias es visualizar de forma sencilla las relaciones existentes entre las diferentes categorías de distintas variables de tipo cualitativo, enfrentadas en una tabla de contingencia. Se distinguen, dos tipos de Análisis de Correspondencias: Análisis de Correspondencias Simple (ACS) y Análisis de Correspondencias Múltiple (ACM). El ACS permite identificar los factores subyacentes a la combinación de categorías de dos variables cualitativas. El número máximo de dimensiones o factores que se pueden identificar en un ACS es el $\min\{I-1, J-1\}$, donde I denota el número de categorías de una variable y J el número de categorías de la otra variable. La extensión del ACS a cualquier número de variables es lo que se conoce como ACM, siendo el

número máximo de dimensiones o factores el $\min\{m, N-1\}$, donde m es el número de categorías de las variables sin datos perdidos menos el número de dichas variables y N es el tamaño de la muestra.

El Análisis de Correspondencias es una técnica descriptiva que permite elaborar un mapa perceptual de las categorías de las variables analizadas en un espacio de pocas dimensiones. La mayor o menor distancia entre los valores representados indican las relaciones de dependencia y semejanza entre las categorías analizadas.

En el Análisis de Correspondencias se dispone de una matriz de dispersión o matriz de inercia por filas, $S_F = X'X$, donde los elementos de la matriz X vienen dados por:

$$x_{ij} = \frac{f_{ij} - (f_i \cdot f_j)}{\sqrt{(f_i \cdot f_j)}}$$

donde f_{ij} representa las frecuencias relativas conjuntas, f_i y f_j indican las frecuencias relativas marginales por filas y columnas respectivamente.

La suma de los elementos de la diagonal de S representa la varianza inicial a factorizar, dada por:

$$I = \sum_{i,j} \frac{(f_{ij} - f_i \cdot f_j)^2}{f_i \cdot f_j}$$

y el resto de los elementos de S son las covarianzas. Análogamente, la matriz de dispersión para las columnas se puede obtener mediante, $S_C = XX'$. La suma de inercia por filas (traza de la matriz $X'X$) es igual a la suma de la inercia de las columnas (traza de la matriz XX'), obteniéndose la primera componente que explica la máxima varianza posible, la segunda componente explica la máxima varianza de las restantes y así hasta obtener tantas componentes como $(J-1)(I-1)$.

En el ACM se parte de una matriz de datos X con N filas y tantas columnas como la suma de las categorías del conjunto de variables a analizar (p). Las columnas son variables binarias codificadas con 1 ó 0.

Existe asociación entre variables si se rechaza la hipótesis nula de independencia. Aún sin rechazarse la existencia de grandes diferencias en los porcentajes de varianza explicada de los distintos factores se interpretaría en términos de asociación de variables. Se buscan las categorías que más contribuyen a la inercia de la dimensión o el factor. Cuanto mayor sea la contribución relativa, mejor representada está la categoría en el factor.

Para el tratamiento estadístico de los datos se ha usado el programa IBM SPSS Statistics v22.0.0 y Econometrics E-views 9.5.

3. Resultados.

Con el objetivo de analizar cuantitativamente el mercado laboral en la región andaluza, se estructuran los resultados en dos cuestiones: Factores determinantes del empleo y perfil del trabajador.

3.1 Factores determinantes del empleo.

La Tabla 3 muestra las variables sociodemográficas del análisis junto a sus diferentes categorías.

Tabla 3. Variables y categorías.

Denominación	Categoría de referencia	Resto de categorías
Situación laboral	No trabaja	Trabaja
Edad	Entre 16 y 24 años	Entre 25 y 45 años Más de 45 años
Género	Hombre	Mujer
Zona residencia	Capital provincia	Resto provincia
Provincia	Sevilla	Almería
		Cádiz
		Córdoba
		Granada
		Huelva
		Jaén
		Málaga
Estado civil	Divorciado-otro	Soltero Casado
Nivel académico	Universitarios	Sin estudios Básicos o medios Ciclo formativo
Hijos	Sí	No

Fuente: Elaboración propia.

El análisis descriptivo de estas variables sociodemográficas indica que el 46,4% de los individuos son hombres y el 53,6% mujeres. En cuanto a la situación laboral de dichos individuos, el 67,6% de ellos se encuentran trabajando y el 32,4% son desempleados. Los individuos con más de 45 años suponen el 32,4% de la muestra, entre 25 y 45 años representan el 52% y entre 16 y 24 años el 15,6% de los individuos. Respecto al estado civil, el 45,6% de las personas están casadas, el 39,6% son solteras y 14,8% están divorciadas o presentan otra situación. El 63,6% de los encuestados tienen estudios universitarios, el 22,4% han realizado ciclos formativos, el 12% tienen estudios básicos o medios y el 2% no tienen ningún tipo de estudios. Por último, indicar que el 55,2% afirman tener hijos mientras, que el 44,8% no los tienen.

Para analizar la relación existente entre la situación laboral de los encuestados con respecto a variables de tipo socio-demográfico, se aplica el test χ^2 de independencia cuyos resultados se muestran en la Tabla 4. El estadístico χ^2 y el nivel de significación indican que la situación laboral está asociada con las variables edad, género, estado civil, nivel académico e hijos. Sin embargo, la zona de residencia del individuo y la provincia no tienen ningún tipo de relación con la situación laboral de éste.

Este resultado se puede complementar con el análisis del coeficiente Q de Yule para las variables nominales dicotómicas. Este coeficiente indica que existe una relación directa o positiva y moderada entre la situación laboral del individuo y el género, es decir, los hombres principalmente están

trabajando mientras que las mujeres no. Por otra parte, la asociación entre la situación laboral y el tener hijos también es de tipo positivo y moderado, lo que indica que los trabajadores no tienen hijos mientras que los no trabajadores sí los tienen.

Tabla 4. Análisis de independencia con respecto a la situación laboral.

VARIABLES	Chi ²	Nivel significación	Q Yule
Edad	55,288	0,000*	-
Género	9,854	0,002*	0,413
Zona de residencia	1,743	0,187	-
Provincia	1,432	0,201	-
Estado civil	27,792	0,000*	-
Nivel académico	13,210	0,004*	-
Hijos	13,885	0,000*	0,471

*p<0,01.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran las tablas de contingencia entre la variable situación laboral y las variables con las que ésta presenta una relación de dependencia.

Tabla 5. Situación laboral según género.

	Desempleado	Trabajando	Total
Hombre	10,4%	36,0%	46,4%
Mujer	22,0%	31,6%	53,6%
Total	32,4%	67,6%	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Situación laboral según nivel de estudios.

	Desempleado	Trabajando	Total
Sin estudios	-	2,0%	2,0%
Básicos-medios	6,8%	5,2%	12,0%
Ciclo formativo	8,4%	14,0%	22,4%
Universitarios	17,2%	46,4%	63,6%
Total	32,4%	67,6%	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Situación laboral según hijos.

	Desempleado	Trabajando	Total
Sí	12,4%	42,8%	55,2%
No	20,0%	24,8%	44,8%
Total	32,4%	67,6%	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Situación laboral según edad.

	Desempleado	Trabajando	Total
Entre 16-24 años	12,8%	2,8%	15,6%
Entre 25-45 años	12,4%	39,6%	52,0%
Más de 45 años	7,2%	25,2%	32,4%
Total	32,4%	67,6%	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Situación laboral según estado civil.

	Desempleado	Trabajando	Total
Soltero	20,4%	19,2%	39,6%
Casado	8,4%	37,2%	45,6%
Divorciado-Otro	3,6%	11,2%	14,8%
Total	32,4%	67,6%	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Obsérvese que hay algunas categorías con poca representación en la muestra. Por ejemplo, véase que la categoría “Sin estudios” de la variable nivel de estudios (Tabla 6) en su cruce con la categoría “Desempleado” no tiene representación alguna en la muestra; de forma análoga en la categoría “Trabajando” representa solamente el 2% de los individuos. Esta situación nos lleva a agrupar las categorías “Sin estudios” y “Básicos-medios” como una única categoría que se seguirá denominando “Básicos-medios”.

Una vez identificadas las variables que presentan dependencia estadísticamente significativa con la situación laboral, el análisis se centra en determinar y cuantificar las categorías entre las que se establece dicha relación, planteándose y estimándose el modelo Logit. El modelo tendrá como variable dependiente la situación laboral y como independientes la edad, el género, el estado civil, el nivel académico y los hijos. Sin embargo, al realizar una primera estimación del modelo, las variables estado civil e hijos no son significativas por lo que se ha prescindido de ellas en el modelo definitivo.

La Tabla 10 proporciona los coeficientes estimados del modelo Logit. La estimación del modelo determina la probabilidad de que un individuo se encuentre trabajando. Se indican los estadísticos de prueba (Estadístico Z) y el nivel de significación para evaluar la hipótesis de significación estadística asociada a cada variable. Las variables explicativas consideradas son significativas estadísticamente

para explicar la variable situación laboral, salvo la variable nivel de estudios en su categoría *sin estudios*. El modelo estimado es significativo globalmente (nivel de significación LR). Como medida de fiabilidad del modelo Logit estimado, se ha obtenido el Pseudo R² de predicción indicando que el modelo clasifica correctamente el 77,6% de los casos, siendo un porcentaje aceptable para la fiabilidad del modelo.

Tabla 10. Estimación del modelo Logit

Variables	Coefficientes estimados	Estadístico Z	Nivel significación
Constante	-0,6524	-1,3825	0,1668
Género	-1,0677	-3,1418	0,0017*
Básicos o medios	-1,0910	-2,1256	0,0335**
Ciclo formativo	-0,8679	-2,3814	0,0172**
Edad ₂₅₋₄₅	2,8412	5,6229	0,0000*
Edad _{>45}	2,9106	5,4919	0,0000*
Estadístico LR	69,7449		
Nivel significación(LR)	1,16.10 ⁻¹³ *		

*p<0,01, **p<0,05.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se analizan los odds ratio asociados a las variables. En el caso del género, la posibilidad de que el hombre esté trabajando es 0,3437 veces superior que en el caso de las mujeres. La posibilidad de estar trabajando si se tienen estudios universitarios es 0,4198 veces superior a los que tienen ciclo formativo y 0,3358 a los que tienen estudios básicos o medios. Las personas con edades comprendidas entre 25 y 45 años y los mayores de 45 años tienen posibilidad de estar trabajando 17,11363 y 18,3678 veces superior que los que tienen entre 16 y 24 años respectivamente.

Podemos concluir que los factores género, edad y nivel de estudios son determinantes para la situación laboral del individuo.

3.2. Perfil del trabajador.

Para la segunda propuesta de investigación en la que se trata de diseñar un perfil con las características más importantes del trabajador, centrándose el análisis exclusivamente en las personas que trabajan, se emplea el Análisis de Correspondencias Múltiple, con el que se tratará de reducir la dimensión original del problema.

El análisis determinará el menor número de factores para explicar la mayor cantidad posible de variación o varianza. Se minimiza este valor usando tres factores en nuestro estudio, aunque también se planteó el análisis con 4 factores, pero el aumento en la variación explicada no era relevante para considerar esta opción.

En la Tabla 11 se muestra la importancia relativa de cada uno de los factores extraídos, indicando que los tres factores del modelo explican el 29%, 19% y 14,3% de la variación respectivamente, explicando los tres factores el 62,3% de la variación total. Este porcentaje de varianza explicada se considera aceptable, pues en estudios relacionados con Ciencias Sociales la cota inferior de tolerancia se fija en el 60% (Hair et al., 2000).

Tabla 11. Resumen del modelo y varianza explicada.

Factor	Total (autovalor)	Inercia	% acumulado de varianza
1	4,638	0,290	29,0
2	3,042	0,190	48,0
3	2,284	0,143	62,3
Total	9,965	0,623	

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 12 permite analizar los valores de discriminación de las variables consideradas en los tres factores. En el primer factor las variables salario, edad, hijos, estado civil, tipo de contrato y puesto ocupado son las que presentan mejores valores de discriminación, siendo estas variables las que contribuyen a caracterizar el factor. El primer factor se etiqueta como *Factores de tipo personal*, las variables que lo determinan recogen características de tipo personal del empleado. En el segundo factor, las variables puesto ocupado en la empresa, estudios, cotización, salario, jornada laboral y tipo de trabajo son las que más discriminan. Este factor se etiqueta como *Caracterización del puesto de trabajo*, las variables destacadas en el factor determinan el tipo de puesto de trabajo ocupado. En el tercer factor son las variables influencia de la crisis, sector, jornada laboral y género las que más discriminan, etiquetándose al factor como *Efecto de la crisis*.

Tabla 12. Clasificación por factor de variables relevantes para el trabajador.

Variables	Factor 1	Variables	Factor 2	Variables	Factor 3
Salario	0,685	Puesto ocupado	0,631	Influencia crisis	0,368
Edad	0,645	Estudios	0,602	Sector	0,329
Hijos	0,577	Cotización	0,403	Jornada laboral	0,263
Estado civil	0,571	Salario	0,294	Género	0,217
Tipo de contrato	0,511	Jornada laboral	0,263	Salario	0,184
Puesto ocupado	0,413	Tipo de trabajo	0,239	Trabajo acorde titulación	0,174
Tipo de trabajo	0,375	Tipo de influencia crisis	0,137	Tipo de influencia crisis	0,164
Trabajo acorde titulación	0,320	Sector	0,132	Puesto ocupado	0,134
Tipo influencia crisis	0,210	Trabajo acorde titulación	0,107	Estudios	0,112
Estudios	0,080	Estado civil	0,077	Edad	0,096
Provincia	0,079	Influencia crisis	0,077	Cotización	0,079
Jornada laboral	0,073	Edad	0,062	Residencia	0,074
Género	0,068	Provincia	0,038	Provincia	0,061
Influencia crisis	0,059	Tipo de contrato	0,008	Estado civil	0,030
Sector	0,027	Residencia	0,006	Tipo de trabajo	0,025
Residencia	0,019	Hijos	0,003	Hijos	0,019
Cotización	0,004	Género	0,000	Tipo de contrato	0,017

Fuente: Elaboración propia.

La variable género no resulta determinante en los dos primeros factores, es decir, el género no se identifica como un condicionante de los trabajadores respecto a los factores de tipo personal y la caracterización del puesto de trabajo. Sin embargo, en el tercer factor que recoge variables que discriminan especialmente en aspectos relacionados con la influencia de la crisis económica y financiera, el género es una variable influyente, indicando que la crisis ha afectado de manera desigual al trabajador dependiendo del género y la actividad que desarrolla.

Los resultados detallados del análisis en cada uno de los factores, permiten caracterizar al trabajador andaluz: los trabajadores con una edad comprendida entre 16 y 24 años, son solteros, sin hijos, con estudios básicos o medios, con un trabajo de tipo temporal, con jornada laboral a tiempo parcial, fundamentalmente desempeñan un puesto de administrativo o de obrero, éstos últimos

mayoritariamente no cotizan a la seguridad social, formando parte de la economía sumergida de la región y tienen un sueldo inferior a los 500€. Los trabajadores entre 25 y 45 años, mayoritariamente son universitarios, solteros, que cotizan a la seguridad social, con jornada laboral a tiempo completo y con un sueldo entre 1.001 y 1.500€. Mientras que los empleados con más de 45 años reciben un sueldo superior a los 2.000€, con contrato de tipo indefinido, con jornada laboral a tiempo completo, trabajan en el sector terciario y están divorciados o presentan otra situación. Respecto al efecto de la crisis, afecta en mayor medida a los hombres entre 25 y 45 años que trabajan en el sector secundario, a tiempo completo, con estudios básicos o medios, que ocupan puestos intermedios y con un sueldo comprendido entre 1.001 y 1.500€. Declaran que su situación laboral ha empeorado mucho desde el inicio de la crisis y la principal consecuencia es que reciben menos sueldo y trabajan durante más horas.

El perfil del trabajador estaría determinado por una relación directa entre la edad y el nivel de estudios con las condiciones que presenta en el puesto de trabajo. Es decir, a menor edad y nivel de estudios, más inestables y precarias son las condiciones laborales. El perfil del trabajador determinado es global para todo el territorio andaluz, dado que la variable provincia del trabajador no discrimina en ninguno de los factores extraídos, no pudiéndose fijar diferentes perfiles de trabajadores según la provincia de análisis.

4. Discusión.

Entre los factores determinantes de la situación laboral en Andalucía, se identifican factores de tipo personal. La variable situación laboral presenta una relación estadísticamente significativa con el género, con que el individuo tenga o no hijos, con el nivel de estudios y la edad. Sin embargo, en otros estudios además de la influencia de estas variables, la situación laboral también está determinada por factores como el estado civil y el lugar de residencia (Millán et al., 2015; Yáñez & Cano, 2011), circunstancia que no se refleja en los resultados obtenidos de nuestro análisis. Aparte de los determinantes personales del individuo, otros estudios también identifican factores externos que influyen sobre la situación laboral, como pueden ser los condicionantes del mercado de trabajo, elementos macroeconómicos, tipologías de la oferta, elementos de contratación, políticas de empleo y capital social (Cerrato et al., 2016).

Nuestros resultados son coincidentes con los de Ramón (2011), Cabrales et al. (2013) y Pérez y Hernández (2013), indicando que los problemas fundamentales del mercado laboral en España disminuirían significativamente con una mejora en la especialización y el nivel formativo de los trabajadores. Por el contrario, Garrido (2012) muestra que el problema del desempleo tiene difícil solución si se considera exclusivamente en términos de formación.

Son muchos los estudios que analizan el mercado laboral desde una perspectiva de género (Millán et al., 1999, 2015; Salinas et al., 2010; Torns & Recio, 2012; Prieto & Pérez, 2013). Nuestro estudio no se centra exclusivamente en este factor, aunque su análisis permite demostrar que esta variable es de suma importancia para analizar la situación laboral de los individuos, obteniéndose que los hombres tienen más probabilidad de trabajar que las mujeres, resultado similar al obtenido en Prieto y Pérez (2013) y Millán et al. (2015). Sin embargo, el análisis únicamente de los individuos que están trabajando, indica que el género no es un condicionante de los trabajadores respecto a factores de tipo personal y de caracterización del puesto de trabajo, aunque sí lo es para el análisis de la influencia de la crisis económica y financiera sobre los trabajadores, comprobándose que los hombres se han visto afectados en mayor medida que las mujeres por la crisis, resultado semejante al obtenido en Somarriba y Merino (2014). Las mujeres parecen estar resistiendo mejor que los hombres el desempleo, como indica Moreno (2013) no está claro si es debido al deterioro en la situación laboral de los hombres o más bien es resultado de la rentabilización que supone su capitalización en educación.

5. Conclusiones.

En este estudio fundamentalmente se ha realizado un diagnóstico de los factores que determinan y caracterizan la realidad laboral de los trabajadores en la Comunidad Autónoma de Andalucía. La situación laboral en la región se ve influida por factores de tipo sociocultural, como el género, la edad y el nivel de estudios alcanzados. Concretamente, los resultados muestran que las mujeres tienen más dificultad que los hombres para tener empleo, pero a ellas les ha afectado menos la crisis económica a nivel laboral. A medida que aumenta el nivel educativo de los individuos también lo hace la probabilidad de estar trabajando, además las personas más jóvenes tienen más difícil su incorporación al mercado de trabajo.

Se ha diseñado un perfil del trabajador de la región andaluza, que reflejaría las características de tipo personal del trabajador, características del puesto de trabajo y del efecto que la crisis económica ha tenido en el trabajador. La edad de los trabajadores está directamente relacionada con las características del puesto de trabajo, de forma que cuanto menor sea la edad del empleado, las condiciones laborales son más inestables y precarias. La variable nivel de estudios también está ligada directamente con la precarización del puesto de trabajo, pues a menor nivel de estudios peores condiciones laborales. Respecto al efecto de la crisis económica, la edad no determina claramente el grado en el que ésta afecta al trabajador. Los trabajadores de todos los sectores se ven afectados por la crisis, aunque el sector terciario es el que resiste mejor esta situación.

Destaca el hecho de que los resultados obtenidos tanto para el análisis de los factores determinantes del empleo como en el perfil del trabajador son generales en Andalucía, pues no se han identificado diferencias significativas a nivel provincial, no teniendo sentido la distinción por provincia.

Los resultados de la investigación deberían servir de referencia para orientar las políticas públicas de empleo, ayudando a establecer estrategias que permitan implementar acciones en el mercado laboral en base a la necesidad de reformular el sistema productivo, invirtiendo selectivamente en investigación y desarrollo, creando puestos de trabajo cualificados y potenciando las políticas públicas de educación que mitiguen el abandono escolar y favorezcan la formación continua. Todo ello tendrá un efecto positivo en los problemas localizados, en las condiciones laborales y en la “calidad” de los empleos creados.

Referencias

- Benzécri, J.P. (1973). *L'Analyse des Données, Tome 2: L'Analyse des Correspondences* (pp. 519-521). Paris: Dunod.
- Berbegal, J., & Canntonet, M.L. (2004). La tendencia hacia la servitización en la gestión de la prevención de riesgos laborales. *Intangible Capital*, 10 (2), 317-341. Descargado de <https://www.diba.cat/documents/467843/53227647/La+tendencia+hacia+la+servitizaci%3%b3n+en+la+gesti%3%b3n+de+la+prevenci%3%b3n+de+riesgos+laborales.pdf/542cda8b-3882-4da9-af72-0ccb508cc9d4>
- Cabrales, A., Dolado, J., & Mora, R. (2013). *Dualidad laboral y déficit de formación en el empleo: evidencia sobre España con datos PIAAC*. En Instituto Nacional de Evaluación Educativa (Eds.), PIAAC: Programa Internacional para la Evaluación de las Competencias de la población adulta. Descargado de <https://www.mecd.gob.es/inee/dam/jcr:5142cae0-4561-4ff9-9259-a540e77201fd/cabralespiaac2013vol2.pdf>

- Cerrato, K.M., Argueta, L.R., & Zavala, J.C. (2016). Determinantes de la empleabilidad en el mercado laboral. *Economía y Administración*, 7 (1), 21-40. Descargado de <https://www.lamjol.info/index.php/EyA/article/view/4292>
- Chávez, Y., & Medina, P. (2012). Determinantes de la temporalidad en el mercado laboral ecuatoriano. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 13 (1), 24-53. Descargado de <https://www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/article/view/2138>
- Dolado, J., Jansen, M., Felgueroso, F., Fuentes, A., & Wölfl, A. (2013). Youth labour market performance in Spain and its determinants: A Micro-Level Perspective, OECD. *Economics Department Working Papers*, 1039, (Paris: OECD Publishing). Descargado de http://www.eco.uc3m.es/temp/dolado/OECD_WP_Dolado_et_al-2.pdf
- Felgueroso, F. (2012). El empleo juvenil en España: Un problema estructural. *Círculo Cívico de Opinión. Cuadernos. Documento 2. Empleo juvenil*, 37-51.
- García-Cintado, A., Romero-Ávila, D., & Usabiaga, C. (2014). *Spanish Regional Unemployment. Disentangling the Sources of Hysteresis*. Berlín: Springer (Springer-Briefs in Economics).
- Garrido, L. (2012). Para un diagnóstico sobre la formación y el empleo de los jóvenes. *Círculo Cívico de Opinión. Cuadernos. Documento 2. Empleo Juvenil*, 11-36.
- Greenacre, M. J. (1984). *Theory and Applications of Correspondence Analysis*. London: Academic Press.
- Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., & Black, W.C. (2000). *Análisis Multivariante*. Madrid: Prentice Hall Iberia.
- Instituto Nacional de Estadística (2017). *Encuesta de Población Activa*. Descargado de <https://www.ine.es/dynt3/inebase/es/index.htm?padre=990&capsel=994>
- Lee, J., & Little, T.D. (2017). A practical guide to propensity score analysis for applied clinical research. *Behaviour Research Therapy*, 98, 76-90. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005796717300141>
- Merino, M.C., Somarriba, N., & Negro, A. (2012). Un análisis dinámico de la calidad del trabajo en España. Los efectos de la crisis económica. *Revista de Estudios de Economía Aplicada*, 30(1), 261-282. Descargado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3932542>
- Millán, G., Retenaga, L., & Caridad, J. M. (1999). Influencia de la mujer en el mercado de trabajo andaluz: Análisis cuantitativo. *XXV Reunión de Estudios Regionales*. Asociación Andaluza de Ciencia Regional, Sevilla.
- Millán, M.G, Santos, M.P., & Pérez, L.M. (2015). Análisis del mercado laboral femenino en España: evolución y factores socioeconómicos determinantes del empleo. *Papeles de Población*, 84, 197-225. Descargado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/pp/v21n84/v21n84a8.pdf>
- Moreno, A. (2015). La empleabilidad de los jóvenes en España: Explicando el elevado desempleo juvenil durante la recesión económica. *Revista Internacional de Investigación en Ciencias Sociales*, 11(1), 3-20. Descargado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5156077>

- OIT (2013). *Youth guarantees: A response to the youth employment crisis?* Geneva: Employment Policy. Descargado de <http://docplayer.net/41075113-Youth-guarantees-a-response-to-the-youth-employment-crisis.html>
- OIT (2017). *Informe inicial para la Comisión Mundial sobre el Futuro del Trabajo*. Ginebra. Descargado de https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---cabinet/documents/publication/wcms_591504.pdf
- OIT (2018). *La influencia de la tecnología en la calidad y la cantidad del empleo*. Ginebra. Descargado de https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---cabinet/documents/publication/wcms_618371.pdf
- Pérez, F., & Hernández, L. (2013). *Educación, conocimientos y perfiles ocupacionales*. En Instituto Nacional de Evaluación Educativa (Eds.), PIAAC: Programa Internacional para la Evaluación de las Competencias de la población adulta, 2013, (Informe español vol. II). Descargado de <https://www.mecd.gob.es/inee/dam/jcr:bf6547f4-7b6e-4449-986b-cff910d5ef89/perezhernandezpiaac2013vol2.pdf>
- Prieto, C., & Pérez, S. (2013). Desigualdades laborales de género, disponibilidad temporal y normatividad social. *Revista Española de Investigación Sociológica*, 141, 113-132. Descargado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4125878>
- Pourhoseingholi, A., Pourhoseingholi, M.A., Rostami-Nejad, M., Rostami, K., Mirsatari, D., Zojaji, H., Solhpour, A., & Zali, M.R. (2010). Implementation of statistical analysis in the clinical research of coeliac disease: use of probit and logit analysis. *East African Journal of Public Health* 7(2), 168-70. Descargado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21413598>
- Ramón, J. (2011). *Desempleo juvenil en España: Causas y soluciones*. BBVA Research, 11/30, Documentos de Trabajo. Descargado de https://www.bbvaesearch.com/KETD/fbin/mult/WP_1130_tcm346-270043.pdf
- Rodríguez, J. (2009). *Empleabilidad de los jóvenes*. Serie Avances de Investigación 32. Madrid: Fundación Carolina. Descargado de https://www.fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2014/07/Avance_Investigacion_32.pdf
- Salinas, P., Reyes, C., Román, G., & Ziede, M. (2010). Mercado laboral femenino. Un estudio empírico, desde la perspectiva de la demanda, en la región minera de Antofagasta, Chile. *Innovar. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 20(38), 125-140. Descargado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/innovar/article/view/22389/34709>
- Somarriba, N., & Merino, M. C. (2014). Una aproximación a la calidad del empleo en España desde la perspectiva de género por subgrupos ocupacionales. *Revista universitaria de ciencias del trabajo*, 0, 19-45. Descargado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5233688>
- Torns, M.T., & Recio, C. (2012). Desigualdades de género en el mercado de trabajo: entre la continuidad y la transformación. *Revista de Economía Crítica*, 14, 178-202. Descargado de <http://www.revistaeconomiacritica.org/sites/default/files/revistas/n14/Semimonografico-4.-Torns-Recio.pdf>

- Villacís, A.A., & Reis, M.M. (2016). Análisis de la vulnerabilidad laboral y los determinantes del trabajo decente. El caso de Ecuador 2008-2011. *Revista de Economía del Rosario*, 18 (2), 157-185. Descargado de <http://revistas.urosario.edu.co/index.php/economia/article/view/4943>
- Yañez, M., & Cano, K. C. (2011). Determinantes del desempleo: una revisión de la literatura. *Revista Panorama Económico*, 19, 135-148. Descargado de <http://revistas.unicartagena.edu.co/index.php/panoramaeconomico/article/view/352>

Anexo

ENCUESTA SOBRE EL ESTADO SOCIO-ECONÓMICO Y LABORAL EN ANDALUCÍA

Buenos/as días/tardes. Soy, estoy realizando un estudio sobre los factores que influyen sobre la situación laboral de las personas.

Usted ha sido seleccionado para realizarle una entrevista. Le agradecería que colaborara con nosotros contestando a las siguientes preguntas para llevar a buen fin esta investigación. El cuestionario es anónimo por lo que le garantizamos por completo la confidencialidad de sus opiniones.

Muchas gracias

SOCIO-DEMOGRÁFICAS

1. Lugar de residencia

- capital de provincia*
 resto de provincia

2. Provincia

- Almería*
 Cádiz
 Córdoba
 Granada
 Huelva
 Jaén
 Málaga
 Sevilla

3. Género

- hombre*
 mujer

4. Estado Civil

- soltero*
 casado
 divorciado-otro

SOLO DESEMPLEADO

9. ¿Cree que encontrará trabajo en menos de seis meses?

- nada seguro* *quizás* *muy seguro*

SOLO TRABAJANDO

10. Cotización

- a la seguridad social*
 economía sumergida

11. Tipo de trabajo

- por cuenta propia* *por cuenta ajena*

12. Tipo de contrato

- temporal* *indefinido*

13. Jornada laboral

- completa* *parcial* *otra modalidad*

14. Puesto que ocupa

- obrero* *administrativo*
 mando intermedio *directivo* *NS/NC*

5. Edad

- entre 16 y 24 años*
- entre 25 y 45 años*
- más de 45 años*

6. Nivel académico

- sin estudios*
- estudios básicos y medios*
- ciclos formativos*
- estudios universitarios*

7. Hijos

- Sí*
- No*

SITUACIÓN LABORAL

8. Actualmente se encuentra

- desempleado*
- trabajando*

15. Sector en el que trabaja

- primario*
- secundario*
- terciario*

16. Salario neto al mes

- 500*
- 501/1000*
- 1001/1500*
- 1501/2000*
- +2000*

17. Puesto de trabajo acorde a la titulación

- si*
- no*
- NS/NC*

18. Su situación laboral ha sido afectada por la crisis

- no*
- NS/NC*
- empeora mucho*
- empeora*
- mejorado*
- mejora mucho*

19. Su situación laboral después de la crisis ha cambiado en cuanto a:

- menos sueldo*
- más horas de trabajo*
- menos sueldo y más horas de trabajo*
- más sueldo*
- menos horas de trabajo*
- más sueldo y menos horas de trabajo*
- otras condiciones*

Industria 4.0 y la digitalización hacia la satisfacción laboral de las organizaciones en Tampico, Tamaulipas, México

DÍAZ MARTÍNEZ, MARCO ANTONIO

Área de Posgrado e Investigación. Instituto Tecnológico Superior de Pánuco (Veracruz)
Correo electrónico: marco.diaz@itspanuco.edu.mx

ROMÁN SALINAS, REINA VERÓNICA

Área de Ingeniería Industrial. Instituto Tecnológico Superior de Pánuco (Veracruz)*
Correo electrónico: reina.roman@itspanuco.edu.mx

SANTIAGO SANTIAGO, ARIADNA DAULET

Área de Gestión Empresarial. Instituto Tecnológico Superior de Pánuco (Veracruz)
Correo electrónico: Ariadna.santiago@itspanuco.edu.mx

MEJÍA BARRIOS, CATALINA*

Correo electrónico: catalina.mejia@itspanuco.edu.mx

ZÁRATE CRUZ, RICARDO*

Correo electrónico: ricardo.zarate@itspanuco.edu.mx

RESUMEN

La industria 4.0 está relacionada en cada lugar y con el uso y la implementación de nuevas tecnologías para la mejora continua de los procesos administrativos. Como parte del crecimiento de una organización, es importante que día a día se adapte a los cambios tecnológicos que afectan las operaciones de los trabajadores o la seguridad laboral. Algunos de los elementos que abarca esta industria son el uso de equipos autónomos, robótica, simuladores de procesos, impresoras 3D, inteligencia artificial y equipos que comparten información en tiempo real. El objetivo de este artículo consiste en valorar los procesos de digitalización de las organizaciones de la ciudad de Tampico, Tamaulipas (México), desde el punto de vista del usuario, para identificar los factores determinantes de la satisfacción laboral. Se emplea la técnica multivariante de regresión de mínimos cuadrados parciales, considerando como factores de análisis de digitalización y su relación con el modelo de relación y colaboración, habilidades y competencias profesionales, formación digital y procesos de digitalización. Los resultados muestran que el grado de motivación aumenta con el incremento en la digitalización de los procesos y que la formación digital y las competencias profesionales necesitan aumentar gradualmente para tener un impacto positivo en relación con los procesos de digitalización.

Palabras clave: Industria 4.0, mejora continua, condiciones organizacionales, alfa de Cronbach.

Clasificación JEL: C4; C5; L00; L7; L80; L84.

MSC2010: 90B70; 62P30.

Artículo recibido el 2 de abril de 2019 y aceptado el 1 de julio de 2019.

Industry 4.0 and digitization towards job satisfaction of organizations in Tampico, Tamaulipas, Mexico

ABSTRACT

Industry 4.0 is related in each place and with the use and implementation of new technologies for the continuous improvement of administrative processes. As part of the growth of an organization, it is important that day by day it adapts to technological changes that affect worker operations or job security. Some of the elements that this industry encompasses are the use of autonomous equipment, robotics, process simulators, 3D printers, artificial intelligence and equipment that share information in real time. The objective of this article is to assess the digitization processes of organizations in the city of Tampico, Tamaulipas (Mexico), from the user's point of view, to identify the determining factors of job satisfaction. The multivariate technique of partial least squares regression (or PLS, by Partial Least Squares (or SEM, by Structural Equation Models) is used, considering as digitization analysis factors and their relationship with the relationship and collaboration model, skills and competencies professionals, digital training and digitization processes. The results show that the degree of motivation increases with the increase in the digitization of processes and that digital training and professional competencies need to increase gradually to have a positive impact in relation to the processes of digitization.

Keywords: Industry 4.0, continuous improvement, organizational conditions, Cronbach's alpha.

JEL classification: C4; C5; L00; L7; L80; L84.

MSC2010: 90B70; 62P30.



1. Introducción.

En el campo de los procesos de fabricación, avances en ciencia y tecnología apoyan continuamente el desarrollo de la industrialización en todo el mundo (Belvedere, Grando & Bielli, 2013). En una revolución industrial desde una perspectiva de evolución tecnológica, se han identificado cuatro etapas comunes (Maynard, 2015; Kagermann, 2013), en las que los primeros tres tomaron alrededor de dos siglos y son el resultado, respectivamente de: 1) la introducción de agua y vapor en el funcionamiento de los procesos mecánicos; 2) la aplicación de tecnologías de producción en masa y 3) la combinación de electrónica y tecnologías de la información (TI) para generar un respaldo hacia la automatización de la fabricación (Drath & Horch, 2014). En la actualidad, la atención al Internet de las cosas (IoT) y sus intervenciones en procesos industriales, así como a los ciber-sistemas (CPS), gobiernos e industrias de todo el mundo han notado esto (Atzori et al., 2010; Khaitan & McCalley, 2015). Esta tendencia ha actuado para beneficiarse de lo que esta nueva revolución industrial podría proporcionar (Ridgway et al., 2013).

1.1. Planes y perspectivas de gobierno.

Desde 2011, el gobierno de los Estados Unidos dio un comienzo muy importante hacia los debates, las acciones y las recomendaciones a nivel nacional y lo llamó "Asociación de Manufactura Avanzada (AMP)" para que Estados Unidos esté preparado para liderar la próxima generación de fabricación (Reif et al., 2014). Por otro lado, en 2012, un plan de acción llamado "Estrategia de alta tecnología 2020" se aprobó en Alemania y establece montos millonarios para el desarrollo de nuevas tecnologías de vanguardia. Como uno de los proyectos de este plan en el futuro es el de "Industria 4.0", que representa para el pueblo alemán una de las grandes ambiciones en el sector manufacturero (Kagermann et al., 2013).

En 2013, el gobierno francés comenzó una estrategia llamada "La Nouvelle France Industrielle" con 34 iniciativas sectoriales como las prioridades de la política industrial de Francia (Conseil national de l'industrie, 2013). El gobierno de Singapur ha comprometido \$19 mil billones para su plan de investigación e innovación RIE 2020 (National Research Foundation, 2016). En 2013, el gobierno del Reino Unido presentó una imagen a largo plazo para su sector manufacturero hasta el año 2050 denominado "El futuro de la manufactura" (Foresight, 2013). El gobierno chino emitió la estrategia "Hecho en China 2025" junto con el plan "Internet Plus" en 2015 y esta estrategia da prioridad a diez campos del sector manufacturero para acelerar la informatización y la industrialización en China (Li & Lleytons, 2015).

La Comisión Europea lanzó la nueva Asociación Público-Privada (APP) en las fábricas del futuro (FOB) en 2014. Esta comisión está dentro del marco del programa Horizonte 2020 que planea proporcionar casi 80 mil millones de euros en fondos durante 7 años (European Commission, 2016). En 2014, el gobierno de Corea del Sur anunció la "Innovación en la fabricación 3.0", que se priorizó en cuatro estrategias de propulsión y asignaciones para un nuevo salto de la fabricación coreana (Kang et al., 2016).

1.2. Planes industriales.

Desde el punto de vista de los planes industriales, AT&T, Cisco, General Electric, IBM e Intel fundaron el "Industrial Internet Consortium (ICC)" en 2014 para canalizar y coordinar las prioridades y las tecnologías habilitadoras de la industria de Internet (Evans & Annunziata, 2012). Mientras que otros proyectos relacionados con grandes empresas como Siemens, Hitachi, Bosch, Panasonic, Honeywell, Mitsubishi Electric, ABB, Schneider Electric y Emerson Electric también han realizado grandes inversiones en proyectos relacionados con IoT y CPS. Estas organizaciones han hecho de la cuarta revolución industrial uno de los temas más discutidos en muchas conferencias, foros y exposiciones de fabricación en los últimos años. Mientras tanto, un número creciente de centros de investigación, universidades y empresas también han participado y contribuido a este nuevo desafío a través de experimentos de laboratorio o aplicaciones industriales. Al observar todas estas contribuciones desde

el mundo académico y la industria, se pueden encontrar intereses de investigación que la mayoría de ellos se enfocaron en revisar o estudiar un dominio. Como, por ejemplo, las tecnologías en la nube (Zhan et al., 2015), las redes inalámbricas industriales (Li et al., 2015), las tecnologías de integración (Thomas et al., 2016), la ingeniería virtual (Shafiq et al., 2015), los sistemas de información (Haddara & Elragal, 2015), la prestación de servicios (Rennung et al., 2016) y tecnologías basadas en agentes (Adeyeri et al., 2015).

Uno de los elementos de la industria 4.0 es el IoT (Internet de las cosas) que ha favorecido una mejor calidad de la fluidez en los datos e información con la intervención de sensores de movimiento, cintas transportadoras, bases de datos, información de control de procesos en tiempo real y que cada uno de los elementos del sistema de producción a cumplir con los procedimientos de la organización en la entrega final del producto (Tiwari et al., 2018). Otra intervención que ha tenido la industria 4.0 es en áreas de cadenas de suministro que presentan modelos uniformes de información donde cada una de las personas involucradas en el proceso puede recopilar y procesar toda la información involucrada en el proceso de producción para tener una mejor planificación de la producción y estar más centrado en otras áreas para una mejor toma de decisiones (Grieco et al., 2017).

También conjuntamente en áreas de interés, planificación, estrategias y objetivos entre servicios al consumidor y optimización de procesos (López, 2016). Desarrollando una planificación y programación que permita la mejor toma de decisiones y automatización, generando y seleccionando a través de diferentes escenarios con el uso de métodos estadísticos en diferentes condiciones para hacer que la toma de decisiones sea más sólida (Caricato & Grieco, 2017). Vale la pena mencionar que la capacitación continua en trabajadores involucrados en un proceso de fabricación debe pasar por las siguientes áreas de capacitación: didáctica, integradora e ingeniería, para el desarrollo de factores de aprendizaje. Un proceso de transformación adecuado y la intervención de la Industria 4.0 se reforzarán hacia una mejora continua en las áreas de ingeniería (Baena et al., 2017).

Actualmente tenemos conocimiento sobre los elementos de la industria 4.0 y cómo funciona cada uno de ellos. Sin embargo, es muy importante contar con un instrumento que pueda determinar el grado de madurez o las condiciones en que se encuentra cualquier organización, no solo para conocer las necesidades sino también para tomar las mejores decisiones e implementar estrategias hacia una mejora continua orientada a la industria 4.0 (Pozo, 2016).

2. Esquema conceptual, variables e hipótesis de investigación.

En este apartado se detallan los conceptos de las variables de estudio como la hipótesis a comprobar para la valoración, por parte de los usuarios, del modelo de relación y colaboración (MRC), así como su relación con los procesos de digitalización (ProDig). Esto implica la definición de las variables incluidas en el instrumento, así como la relación causal (teórica) a comprobar.

2.1 Modelo de relación y colaboración (MRC).

Esta variable está relacionada con la motivación y relación laboral no solo interna sino también externamente como lo son los proveedores, clientes, entidades financieras, etc. La salud es uno de los derechos fundamentales para todo ser humano y es considerado un factor insustituible que influye en el bienestar social, el desarrollo y la economía (Organización Mundial de la Salud, 2013). El analizar esta variable se obtiene información útil para la mejora continua en las condiciones laborales y los estándares de calidad en salud (Jiménez, 2004). Las hipótesis propuestas implican la valoración del modelo de relación y colaboración y los procesos de digitalización.

H_{0a}: La valoración del modelo de relación y colaboración no tiene un efecto positivo en los procesos de digitalización.

H_{1a}: La valoración del modelo de relación y colaboración tiene un efecto positivo en los procesos de digitalización.

2.1.1. Habilidades y competencias profesionales (ComProf)

El entorno social y laboral influido por la revolución del nuevo conocimiento y el desarrollo de las nuevas tecnologías de informática y la comunicación ha llevado a la necesidad de estrechar la brecha hacia el mundo del trabajo (Tunning, 2007).

La UNESCO define competencia como la relación de comportamientos socio-afectivos y habilidades cognoscitivas, psicológicas, sensoriales y motoras que permiten llevar a cabo un desempeño, una función, una actividad o tarea. Desde esta perspectiva, lo importante no es la posesión de determinados conocimientos, sino el uso que se haga de ellos (Verdejo, 2006). Este criterio obliga a las organizaciones a replantear lo que comúnmente han considerado como formación.

2.1.2. Formación digital (Fdig)

De acuerdo con CAE Innovative Learning Solutions (2019) un 78% de las empresas prevé invertir en formación digital en los próximos años. Sin embargo, uno de los inconvenientes con los que las empresas se enfrentan a la hora de considerar implantar la formación digital en su empresa, es el coste. Pero lo que muchas empresas olvidan es que, gracias a la formación digital, la empresa recibe un mayor retorno de inversión, por lo que invertir en la formación digital de sus empleados genera grandes beneficios.

La tecnología de la formación e-learning permite una pedagogía más variada, tanto por los dispositivos como por los recursos de formación. Aprender a explotar todas las posibilidades disponibles supone, sin duda, una aculturación y, por consiguiente, un cambio considerable en la conducta de los departamentos de formación (CAE-Innovate Learning Solutions).

2.1.3. Procesos de digitalización (ProDig)

La digitalización trata de las relaciones entre las personas, y entre las empresas y sus clientes, que obliga a las empresas a reinventarse y a revisar la estrategia y el modelo de negocio desde la óptica del cliente. La transformación digital en una empresa tiene como propósito convertirla en un nuevo ente plenamente conectado con el ecosistema digital, que le permita actuar de manera más ágil y con el punto de mira centrado en el cliente de un modo inteligente. Este proceso exige, además, un gran esfuerzo interno en la gestión del cambio para abordar con éxito este reto (Ffh-Fundació factor humà, 2019).

En esta investigación se propone evaluar las variables independientes (causas) habilidades y competencias profesionales y formación digital, con respecto a la variable dependiente (consecuencias) procesos de digitalización, a través de las siguientes hipótesis:

H_{0b}: La valoración de las habilidades y competencias profesionales y formación digital no tiene un efecto positivo en los procesos de digitalización.

H_{1b}: La valoración de las habilidades y competencias profesionales y formación digital tiene un efecto positivo en los procesos de digitalización.

3. Metodología.

Para analizar el modelo conceptual propuesto, se emplearon técnicas como la prueba de fiabilidad de alfa de Cronbach que permite estimar la fiabilidad de un instrumento de medida a través de un conjunto de datos (Domínguez, 2012). La medida de la fiabilidad asume que los ítems medidos en escala tipo Likert miden una misma estructura y que están altamente correlacionadas (Matas, 2018; Welch & Comer, 1988). Cuanto más cerca se encuentre el valor alfa de 1, mayor es la consistencia interna de los ítems analizados. El software estadístico empleado para los cálculos fue XLSTAT versión 2014 y para la validación del instrumento se utilizó SPSS v.25 (Statistical Package for the Social Sciences) ya que este sistema puede evaluar las variables dependientes e independientes con relación al uso y aplicación de tablas cruzadas y comparación de éstas. También se realizó un análisis de escalamiento métrico (o no métrico) multidimensional (EMM) que es un procedimiento multivariado de interdependencia cuyo fin es la identificación de las distancias o disimilitud en una matriz de datos, así como su representación gráfica en un espacio de pocas dimensiones, reproduciendo lo más fielmente posible las proximidades al interior de la muestra. Cuando las distancias que se utilicen para el análisis sean euclidianas el método de escalamiento será métrico; cuando no sea así los métodos utilizados serán no métricos (Greenacre & Primicerio, 2013).

Los datos fueron recolectados de una muestra inicial de 20 personas ubicadas en la ciudad de Tampico, Tamaulipas (México), que manifestaron estar familiarizados con los procesos internos de la organización a la que pertenecen. La muestra fue seleccionada aleatoriamente aplicando un muestreo por conglomerados, teniendo en cuenta la ubicación de las organizaciones. La consulta fue realizada mediante una entrevista semiestructurada que presenta un mayor grado de flexibilidad que las estructuradas (Tabla 1), ya que comienzan con preguntas planificadas, que se pueden adaptar a los entrevistados. Su ventaja es la posibilidad de adoptar sujetos con enormes posibilidades para motivar al interlocutor, aclarar términos, identificar ambigüedades y reducir formalidades (Díaz et al., 2013).

Tabla 1. Fases de la entrevista.

Primera fase: Preparación		
Recopilación de información	Planificación de la entrevista	Preparación de la cita
Segunda fase: Apertura		
Hacer explícito: razón, confidencialidad y duración	Acordar los propósitos y condiciones	
Tercera fase: Desarrollo		
Intercambio de información	Identificación de puntos de acuerdo	
Cuarta fase: Cierre		
Obtener conclusiones explícitas	Realizar resumen	

Fuente: Elaboración propia.

El instrumento fue diseñado a través de un análisis de los elementos que intervienen en la industria 4.0 hacia las organizaciones. Se estructuraron 16 aspectos a evaluar, distribuidas en forma secuencial en el instrumento, agrupadas por factores (Tabla 2).

El modelo completo se puede observar las variables (P1 a P16). Por cada pregunta, los encuestados podrían expresar su opinión a través de una escala tipo Likert de 7 puntos, donde 1 equivale

a totalmente en desacuerdo y 7 totalmente de acuerdo. En orden a probar la consistencia interna del instrumento a través de los constructos o factores, se empleó el coeficiente de Alfa de Cronbach, arrojando como resultado un valor mínimo de 0,82, superando el valor mínimo recomendado de 0,7 (Darren & Mallery, 2003).

Tabla 2. Aspectos a evaluar y variables relacionadas con el instrumento de medición.

Factor	Pregunta	Aspecto a evaluar
Modelo de relación y colaboración (MRC)	P1	Grado de motivación de los empleados hacia la transformación a la industria 4.0
	P2	Colaboración entre departamentos para la generación de oportunidades y eficiencia de las tecnologías
	P3	Relación de la organización con otros agentes (proveedores, clientes, entidades financieras universidades, etc.)
Habilidades y competencias profesionales (ComProf)	P4	Habilidades y competencias de los empleados
	P5	Habilidades y competencias digitales en relación a la industria 4.0
	P6	Dificultades existentes en los empleados respecto al uso de las tecnologías en su desempeño laboral
Formación digital (Fdig)	P7	Inclusión de la formación digital sobre la industria 4.0 en su organización
	P8	Grado de formación actual de los empleados de acuerdo a las necesidades de la industria 4.0
	P9	Inversión en formación digital en su organización relacionado con la industria 4.0
Procesos de digitalización (ProDig)	P10	Nivel de digitalización de los procesos de la organización
	P11	Nivel de uso de habilitadores (conexión internet, apps, robótica, impresión 3D, icloud, base de datos, otros)
	P12	Herramientas digitales que generen flexibilidad en los procesos productivos
	P13	Capacidad de la infraestructura tecnológica
	P14	Información en tiempo real de los sistemas de información
	P15	Grado de trazabilidad de la información
	P16	Calidad de la información generada por los sistemas de información

Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados.

4.1. Descripción de los datos.

El factor de procesos de digitalización en las organizaciones (P13 y P16) son los resultados promedios más altos que hacen referencia a la infraestructura tecnológica y calidad de la información generada por los sistemas de información con un promedio de 5,0 puntos. La puntuación más baja se obtuvo en el aspecto de las dificultades existentes en los empleados respecto al uso de las tecnologías en su desempeño laboral (P6) con una media de 3,8. Los resultados descriptivos de las variables observables se registran en la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción de datos.

Variable Observable	Media	Desviación Estándar
P1	4,6	0,57
P2	4,5	0,60
P3	4,3	0,77
P4	4,7	0,86
P5	4,5	0,99
P6	3,8	1,19
P7	4,1	0,83
P8	4,5	0,67
P9	4,1	0,71
P10	4,6	0,65
P11	4,2	0,75
P12	4,3	1,37
P13	5,0	0,00
P14	4,1	1,3
P15	4,0	1,20
P16	5,0	0,51

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Fiabilidad y validez del instrumento.

El modelo o esquema propuesto de tipo reflectivo presenta niveles satisfactorios de validez y fiabilidad (Prieto & Delgado, 2010; Vizcaíno et al., 2014). Los constructos mantienen características de homogeneidad y unidimensionalidad mediante la prueba de análisis de factor con rotación de tipo *varimax* que se encarga de considerar el aumento de la varianza de las cargas factoriales al cuadrado de cada factor y que los resultados de las cargas tiendan a acercarse a 1 y mientras que otras se aproximan a 0, se obtienen una pertenencia más clara e inteligible de cada variable al factor. Para la validez -convergente-, se calculó la varianza promedio extraída (o AVE, por *Average Variance Extracted*) por constructo, obteniendo valores superiores a 0,66, estando por encima de 0,5, que es el valor mínimo recomendado mostrado en la tabla 4 (Hair et al., 2016; Monteiro et al., 2016).

Tabla 4. Matriz de rotación Varimax y AVE por constructo.

Factor	Matriz de componente rotado (<i>Varimax</i>)	AVE
Modelo de relación y colaboración (MRC)	0,88	0,66
Habilidades y competencias profesionales (ComProf)	0,68	0,74
Formación Digital (Fdig)	0,77	0,69
Procesos de digitalización (proDig)	0,66	0,72

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la estimación del factor de inflación de la varianza (o VIF, por *Variance Inflation Factor*) indica que no existe multicolinealidad entre pares de constructos o factores independientes (véase Tabla 5), obteniendo un valor máximo de 1,98 (Chen, 2012; Montgomery, 2011).

Tabla 5. Tolerancia y VIF por constructo.

Factor	Tolerancia	VIF
Modelo de relación y colaboración (MRC)	0,53	1,87
Habilidades y competencias profesionales (ComProf)	0,50	1,98
Formación digital (Fdig)	0,72	1,38

Fuente: Elaboración propia.

Por último, la validez discriminante aplicada al modelo de cada constructo es independiente de los otros constructos, excepto de aquél que es teóricamente asociado en el esquema propuesto (Henseler et al., 2015), comparando cada coeficiente de regresión y carga o efecto individual con los efectos cruzados de cada variable observada para los demás constructos (Tabla 6).

Tabla 6. Matriz de efectos cruzados.

	MRC	ComProf	FDig	ProDig
P1	0,927	-0,682	-0,254	0,762
P2	0,181	0,040	-0,126	0,148
P3	0,337	-0,540	-0,044	0,277
P4	0,387	-0,262	-0,057	0,208
P5	0,711	-0,785	-0,071	0,626
P6	-0,461	0,923	0,205	-0,735
P7	-0,050	0,252	0,432	-0,261
P8	0,238	0,104	-0,441	0,266
P9	-0,062	-0,098	-0,228	0,138
P10	0,051	-0,341	0,363	0,013
P11	-0,046	-0,177	0,139	-0,004
P12	0,341	-0,261	-0,579	0,532
P13	0,094	-0,192	0,471	-0,083
P14	0,582	-0,350	-0,490	0,640
P15	-0,330	0,622	0,304	-0,566
P16	0,428	-0,727	0,288	0,391

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis del modelo estructural.

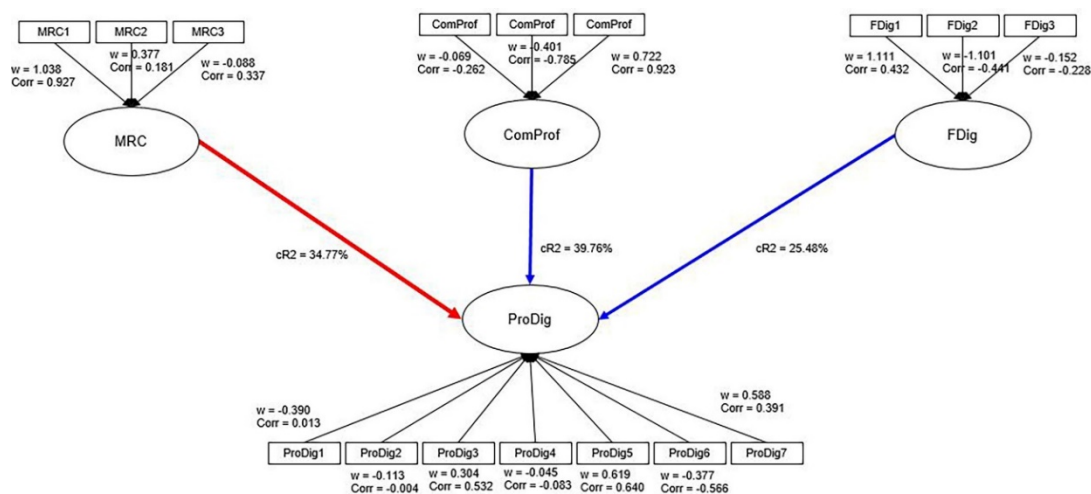
En la tabla 7 se pueden observar los pesos externos y las correlaciones se agrupan en dos tablas grandes. Si estudiamos las correlaciones entre las variables manifiestas y las variables latentes, podemos observar que las variables manifiestas MRC1 tienen un mayor efecto sobre el modelo de relación y colaboración que MRC2 y MRC3. Esta tabla permite ver el impacto de cada variable manifiesta asociada en su variable latente asociada. En la figura 1, se muestra el diagrama con los coeficientes por ruta y las varianzas explicadas.

Tabla 7. Modelo externo de variables latentes.

Variable latente	Variables manifiestas	Peso externo	Correlación de cargas estandarizadas	Límite inferior	Límite superior
MRC	MRC1	1,038	0,927	-1,526	1,563
	MRC2	0,377	0,181	-1,078	1,255
	MRC3	-0,088	0,337	-1,302	2,298
ComProf	ComProf1	-0,069	-0,262	-1,320	1,109
	ComProf2	-0,401	-0,785	-1,657	1,486
	ComProf3	0,722	0,923	-0,816	1,661
FDig	FDig1	1,111	0,432	-1,328	2,144
	FDig2	-1,101	-0,441	-2,736	2,745
	FDig3	-0,152	-0,228	-1,756	0,951
ProDig	ProDig1	-0,390	0,013	-34,659	11,198
	ProDig2	-0,113	-0,004	-17,901	28,416
	ProDig3	0,304	0,532	-42,657	50,752
	ProDig4	-0,045	-0,083	-4,674	15,793
	ProDig5	0,619	0,640	-69,899	51,496
	ProDig6	-0,377	-0,566	-15,083	8,516
	ProDig7	0,588	0,391	-6,261	12,274

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Diagrama de coeficientes y varianzas explicadas.



Fuente: Elaboración propia.

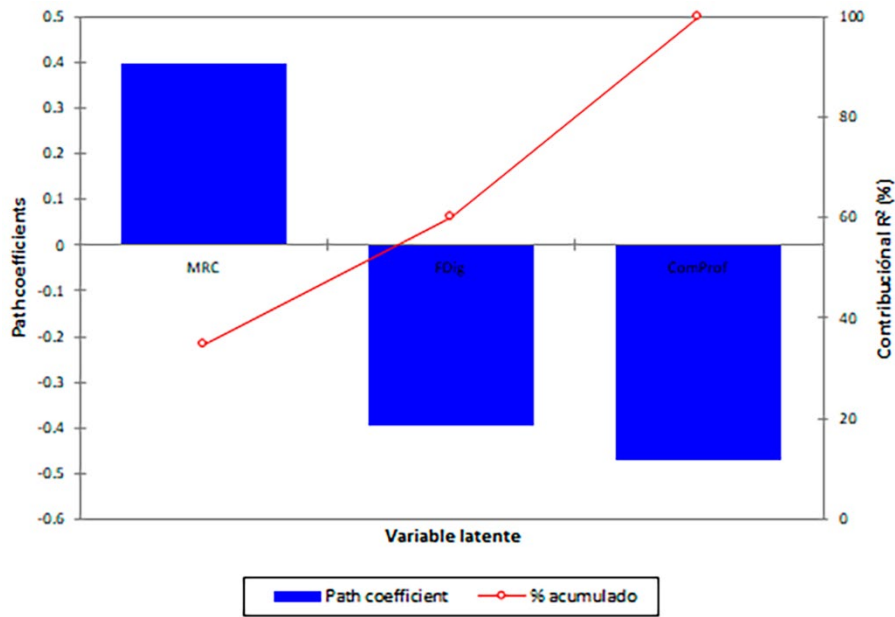
Por último, en este trabajo se realizó un resumen de resultados (Tabla 8) que muestra los valores percibidos y el porcentaje de contribución al R² de la variable de procesos de digitalización.

Tabla 8. Impacto y contribución de las variables a procesos de digitalización.

Indicador	MRC	FDig	ComProf
Correlación	0,822	-0,603	-0,797
Path coefficient	0,397	-0,397	-0,469
Correlación * Coeficiente	0,326	0,239	0,373
Contribución al R ² (%)	34,765	25,476	39,759
% acumulado	34,765	60,241	100,000

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Diagrama de coeficientes y varianzas explicadas.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 la variable MRC se relaciona de forma positiva con la variable de procesos de digitalización. La variable fDig y ComProf tienen una relación negativa con la variable de procesos de digitalización y es debido a que la innovación y adopción de nuevos procesos digitales requieren que los niveles de formación y competencias profesionales aumenten de una manera rápida y que no se está realizando. El grado de motivación aumenta con el incremento en la digitalización de los procesos.

De acuerdo con los resultados, el modelo de relación y colaboración tuvo un efecto positivo en los procesos de digitalización, por tanto, se aceptó esta hipótesis, mientras que la valoración de las habilidades y competencias profesionales y formación digital no tuvo efecto positivo en los procesos de digitalización, rechazándose este planteamiento.

5. Discusión y conclusiones.

El objetivo principal del artículo se concentró en la valoración, por parte de los usuarios, de la satisfacción laboral respecto a los procesos de digitalización en las organizaciones a la que pertenecen en Tampico, Tamaulipas (México) a través de la aplicación de la técnica de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS), que permitiera identificar los factores determinantes de la satisfacción laboral y la digitalización. Para este estudio, se consideraron las variables *modelo de relación y colaboración, habilidades y competencias profesionales, formación digital y procesos de digitalización*.

Los resultados del modelo propuesto muestran que existe una relación de medias entre el aspecto de infraestructura tecnológica y el de calidad de la información generada por los sistemas de información. También se realizó una matriz de rotación de tipo *varimax* para determinar el nivel de pertenencia de los factores y el cálculo de la varianza promedio extraída (AVE) donde el resultado de consistencia de constructo fue aceptado.

Por otra parte, la estimación del factor de inflación de la varianza (o VIF, por *Variance Inflation Factor*) indica que no existe multicolinealidad entre pares de constructos o factores independientes.

Por último, es necesario tener en cuenta que, para este tipo de estudios, deben considerarse las limitaciones de aceptabilidad por parte de las organizaciones ya que algunas presentan desconocimiento

sobre los elementos que integran la industria 4.0 y es necesario aplicar el instrumento a personas que cuenten con años de experiencia laboral y que estén completamente relacionados con los procesos industriales y digitales de su organización. Se propone para investigaciones futuras la inclusión de nuevos elementos relacionados con la industria 4.0 en el ámbito de los negocios y cadena de valor para ir conociendo la perspectiva de las áreas gerenciales y su relación con otras organizaciones.

Las repercusiones de esta investigación relacionado con la industria 4.0 es que las organizaciones optimicen sus sistemas de fabricación, acorten el ciclo de desarrollo de nuevos productos, reduzcan los costos de fabricación y cuenten con procesos productivos totalmente integrados y automatizados, con máquinas capaces de autoadministrarse y mantenerse. Igualmente, la Industria 4.0 podría generar cambios en la fuerza laboral, requiriendo nuevas capacidades, aptitudes y roles, porque este concepto supone un cambio de mentalidad muy importante y una gran transformación en las empresas. Es importante no quedarse al margen porque la Cuarta Revolución Industrial supondrá una fuente de competitividad para las industrias occidentales tanto en costes de mano de obra, energía, así como en niveles de compromiso social.

Referencias

- Adeyeri, M., Mporu, K., & Tijani, O. (2015). Integration of Agent Technology into Manufacturing Enterprise. A Review and Platform for Industry 4.0. In 2015 *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, 110. Dubai: IEEE.
- Atzori, L., Antonio, L., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Journal Computer Networks*, 54(15), 2287-2805. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- Baena, F., Guarín, A., Mora, J., Sauza, J., & Retat, S. (2017). Learning Factory: The Path to Industry 4.0. *Journal Procedia Manufacturing*, 9, 73-80. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.022.
- Belvedere, V., Grando, A., & Bielli, P. (2013). A Quantitative Investigation of the Role of Information and Communication Technologies in the Implementation of a Product-service System. *International Journal of Production Research*, 51(2), 1-17. DOI: 10.1080/00207543.2011.648278.
- Cae-Innovative Learning Solutions. (2019). *¿Por qué invertir en la formación digital de sus empleados?* Nota descriptiva. Recuperado de <https://www.cae.net/es/ventajas-de-la-formacion-digital>.
- Caricato, P., & Grieco, A. (2017). An application of Industry 4.0 to the production of packaging films. *Journal Procedia Manufacturing*, 11, 949-956. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.199.
- Chen, J. (2012). *Advances in Hospitality and Leisure (volume 15)*. USA: Advances in Hospitality and Leisure.
- Consell national de l'industrie. (2013). *The New Face of Industry in France*. Paris: French National Industry Council.
- Darren, G., & Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference. 11.0 update (4 ed.)*. Boston, MA: Allyn & Bacon.
- Díaz, L., Torruco, U., Mildred, M., & Varela M. (2013). La entrevista, recurso flexible y dinámico. *Revista de Investigación en Educación Médica*, 2(7), 162-167. DOI: 10.1016/S2007-5057(13)72706-6

- Domínguez, S. (2012). Propuesta para el cálculo de alfa ordinal y theta de armor. *Revista de investigación en Psicología*, 15(1), 213-217. DOI: 10.15381/rinvp.v15i1.3684.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or Hype? *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56-58. DOI: 10.1109/MIE.2014.2312079.
- European Commission. (2016). *Factories of the Future PPP: Towards Competitive EU Manufacturing*. Bruxelles: European Commission.
- Evans, P., & Annunziata, M. (2012). *Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines*. Boston, MA: General Electric.
- Ffh-Fundació factor humà (2019). *La digitalización acelera el cambio cultural*. Nota descriptiva. Recuperado de <https://factorhumana.org/es/actualitat/noticias/12711-articulo-de-opinion-la-digitalizacion-acelera-el-cambio-cultural>
- Foresight (2013). *The Future of Manufacturing: A New Era of Opportunity and Challenge for the UK*, London: UK Government Office for Science.
- Greenacre, M., & Primicerio, R. (2013). *Multivariate Analysis of Ecological Data*. Bilbao: Fundación BBVA.
- Grieco, A., Caricato, P., Gianfreda, D., Pesce, M., Rigon, V., Tregnaghi, L., & Voglino, A. (2017). An Industry 4.0 case study in fashion manufacturing. *Journal Procedia Manufacturing*, 11, 871-877. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.190.
- Haddara, M., & Elragal, A. (2015). The Readiness of ERP Systems for the Factory of the Future. *Journal Procedia Computer Science*, 74, 721-728. DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.598.
- Hair, J., Hult, G., Ringle, C., & Sarstedt, M. (2016). *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*, (2ed). Nueva York: SAGE Publications.
- Henseler, J., Ringle, C., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 43(1), 115-135. DOI: 10.1007/s11747-014-0403-8.
- Jiménez, R. (2004). Indicadores de calidad y eficiencia de los servicios hospitalarios. Una mirada actual. *Revista Cubana de Salud Pública*, 30(1), 17-36.
- Kagermann, H., Wolfgang, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*. Berlin: Industrie 4.0, Working Group of Acatech.
- Kang, H.S., Lee, J.Y., & Kim, H. (2016). Smart Manufacturing: Past Research, Present Findings, and Future Directions, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3, 111-128. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>.
- Khaitan, S., & McCalley, J. (2015). Design Techniques and Applications of Cyberphysical Systems: A Survey. *IEEE Systems Journal*, 9(2), 1-16. DOI: 10.1109/JSYST.2014.2322503.
- Li, K., & Lleytons. (2015). *Made in China 2025*. Beijing: State Council of China.

- Li, X., Di, L., Jiafu, W., Vasilakos, A., Lai, C., & Wang, S. (2015). A Review of Industrial Wireless Networks in the Context of Industry 4.0, *Journal Wireless Networks*, 23, 23-41. DOI: 10.1007/s11276-015-1133-7.
- López, D. (2016). *Análisis de Casos de Estudio sobre Industria 4.0 y Clasificación según Sectores de Actividad y Departamentos Empresariales*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Matas, A. (2018). Diseño del formato de escalas tipo Likert: un estado de la cuestión. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 20(1), 38-49. DOI: <https://doi.org/10.24320/redie.2018.20.1.1347>
- Maynard, A. (2015). Navigating the Fourth Industrial Revolution. *Journal Nature Nanotechnology*, 10(12), 1005-1006. DOI: 10.1038/nnano.2015.286.
- Monteiro, D., Marinho, D., Moutao, J., Couto, N., Antunes, R., & Cid, L. (2016). Adaptation and validation of the Portuguese version of Basic Psychological Needs Exercise Scale (BPNEsP) to the sport domain and invariance across football and swimming. *Journal Motricidade*, 12(4), 51-61. DOI: 10.6063/motricidade.9372.
- Montgomery, V. (2011). *Introducción al análisis de regresión lineal*. (3ed). México. Editorial Patria.
- National Research Foundation. (2016). *Research, Innovation and Enterprise (RIE) 2015*. Singapore: Prime Minister's Office of Singapore.
- Organización Mundial de la Salud (2013). *Derecho a la salud*. Nota descriptiva n.23 [consultado 01 de abril 2019]. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs323/es/>
- Pozo, M. (2016). *4 herramientas para dar paso a la industria 4.0*. Recuperado de <https://ciudadesdelfuturo.es/4-herramientas-digitales-industria-4-0.php>.
- Prieto, G., & Delgado, A. (2010). Fiabilidad y Validez. *Revista Papeles del Psicólogo*, 31(1), 67-74. DOI: 10.4067/S0718-09342002005100014.
- Reif, R., Liveris, A., & Ann, S. (2014). *Report To The President Accelerating U.S. Advanced Manufacturing*. Washington, DC: The President's Council of Advisors on Science and Technology.
- Rennung, F., Luminosu, C., & Draghici, A. (2016). Service Provision in the Framework of Industry 4.0. *Journal Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 221, 372-377. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.05.127.
- Ridgway, K., Clegg, C., Williams, D., & Hourd, P. (2013). *The Factory of the Future*. London: Government Office for Science.
- Shafiq, S.Y., Sanim, C., Szczerbicki, E., & Toro, C. (2015). Virtual Engineering Object/Virtual Engineering Process: A specialized form of Cyber Physical System for Industrie 4.0. *Journal Procedia Computer Science*, 60(1), 1146-1155. DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.166.
- Thomas, B., Riedl, M., Thron, M., & Diedrich, C. (2016). Integration of Classical Components into Industrial Cyber-Physical Systems. *Journal Proceedings of the IEEE*, 104(5), 947-959. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2510981.

- Tiwari, S., Wee, H., & Daryanto, Y. (2018). Big data analytics in supply chain management between 2010 and 2016: Insights to industries. *Journal Computers & Industrial Engineering*, *115*, 319-330. DOI: 10.1016/j.cie.2017.11.017.
- Tunning. (2007). *Reflexiones y perspectivas de la educación superior en América Latina. Informe final. Proyecto Tunning-America Latina*. España, Bilbao: Universidad de Deusto, Universidad de Groningen.
- Verdejo, P. (2006). *Modelo para la educación y evaluación por competencias (MECO), Aseguramiento de la Calidad en la Educación y en el Trabajo*, 155-195. Editorial: Universidad Autónoma de Baja California, México.
- Vizcaíno, A., Manzano, M., & Casas, G. (2015). Validez de constructo y confiabilidad del cuestionario de creencias epistemológicas sobre las matemáticas en alumnos de secundaria básica. *Revista Colombiana de Psicología*, *24*(2), 301-316. DOI: 10.15446/rcp.v24n2.43974.
- Welch, S., & Comer, J. (2018). *Quantitative Methods for Public Administration: Techniques and Applications*. USA: Editorial Waveland Pr Inc.
- Zhan, Z., Xiao, L., Yue, G., Jun, Z., Henry, S., & Yun, L. (2015). Cloud Computing Resource Scheduling and a Survey of Its Evolutionary Approaches, *Journal ACM Computing Surveys*, *47*(4), 1-33. DOI: 10.1145/2788397.

Sovereign bond spreads and CDS premia in the Eurozone: A causality analysis

TÉLLEZ VALLE, CECILIA

Department of Financial Economics and Accounting, Pablo de Olavide University (Spain)
Correo electrónico: ctelval@upo.es

MARTÍN GARCÍA, MARGARITA

Department of Financial Economics and Accounting, Pablo de Olavide University
Correo electrónico: mmargar3@upo.es

RAMÓN-JERÓNIMO, MARÍA A.

Department of Business Administration and Marketing, Pablo de Olavide University
Correo electrónico: maramjer@upo.es

MARTÍN MARÍN, JOSÉ LUIS

Department of Financial Economics and Accounting, Pablo de Olavide University
Correo electrónico: jlmartin@upo.es

ABSTRACT

This article presents an analysis of the possible relationship between the spreads of sovereign bonds and the premia of credit default swaps (CDS) to determine whether they are useful tools for the measurement of the sovereign risk either separately or by taking into account the joint evolution of their values. The data refer to ten countries in the Eurozone along 2008–2016. By applying the causality Granger test for these variables, after six different ways of proxy, CDS premia are found to be the cause of the risk spreads in certain cases, although a bidirectional relationship is predominant in many other cases. So the CDS market contains clear and highly useful information on the sovereign risk.

Keywords: sovereign risk, credit risk, CDS, causality.

JEL classification: G150; H630.

MSC2010: 62P20; 91B30; 91B84.

Diferenciales de bonos soberanos y primas de CDS en la zona euro: un análisis de causalidad

RESUMEN

Este artículo presenta un análisis de la posible relación existente entre los diferenciales de los bonos soberanos y las primas de las permutas financieras de riesgo de impago (CDS, Credit Default Swap), con el objeto de determinar si son herramientas útiles para la medida del riesgo soberano de forma separada o teniendo en cuenta ambas variables. Se toman datos de 10 países de la Eurozona para el periodo 2008-2016. Aplicando el test de causalidad de Granger para esas variables, después de utilizar seis formas distintas de comparación de diferenciales, se concluye que la prima del CDS causa el diferencial de riesgo de crédito en suficientes ocasiones, aunque predomina una relación bidireccional. Así que el mercado de CDS contiene información clara y útil para la evolución del riesgo soberano.

Palabras clave: riesgo soberano, riesgo de crédito, CDS, causalidad.

Clasificación JEL: G150; H630.

MSC2010: 62P20; 91B30; 91B84.



1. Introduction.

Our objective in this paper is to estimate the equilibrium relationships that may exist between the spreads of sovereign bonds and the premia of credit default swaps (CDS). Two specific questions are addressed: Do these two parameters converge in spite of the numerous frictions that arise in the market? Which provides the best measure of sovereign risk?

The main aim of this study is to analyse the degree of relationship between the spreads of the public debt and the CDS premia to determine whether they are useful tools for the measurement of sovereign risk either separately or by taking into account the joint evolution of their values. Data from ten European countries has been used as listed in the S&P/ISDA Eurozone Developed Nation Sovereign CDS Index. Of these ten countries, nine are analysed using the bonds and CDS of Germany as a benchmark.

The meaning of the term “sustainability of the sovereign debt of a country” is given from two different points of view. Firstly, from the point of view of the issuer, that is, from a specific public Treasury, this term refers to the fact that the debt service can be met, and the dreaded default can thereby be avoided. The ratio over GDP is taken as a measure of the volume of debt. These ratios are currently very high, such as those of Italy and Portugal, which exceed 100%.

Secondly, what is really important from the investors’ point of view is the volatility of returns, especially the possibility of default of the issuer and the sensitivity of the market to the business cycle. Therefore, if there is a CDS market parallel to the sovereign debt market, the investors are able to hedge the risk of default in the payment of interest and of the principal. The latter is particularly interesting when the issuers’ credit rating is low, whereby problems of insolvency are latent. Therefore, indirectly, a CDS market can help the sustainability of sovereign debt from the point of view of investors, because it ensures an interest in the corresponding issues. Other contributions on that issue include: Kim, Salem, and Wu (2015), who establish that market participants for sovereign credit protection pay more attention to good news than to bad news in times of financial instability; Zhang and Zhang (2013), whereby evidence is found for the efficiency of the CDS market during the 2008 financial crisis against those who argue that CDS could lead to a financial instability; Blommestein, Eijffinger, and Qian (2016), who study the main drivers of change in the sovereign CDS spreads and how their impact grows with market uncertainty; and Galariotis, Makrichoriti and Spyrou (2016), who show that this uncertainty varies from the European peripheral countries to the core countries.

Many econometric studies have been conducted to determine the equilibrium relationships between the spreads of bonds and CDS premia, by analysing whether or not the frictions in the market prevent their convergence. The majority of these studies are focused on the corporate level, with the aim being to analyse the behaviour of the basis between CDS and their underlying bond yield (see Hull & White 2004; Blanco, Brennan & Marsh 2005). There are other contributions in this area that use Gonzalo and Granger’s test (see Gonzalo & Granger, 1995), such as the studies of Zhu (2006) and Forte and Peña (2009). By focusing on the European corporate markets, Alexopoulou, Andersson and Georgescu (2009) reach the conclusion that a relationship exists between these two markets in the long term, while Arce, Mayordomo, and Peña (2011) show persistent deviations in the pre-crisis and post-crisis periods.

Looking in greater depth at the sovereign market, most contributions are related to emerging markets. Bond spreads are found by Ammer and Cai (2011) to be leaders in the price discovery process, although a study by Bowe, Klimaviciene and Taylor (2009) shows country dependence in the leadership role. By taking into account the European markets, Fontana and Scheicher (2010) and Fontana and Scheicher (2016) graphically study the relationship between CDS premia and spreads of sovereign bonds related to the 10-year swap rate for ten countries of the Eurozone from 2006 to 2010. These authors use this benchmark following the contribution of Beber, Brandt and Kavajecz (2009), arguing that interest-rate swaps are commonly seen as the market participants’ preferred measure of the risk-free rate. In conclusion, Fontana and Scheicher (2010) find the CDS spread to be situated above the bond spread,

and that, before the beginning of the crisis, bond spreads showed higher volatility. Furthermore, for these researchers, after 2008, the bond market had a predominant role in price discovery in core countries, whereas the CDS market led in the riskiest or most peripheral European countries, contrary to what was found by Delatte, Gex and López-Villavicencio (2012).

Several other contributions are focused on the evidence of contagion between countries, such as Broto and Pérez-Quirós (2015), Gómez-Puig and Sosvilla-Rivero (2014), and Muratori (2015). On the other hand, Ngene, Carley and Hassan (2014) explain how sovereign markets may suffer from structural breaks and from the persistence of volatility in the series of bonds and CDS. Moreover, Arce et al. (2011) and Arce, Mayordomo and Peña (2013), by following Hasbrouck (2016) and Gonzalo and Granger’s methodologies (see Gonzalo and Granger, 1995), study whether the markets for five-year sovereign bond spreads and CDS spreads reflect the same information. The same relationship is analysed by Broto and Pérez- Quirós (2011) between CDS and bonds for ten countries, including some of the Eurozone and the US, the UK and Japan. In this paper, the spread of the sovereign bond is measured against the 10-year interest rate of the German bond and the cointegrated markets of Spain, Greece, Ireland, Italy and Portugal are considered. By employing the Granger causality test, Delis and Mylonidis (2011) discover a dynamic interrelation in both directions for CDS and bonds in the period 2004-2010 for Greece, Italy, Portugal and Spain, while Palladini and Portes (2011) find CDS markets to be the leaders in the period 2004-2011 in Austria, Belgium, Ireland, Italy and Portugal, but in Greece, bond spreads were the leaders. Moreover, Martín-García, Téllez-Valle, and Martín-Marín (2014b) study the relationship between the premia of 10-year CDS and bond spreads, calculated as the difference with the 10-year German bond, for a set of countries in the Eurozone, the UK, Japan and Latin America, and they show CDS to be the leading market. For a good approach to the sector of sovereign CDS, readers are referred to the report of the International Monetary Fund (see IMF 2013).

2. Materials and Methods.

In this section, a brief description is provided of the markets involved and of the data used in the study.

Before starting the empirical study, a graphical analysis of the two variables is undertaken with a view to determining whether there is any possible correlation between them. The countries to be considered are: France, Germany, Italy, Spain, Belgium, the Netherlands, Austria, Finland, Ireland and Portugal, as stated in Table 1.

Table 1. S&P/ISDA Eurozone Developed Nation Sovereign CDS Index.

Constituents	Weights (%)	S&P Ratings
France	23	AA
Germany	22	AAA
Italy	22	BBB
Spain	11	BBB
Belgium	7	AA
Netherlands	6	AAA
Austria	4	AA+
Finland	2	AA+
Ireland	2	A+
Portugal	1	BBB-

Source: ISDA and S&P. Weight index data (March 2012), S&P data (January 2018).

The CDS premia are obtained using daily data from January 2008 to September 2016 derived from the Thomson Reuters Datastream database. The maturity terms of these contracts are 10 and five

years. The market for five-year CDS is more active and therefore more liquid and efficient. The data obtained is not continuous: there are certain periods for which there is no information. This discontinuity is a consequence of the lack of transparency of this market, which is not organized or over-the-counter (OTC).

The market of sovereign CDS in the Eurozone has several particular features. First of all, the contracts are mainly denominated in US dollars. At first sight, this may appear surprising, but there is a reason: in the case of default of any given country, the euro could be depreciated and thus it is safer to maintain a position in US dollars. Second, the most liquid segment of the market is related to five-year contracts followed by 10-year contracts, as noted earlier. For this reason, many of the academic studies on sovereign CDS are based on the five-year tender.

A problem that has recently arisen is the ban imposed by the EU on the issue and trading of naked sovereign CDS, that is, when the protection buyer does not own the underlying bond. This ban, which aims to reduce speculation in the market, has been questioned by both practitioners and academics. From Table 2, which shows data for Spain and France, it can clearly be seen that after the EU announcement on banning naked sovereign CDS (October 2011) and putting the ban into effect (November 2012), activity in the market diminished strongly. For example, in the case of Spain, from a weekly notional average of US\$1,500 million and 90 trades per day in the second quarter of 2011, negotiations dropped to US\$150 million and 10 trades per day in the third quarter of 2014. Thus, lack of liquidity in the market has been one of the effects of the ban on naked CDS, a prohibition also strongly opposed by the IMF. Now, the question is: where did Europe's sovereign CDS trading go? The answer is: to emerging markets (see Ruffoni, 2014).

Table 2. Activity in the sovereign CDS market (2009–2014): Spain and France.

Quarters	Spain		France	
	Average daily notional value (US\$ EQ)	Average number trades/day	Average daily notional value (US\$ EQ)	Average number trades/day
20/06/2009–19/03/2010	500,000,000	26	200,000,000	7
22/03/2010–20/06/2010	500,000,000	34	275,000,000	13
21/06/2010–19/09/2010	500,000,000	34	275,000,000	13
20/09/2010–19/12/2010	924,066,884	52	533,461,972	33
20/12/2010–20/03/2011	1,000,000,000	70	575,000,000	34
21/03/2011–19/06/2011	1,500,000,000	90	550,000,000	24
20/06/2011–19/09/2011	1,075,000,000	87	1,325,000,000	102
20/09/2011–19/12/2011	950,000,000	77	1,600,000,000	116
20/12/2011–19/03/2012	775,000,000	55	775,000,000	46
20/03/2012–19/06/2012	975,000,000	75	950,000,000	58
20/06/2012–19/09/2012	850,000,000	68	825,000,000	51
20/09/2012–19/12/2012	850,000,000	67	925,000,000	50
20/12/2012–19/03/2013	425,000,000	27	350,000,000	22
20/03/2013–19/06/2013	500,000,000	33	400,000,000	18
20/06/2013–19/09/2013	1,025,000,000	38	875,000,000	23
20/09/2013–19/12/2013	675,000,000	35	575,000,000	20
20/12/2013–19/03/2014	400,000,000	23	250,000,000	10
20/03/2014–19/06/2014	275,000,000	12	850,000,000	15
20/06/2014–21/09/2014	150,000,000	10	150,000,000	7

Note: The transactions covered include only those that suppose market risk transfer activity.

Source: DTCC Trade Information Warehouse.

Three inputs are employed to calculate the spread of the bonds. In relative terms, the difference is taken between the yield of bonds with a term to maturity of 10 and five years and that of the German bond or bund; the premium of the CDS of the German bond is then added, in absolute terms, to the spread of the bond in question, with the aim of approximating the price of a notional risk-free asset. The formula is therefore as follows:

Spread of the bond of country A = (the interest rate of the 10- or 5-year bond of country A, minus the interest rate of the 10- or 5-year German bond), plus the 10- or 5-year German CDS.

This last approach is suggested by Arce et al. (2011) and by Fontana and Scheicher (2016) who call this method of calculus “adjusted basis”. Other authors use different alternatives when calculating bond spreads and CDS premia, such as Arce et al. (2011), who employ the differential between the five-year bond yields and the yield of the German bond of the same maturity. Accordingly, they estimate the premia of five-year CDS. In this paper, the swap curve is also used in euros of ten and five years against the six-month LIBOR. This latter solution is that adopted by Fontana and Scheicher (2010), despite being criticized by other authors, such as Arce et al. (2011). In fact, those authors use the spread between the 10-year bond yield and the 10-year swap rate because the swap curve may be a good measure of the risk-free rate in the opinion of many market participants. In contrast, Broto and Pérez-Quirós (2011) make use of the 10-year bonds and the German bond of the same maturity for the calculation of the spreads. As for the CDS, they employ the 10-year contracts but also denominated in US dollars. Accordingly, Martín, Téllez and Martín (2014) assume the same criterion as that of Broto and Pérez-Quirós (2011) when calculating the spreads and use the 10-year term for both CDS (in US dollars) and bonds. The various ways of calculating the bond spreads and the CDS premia make it difficult to compare the results of studies on the risk of sovereign bonds. In short, the following calculations are carried out:

1. Bond spread of the country is calculated versus the yield of the 10-year German bond; 10-year CDS premia of the country in US dollars (relative approach).
2. Bond spread of the country is calculated versus the yield of the 10-year German bond plus the premium of the German 10-year CDS; 10-year CDS premia of the country in US dollars (absolute approach).
3. Bond spread of the country is calculated versus the yield of the 5-year German bond; 5-year CDS premia of the country in US dollars (relative approach).
4. Bond spread of the country is calculated versus the yield of the 5-year German bond plus the premium of the German 5-year CDS; 5-year CDS premia of the country in US dollars (absolute approach).
5. Bond spread of the country is calculated versus the 10-year swap EUR LIBOR; 10-year CDS premia of the country in US dollars.
6. Bond spread of the country is calculated versus the 5-year swap EUR LIBOR; 5-year CDS premia of the country in US dollars.

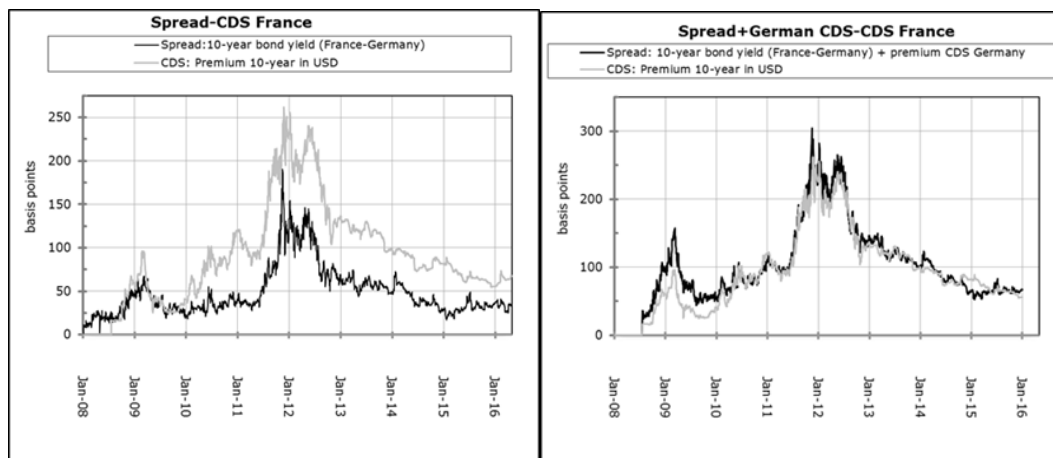
3. Results.

As stated in the previous section, we propose six different ways of calculating sovereign bond spreads. This section is divided into three stages. First both the individual characteristics of each CDS and spread series and their graphical analysis is studied, and then the Granger causality between the two variables can be tested.

3.1. Graphical analysis.

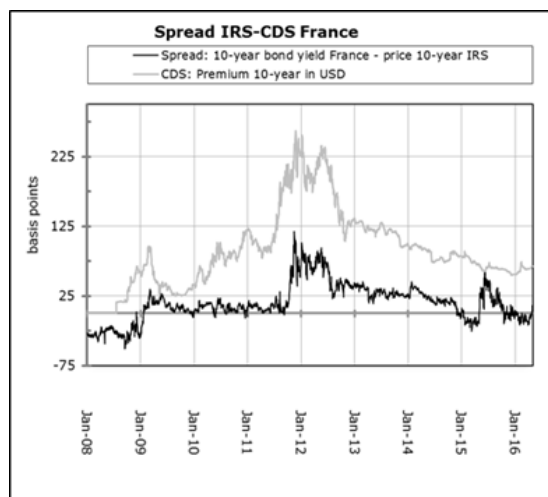
Figures 1 to 4 show the evolution of the CDS premia and the spreads of the 10- and 5-year bonds of public debt for two of the selected countries, Spain and France, using the three aforementioned approaches, as examples. The degree of positive correlation between these two markets can be deduced from these graphs; that is, the extent to which the two variables grow in the same direction.

Figure 1. CDS premia and Sovereign Bond Spread (France 10-year term): (a) Spread of 10-year bond versus CDS premium 10-year bond in USD; (b) Spread of 10-year bond plus premium CDS German Bond versus CDS premium 10-year bond in USD; (c) Yield of 10-year bond minus price 10-year IRS versus CDS premium 10-year bond in USD.



(a)

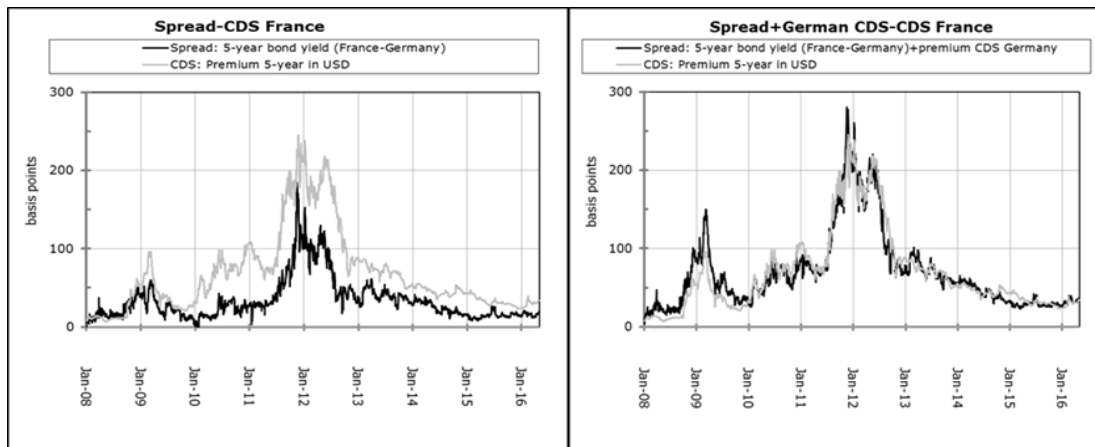
(b)



(c)

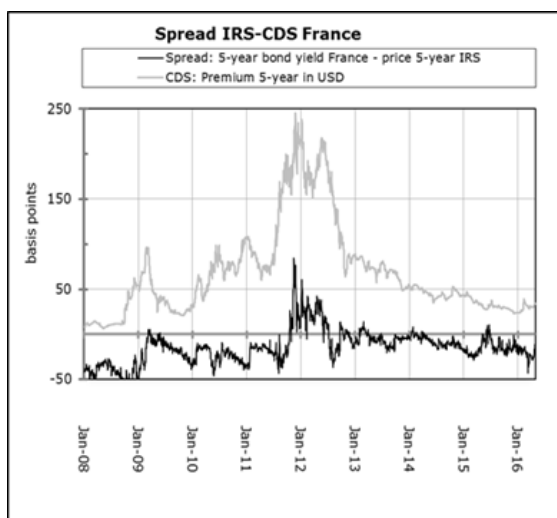
Source: Own elaboration.

Figure 2. CDS premia and Sovereign Bond Spread (France 5-year term): (a) Spread of 5-year bond versus CDS premium 5-year bond in USD; (b) Spread of 5-year bond plus premium CDS German Bond versus CDS premium 5-year bond in USD; (c) Yield of 5-year bond minus price 5-year IRS versus CDS premium 5-year bond in USD.



(a)

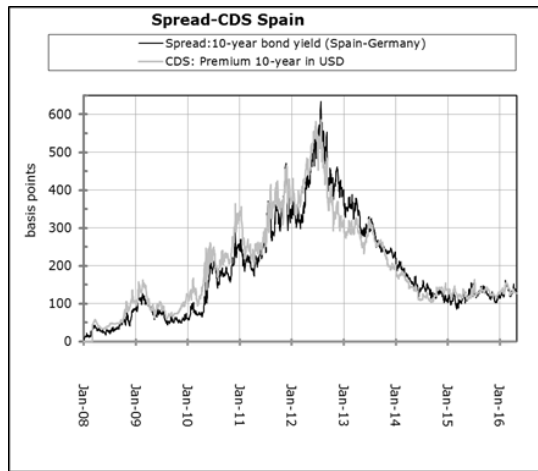
(b)



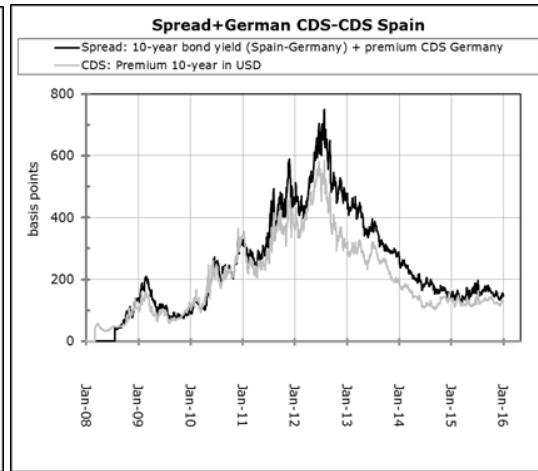
(c)

Source: Own elaboration.

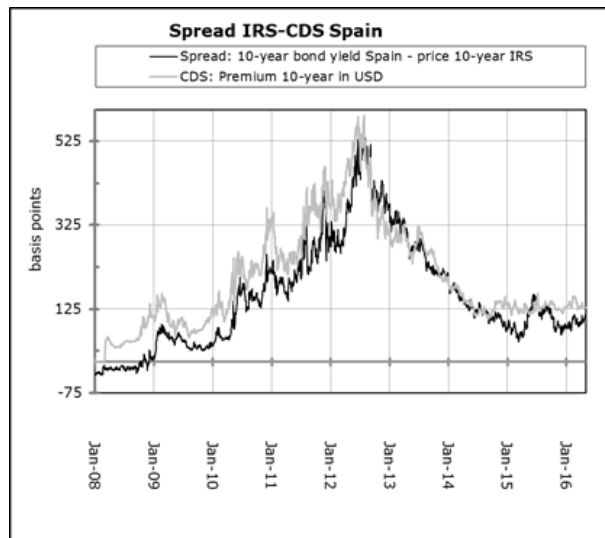
Figure 3. CDS premia and Sovereign Bond Spread (Spain 10-year term): (a) Spread of 10-year bond versus CDS premium 10-year bond in USD; (b) Spread of 10-year bond plus premium CDS German Bond versus CDS premium 10-year bond in USD; (c) Yield of 10-year bond minus price 10-year IRS versus CDS premium 10-year bond in USD.



(a)



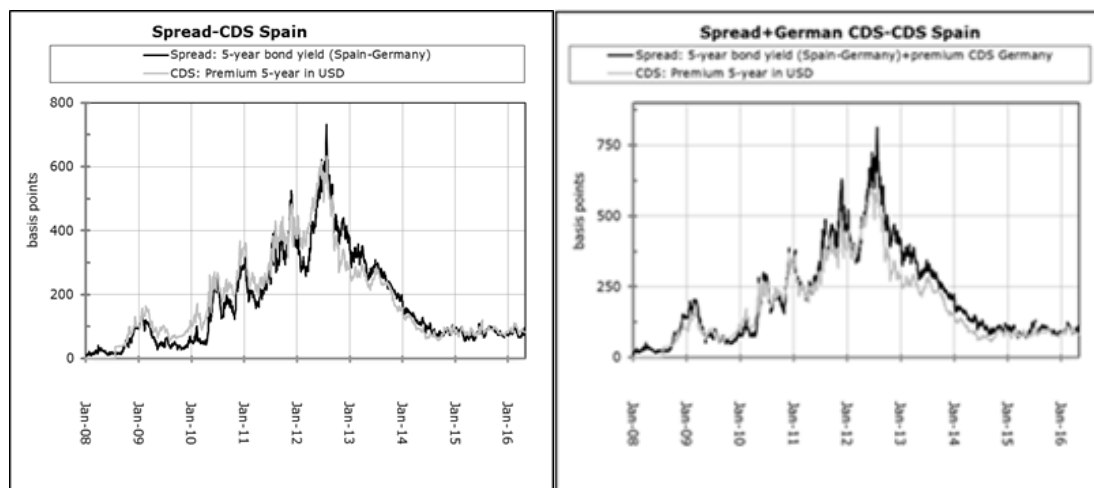
(b)



(c)

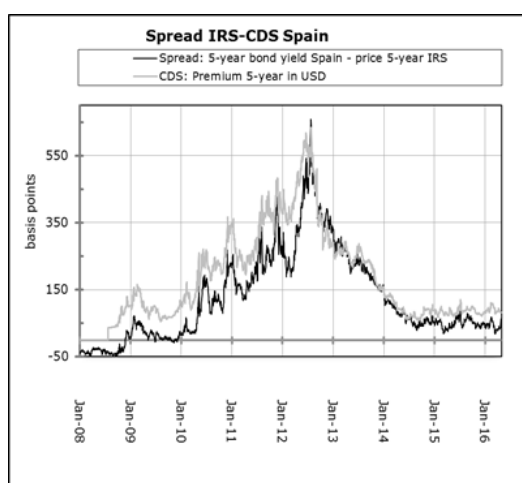
Source: Own elaboration.

Figure 4. CDS premia and Sovereign Bond Spread (Spain 5-year term): (a) Spread of 5-year bond versus CDS premium 5-year bond in USD; (b) Spread of 5-year bond plus premium CDS German Bond versus CDS premium 5-year bond in USD; (c) Yield of 5-year bond minus price 5-year IRS versus CDS premium 5-year bond in USD.



(a)

(b)



(c)

Source: Own elaboration.

It can be seen from these figures that, in general, the CDS premia remain above the bond spreads in the cases of Spain and France. Accordingly, Italy, Belgium, the Netherlands, Austria and Finland, which are not depicted in the figures, also show the same pattern. The exceptions are Ireland and Portugal. Given that the basis is defined as the difference between the CDS premia and the bond spreads, a positive basis is found in the Eurozone between sovereign bonds and CDS. Our results coincide with those of Fontana and Scheicher (2010), Arce et al. (2011), and Broto and Pérez- Quirós (2011).

It can also be observed that the basis changes as the German CDS premia are added to the differences between the yields of the bonds. As a result, the basis is negative for the nine countries analysed, that is, the bond spreads are greater than the CDS premia because the yield differentials are now measured against a truly risk-free asset.

Finally, the figures also show the changes produced when the swap rates are taken as the benchmark for the calculation of the spreads of the bonds. In this case, it can be appreciated that the correlation of these two variables is relatively low.

The spreads or differentials of the bonds with the risk-free assets and the CDS premia are variables that indicate the risk of default of the same debt of reference; therefore, it would be logical to suppose that they must be closely correlated. From the empirical models proposed on this subject, it can be deduced that these indicators are closely linked, especially when their behaviour is analysed over an extended time horizon. The works of Duffie (1999), Hull and White (2004), Blanco et al. (2005), Zhu (2006) and Alexopoulou et al. (2009) point in this direction. It should not be forgotten that, in an environment without frictions, the two measurements should tend to coincide, although the dynamics of the markets demonstrate that such a situation is very far from reality. In this respect, Arce et al. (2011) study the persistent deviations between the CDS premia and the bond spreads for the period 2005-2009.

As already stated, by designating the difference as the base, if the CDS premium is greater than the spread, then the base is considered positive, otherwise it is considered negative. In fact, the basis should tend towards zero but the frictions in the market and the difficulty of arbitrage drive its value away from the point of equilibrium. If the basis is positive, that is, the CDS premium is greater than the bond spread, then it is possible to arbitrage by selling CDS protection and short-selling the bond. This is the case for most sovereigns in the market, although the implementation of such arbitrage can be rather difficult. If the basis is negative, that is, the CDS premium is lower than the bond spread, then it is feasible to arbitrage by buying CDS protection and the bond. This is the case for most corporate bonds ever since the crisis and therefore the arbitrage has now become relatively easy to implement (see Fontana and Scheicher 2010).

3.2. Stationarity of the series.

The stationarity of the series has been checked using the Augmented Dickey-Fuller (ADF-test) and the Philips-Perron (P-P test) as shown in Tables 3 and 4, which refer respectively to the 5-year and 10-year tenders. In each table, four series are considered for every country, namely the premium of the CDS and the three kinds of bases as explained above. As the null hypothesis, both tests consider that the series possess a unit root and hence they are not stationary.

With a few exceptions, such as those in the cases of DE5, FR5, FR6, NL1, NL3, NL5, NL6, AT3, AT5, AT6, FI1, FI3, FI5 and FI6, non-stationarity is the rule. The existence of unit roots in the series is therefore predominant, and hence the use of first differences in the series is deemed necessary for further analysis.

Table 3. Stationarity test for 10-year term.

Country	ADF-test(p-value)	PP-test (p-value)
Germany DEGA\$AC	-2.0245(0.5679)	-8.3067(0.6464)
Germany DE5	-3.502(0.0421)*	-163 (0.00)**
France FRGA\$AC	-1.5243(0.7797)	-1.8304(0.6501)
France FR1	-2.1409(0.5187)	-2.807(0.2367)
France FR2	-1.747(0.6854)	-2.1842(0.5003)

France FR5	-2.9833(0.1620)	-4.7218(0.01)*
Italy ITGASAC	-1.8395(0.6463)	-2.1776(0.5031)
Italy IT1	-1.6476(0.7275)	-1.818(0.6554)
Italy IT2	-1.5817(0.7554)	-1.7687(0.6762)
Italy IT5	-1.7359(0.6901)	-1.9354(0.6057)
Spain ESGASAC	-1.5856(0.7538)	-1.9406(0.6035)
Spain ES1	-1.4054(0.8300)	-1.6745(0.7161)
Spain ES2	-1.3916(0.8359)	-1.6564(0.7238)
Spain ES5	-1.4797 (0.7986)	-1.7665 (0.6772)
Belgium BEGASAC	-1.8421(0.6452)	-2.0787(0.5450)
Belgium BE1	-1.8851(0.6270)	-2.2286(0.4350)
Belgium BE2	-1.7304(0.6925)	-2.1146(0.5298)
Belgium BE5	-2.4419(0.3912)	-3.107(0.1097)
Netherlands NLGASAC	-2.2077(0.4904)	-2.4707(0.3790)
Netherlands NL1	-3.2104(0.0861)	-4.2445(0.0100)*
Netherlands NL2	-2.2237(0.4836)	-2.6891(0.2866)
Netherlands NL5	-4.5236(0.0100)*	-9.7484(0.0100)*
Austria ATGASAC	-3.0214(0.1459)	-3.3414(0.06353)
Austria AT1	-3.1058(0.1102)	-3.523(0.04008)
Austria AT2	-2.3725(0.4206)	-2.6826(0.2893)
Austria AT5	-4.4921(0.0100)*	-6.4304(0.0100)*
Finland FIGASAC	-2.7081(0.2785)	-2.6405(0.3072)
Finland FI1	-3.3184(0.0674)	-6.263(0.010)*
Finland FI2	-2.3155(0.4448)	-2.8562(0.2158)
Finland FI5	-4.9548(0.010)*	-13.632(0.010)*
Ireland IEGASAC	-2.0264(0.5671)	-2.4031(0.4077)
Ireland IE1	-1.8656(0.6352)	-2.049(0.5576)
Ireland IE2	-1.8361(0.6477)	-2.0469(0.5585)
Ireland IE5	-2.0008(0.5780)	-2.1793(0.5024)
Portugal PTGASAC	-1.6437(0.7292)	-1.8492(0.6422)
Portugal PT1	-1.4314(0.8190)	-1.6200(0.7392)
Portugal PT2	-1.4035(0.8309)	-1.589(0.7523)
Portugal PT5	-1.5073(0.7869)	-1.6872(0.7107)

** significant on a 1%; * significant on a 5%

NOTE:

GASAC: 10-year CDS premia in “the country” in USD. (The symbols are taken from Datastream).

1: Spread of “the country” calculated against the 10-year yield of the German bond.

2: Spread of “the country” calculated against the 10-year yield of the German bond plus the premium of German 10-year CDS in USD.

5: Spread of “the country” calculated against the 10-year swap EUR LIBOR.

Source: Own elaboration.

Table 4. Stationarity test for 5-year term.

Country	ADF-test(p-value)	PP-test (p-value)
Germany DEG5\$AC	-2.5271(0.3552)	-11.567(0.4646)
Germany DE6	-2.5579(0.3421)	-19.391(0.08107)
France FRG5\$AC	-1.7707(0.6754)	-2.0353 (0.5634)
France FR3	-2.3728(0.4205)	-3.1145 (0.1065)
France FR4	-2.0333(0.5642)	-2.4961(0.3683)
France FR6	-3.6197(0.0308)*	-4.8727(0.0100)
Italy ITG5\$AC	-1.8297(0.6504)	-2.0846(0.5425)
Italy IT3	-1.7477(0.6851)	-1.8268(0.6517)
Italy IT4	-1.7223(0.6959)	-1.827(0.6516)
Italy IT6	-1.781(0.6710)	-1.8998(0.6207)
Spain ESG5\$AC	-1.6495(0.7267)	-1.9192(0.6125)
Spain ES3	-1.6771(0.7150)	-1.8314(0.6497)
Spain ES4	-1.6884(0.7102)	-1.8584(0.6383)
Spain ES6	-1.6789(0.7143)	-1.8821(0.6282)
Belgium BEG5\$AC	-1.9106(0.6162)	-2.0964(0.5375)
Belgium BE3	-2.0079(0.5750)	-2.4611(0.3831)
Belgium BE4	-1.859(0.6380)	-2.2648(0.4662)
Belgium BE6	-2.5586(0.3418)	-3.0809(0.1207)
Netherlands NLG5\$AC	-2.5461(0.3471)	-2.7863(0.2454)
Netherlands NL3	-3.6674(0.0261)*	-4.54(0.0100)*
Netherlands NL4	-2.7017(0.2813)	-3.0352(0.1401)
Netherlands NL6	-4.0413(0.0100)*	-4.8549(0.0100)*
Austria ATG5\$AC	-3.1178(0.1051)	-3.401(0.0532)
Austria AT3	-3.4571(0.0464)*	-3.8639(0.0157)*
Austria AT4	-2.7659(0.2541)	-3.0393(0.1383)
Austria AT6	-5.2419(0.0100)*	-5.7862(0.0100)*
Finland FIG5\$AC	-2.978(0.1643)	-2.8969(0.1986)
Finland FI3	-3.4269(0.0493)*	-4.6443(0.0100)*
Finland FI4	-2.4351(0.3941)	-3.066(0.1270)
Finland FI6	-3.641(0.0287)	-4.5596(0.0100)*
Ireland IEG5\$AC	-1.855(0.6397)	-2.0876(0.5413)
Ireland IE3	-2.0448(0.5593)	-2.1693(0.5067)
Ireland IE4	-2.0068(0.5755)	-2.1594(0.5108)
Ireland IE6	-2.1135(0.5302)	-2.2548(0.4705)
Portugal PTG5\$AC	-1.553(0.7676)	-1.6461(0.7281)
Portugal PT3	-1.4483(0.8119)	-1.6112(0.7429)
Portugal PT4	-1.4369(0.8167)	-1.6000(0.7476)
Portugal PT6	-1.4909(0.7939)	-1.6637(0.7207)

** significant on a 1%; * significant on a 5%

NOTE: G5\$AC: 5 years CDS premia in “the country” in USD. (The symbols are taken from Datastream).

3: Spread of “the country” calculated against the 5-year yield of the German bond.

4: Spread of “the country” calculated against the 5-year yield of the German bond plus the premium of German 10-year CDS in USD.

6: Spread of “the country” calculated against the 5-year swap EUR LIBOR. Source: Own elaboration.

3.3. Causality test.

In order to transform the series into being stationary, the first differences have been calculated. Granger causality tests are then used, based on Chan-Lau and Kim (2004) and Schuster (2005). Mere correlation analysis does not necessarily imply causality in the sense in which this is usually understood. With this analysis, we strive to determine, in various cases, whether it can be stated that x statistically provides more information about future values of y than do past values of y alone. That is, the method to perform Granger causality in bivariate series involves using the Wald test to compare the unrestricted model, in which y is explained by the lags of y and x , and the restricted model, in which y is only explained by the lags of y . The models are represented as follows:

$$\text{Restricted model: } y_t = \beta_0 + \beta_1 y_{t-1} + \dots + \beta_k y_{t-k} + \varepsilon$$

$$\text{Unrestricted model: } y_t = \beta_0 + \beta_1 y_{t-1} + \dots + \beta_k y_{t-k} + \alpha_1 x_{t-1} + \dots + \alpha_k x_{t-k} + \varepsilon$$

where k is the lag considered. The Wald test (Granger test in R) is calculated to test the following null and alternate hypotheses:

$$H_0: \alpha_i = 0 \text{ for each } i \text{ of the element } [1, k]$$

$$H_1: \alpha_i \neq 0 \text{ for at least one } i \text{ of the element } [1, k]$$

Cases:

- a. Unidirectional causality: spread causes CDS premium.
- b. Unidirectional causality: CDS premium causes spread.
- c. Bidirectional causality: feedback between spread and CDS premium.
- d. Causal independence: Causality between spread and CDS premium does not exist.

From Tables 5 and 6, it can be observed that, although the causal relationship runs in both directions, it is also manifested in favour of the CDS premia in several cases. If the CDS premia precede the risk spreads of bonds, then it is possible to draw the following conclusion: the use of these insurance contracts is a good way of measuring sovereign risk, since if the CDS premia move before the spreads, then it must be because they react more rapidly to changes in the market variables of the country in question.

A closer look at Table 5, referring to the 10-year horizon, provides more information. At the 99% level, case (c) predominates, followed by (b); that is, bidirectional causality is the most frequent output, followed by the case in which the CDS premium causes the spread. Only in two cases does the spread cause CDS premium (a). At the 95% level the results are very similar: bidirectional causality again predominates, and, in second place, the CDS premium causes the spread.

Table 5. Causality test 10-year term (lag1).

Country	Causality (Y<-X)	F-Statistic	Probability	Cases
Germany 5	DER5<-DEGA\$AC	3.7794	0.05202	d
	DEGA\$AC<-DE5	0.0546	0.8153	
France 1	FR1<- FRGA\$AC	17.286	3.345e-05 **	b
	FRGA\$AC <- FR1	3.3186	0.06864	
France 2	FR2<- FRGA\$AC	27.476	.751e-07 **	c
	FRGA\$AC <- FR2	13.197	0.0002872 **	
France 5	FR5<- FRGA\$AC	26.575	2.774e-07 **	b
	FRGA\$AC <- FR5	1.3064	0.2532	
Italy 1	ITL1<-ITGA\$AC	3.0328	0.08175	a
	ITGA\$AC<-ITL1	19.263	1.196e-05 **	
Italy 2	ITL2<-ITGA\$AC	3.5859	0.05841	a
	ITGA\$AC<-ITL2	20.479	6.368e-06 **	
Italy 5	ITL5<-ITGA\$AC	58.258	3.474e-14 **	c
	ITGA\$AC<-ITL5	17.17	3.554e-05 **	
Spain 1	ESP1<-ESGA\$AC	6.5558	0.001451 *	c
	ESGA\$AC<-ESP1	855.59	<2.2e-16 **	
Spain 2	ESP2<-ESGA\$AC	8.1596	0.0002952 **	c
	ESGA\$AC<-ESP2	1081	< 2.2e-16 **	
Spain 5	ESP5<-ESGA\$AC	5.6965	0.00341 *	c
	ESGA\$AC<-ESP5	473.72	< 2.2e-16 **	
Belgium 1	BEL1<-BEGA\$AC	23.139	1.614e-06 **	c
	BEGA\$AC<-BEL1	22.905	1.822e-06 **	
Belgium 2	BEL2<-BEGA\$AC	20.957	4.974e-06 **	c
	BEGA\$AC<-BEL2	32.552	1.326e-08 **	
Belgium 5	BEL5<-BEGA\$AC	20.957	4.974e-06 **	c
	BEGA\$AC<-BEL5	32.552	1.326e-08 **	
Netherlands 1	NL1<- NLGA\$AC	137.86	<2.2e-16 **	b
	NLGA\$AC<- NL1	0.0453	0.8314	
Netherlands 2	NL2<- NLGA\$AC	737.12	<2.2e-16 **	b
	NLGA\$AC<- NL2	0.1729	0.6776	
Netherlands 5	NL5<- NLGA\$AC	6.4142	0.01139 *	b
	NLGA\$AC<- NL5	0.1797	0.6717	
Austria 1	AUS1<-ATGA\$AC	42.078	1.092e-10 **	b
	ATGA\$AC<-AUS1	0.1371	0.7112	
Austria 2	AUS2<-ATGA\$AC	56.074	1.024e-13 **	c
	ATGA\$AC<-AUS2	5.6894	0.01716 *	
Austria 5	AUS5<-ATGA\$AC	33.98	6.435e-09 **	b
	ATGA\$AC<-AUS5	2.192	0.1389	
Finland 1	FIN1<-FIGA\$AC	21.328	4.106e-06 **	b
	FIGA\$AC<-FIN1	0.0086	0.926	
Finland 2	FIN2<-FIGA\$AC	199.23	<2.2e-16 **	b
	FIGA\$AC<-FIN2	2.4935	0.1145	

Finland 5	FIN5<-FIGA\$AC	0.8406	0.3593	d
	FIGA\$AC<-FIN5	0.3948	0.5299	
Ireland 1	IRL1<-IEGA\$AC	28.878	8.57e-08 **	c
	IEGA\$AC<-IRL1	41.903	1.192e-10 **	
Ireland 2	IRL2<-IEGA\$AC	27.378	1.84e-07 **	c
	IEGA\$AC<-IRL2	45.085	2.424e-11 **	
Ireland 5	IRL5<-IEGA\$AC	73.719	< 2.2e-16 **	c
	IEGA\$AC<-IRL5	36.457	1.842e-09 **	
Portugal 1	POR1<-PTGA\$AC	50.154	1.935e-12 **	c
	PTGA\$AC<-POR1	32.563	1.318e-08 **	
Portugal 2	POR2<-PTGA\$AC	46.544	1.17e-11 **	c
	PTGA\$AC<-POR2	34.039	6.246e-09 **	
Portugal 5	POR5<-PTGA\$AC	71.349	< 2.2e-16 **	c
	PTGA\$AC<-POR5	31.304	2.496e-08 **	

** significant on a 1%; * significant on a 5%

Notes:

1. Spread of “the country” calculated against the 10-year yield of the German bond and 10-year CDS premia in “the country” in USD (relative approach).
2. Spread of “the country” calculated against the 10-year yield of the German bond plus the premium of German 10-year CDS in USD and 10-year CDS premia in “the country” in USD (absolute approach).
5. Spread of “the country” calculated against the 10-year swap EUR LIBOR and 10-year CDS premia in “the country” in USD.
 - a. Unidirectional causality: spread causes CDS premium.
 - b. Unidirectional causality: CDS premium causes spread.
 - c. Bidirectional causality: feedback between spread and CDS premium.
 - d. Causal independence: causality between spread and CDS premium does not exist.

Source: Own elaboration.

Considering Table 6, referring to the five-year horizon, at the 99% level case (c) predominates, followed by case (b); that is, bidirectional causality is again the most frequent output followed by the case in which the CDS premium causes the spread. However, in the case of Italy and Spain, spread now causes the CDS premium. At the 95% level, the outcomes are similar: bidirectional causality again prevails, and, in second place, the CDS premium causes the spread.

Table 6. Causality test 5-year term (lag1).

Country	Causality (Y<-X)	F-Statistic	Probability	Cases
Germany 6	DE6<-DEG5\$AC	5.8017	0.0161 *	b
	DEG5\$AC<-DE6	0.1013	0.7503	
France 3	FR3<-FRG5\$AC	15.715	7.613e-05 **	b
	FRG5\$AC<-FR3	3.2327	0.07233	
France 4	FR4<-FRG5\$AC	33.011	1.051e-08 **	c
	FRG5\$AC<-FR4	11.89	0.0005756 **	
France 6	FR6<-FRG5\$AC	10.042	0.001553 **	b
	FRG5\$AC<-FR6	1.454	0.228	
Italy 3	ITL3<-ITG5\$AC	0.1831	0.6688	a
	ITG5\$AC<-ITL3	88.832	<2.2e-16 **	

Italy 4	ITL4<-ITG5\$AC	0.3107	0.5773	a
	ITG5\$AC<-ITL4	99.072	< 2.2e-16 **	
Italy 6	ITL6<-ITG5\$AC	0.1158	0.7337	a
	ITG5\$AC<-ITL6	99.021	< 2.2e-16 **	
Spain 3	ESP3<-ESG5\$AC	3.6058	0.05772	a
	ESG5\$AC<-ESP3	1493.1	< 2.2e-16 **	
Spain 4	ESP4<-ESG5\$AC	2.5756	0.1087	a
	ESG5\$AC<-ESP4	1875.5	< 2.2e-16**	
Spain 6	ESP6<-ESG5\$AC	7.3456	0.006778 **	c
	ESG5\$AC<-ESP6	1315.1	< 2.2e-16 **	
Belgium 3	BEL3<-BEG5\$AC	9.3694	0.002234 **	c
	BEG5\$AC<-BEL3	34.634	4.624e-09 **	
Belgium 4	BEL4<-BEG5\$AC	9.9599	0.001623 *	c
	BEG5\$AC<-BEL4	43.466	5.449e-11 **	
Belgium 6	BEL6<-BEG5\$AC	14.669	0.0001319 **	c
	BEG5\$AC<-BEL6	42.175	1.04e-10 **	
Netherlands 3	NL3<-NLG5\$AC	132.57	< 2.2e-16 **	b
	NLG5\$AC<-NL3	0.5472	0.4595	
Netherlands 4	NL4<-NLG5\$AC	659.92	< 2.2e-16 **	b
	NLG5\$AC<-NL4	0.473	0.4917	
Netherlands 6	NL6<-NLG5\$AC	22.542	2.196e-06 **	b
	NLG5\$AC<-NL6	0.0259	0.8721	
Austria 3	AUS3<-ATG5\$AC	60.99	9.011e-15 **	b
	ATG5\$AC<-AUS3	3.0583	0.08047	
Austria 4	AUS4<-ATG5\$AC	75.611	< 2.2e-16 **	c
	ATG5\$AC<-AUS4	11.295	0.000791 **	
Austria 6	AUS6<-ATG5\$AC	50.904	1.332e-12 **	b
	ATG5\$AC<-AUS6	1.0463	0.3065	
Finland 3	FIN3<-FIG5\$AC	19.297	1.175e-05 **	b
	FIG5\$AC<-FIN3	0.0858	0.7696	
Finland 4	FIN4<-FIG5\$AC	255.5	< 2.2e-16 **	c
	FIG5\$AC<-FIN4	3.9138	0.04802 *	
Finland 6	FIN6<-FIG5\$AC	2.677	0.102	d
	FIG5\$AC<-FIN6	0.5445	0.4607	
Ireland 3	IRL3<-IEG5\$AC	30.55	3.661e-08 **	c
	IEG5\$AC<-IRL3	117.19	< 2.2e-16 **	
Ireland 4	IRL4<-IEG5\$AC	29.609	5.906e-08 **	c
	IEG5\$AC<-IRL4	121.85	< 2.2e-16 **	
Ireland 6	IRL6<-IEG5\$AC	37.761	9.55e-10 **	c
	IEG5\$AC<-IRL6	115.49	< 2.2e-16 **	
Portugal 3	POR3<-PTG5\$AC	96.2	< 2.2e-16 **	c
	PTG5\$AC<-POR3	52.459	6.15e-13 **	
Portugal 4	POR4<-PTG5\$AC	94.355	< 2.2e-16 **	c
	PTG5\$AC<-POR4	54.645	2.079e-13 **	

Portugal 6	POR6<-PTG5\$AC	101.11	< 2.2e-16 **	c
	PTG5\$AC<-POR6	52.227	6.902e-13 **	

** significant on a 1%; * significant on a 5%

Notes:

3. Spread of “the country” calculated against the 5-year yield of the German bond and 5-year CDS premia in “the country” in USD (relative approach).
4. Spread of “the country” calculated against the 5-year yield of the German bond plus the premium of German 5-year CDS in USD and 5-year CDS premia in “the country” in USD (absolute approach).
6. Spread of “the country” calculated against the 5-year swap EUR LIBOR and 5-year CDS premia in “the country” in USD.
 - a. Unidirectional causality: spread causes CDS premium.
 - b. Unidirectional causality: CDS premium causes spread.
 - c. Bidirectional causality: feedback between spread and CDS premium.
 - d. Causal independence: causality between spread and CDS premium does not exist.

Source: Own elaboration.

4. Conclusion.

This paper studies the relationship between the differentials of sovereign bond spreads and the market for CDS for ten countries of the Eurozone in the period 2008-2016. It is necessary to determine whether the CDS premia represent an alternative means of estimating changes in sovereign risks and whether these premia might serve to estimate the probability of non-compliance of a country. The main contribution of this paper involves the study of all the scenarios in various terms and benchmarks (relative or absolute approach, and IRS). Do these two parameters converge in spite of the numerous frictions that arise in the market? Which is the best measure of sovereign risk?

Before this current crisis, the risks of default by developed economies could not be measured using the CDS since this market lacked liquidity. After the start of the crisis in public debt in May 2010, there was an increase in both the trading volumes and the premia quoted; the largest increases related to Ireland, Greece and Portugal, whereas those of France and Germany were lower. Therefore, in the sovereign CDS markets, a discrimination of assets was recorded that did not occur before the financial crisis. According to the Bank for International Settlements data, the proportion of the total CDS market accounting for sovereign debt was 13% in 2010, compared to 6% in 2007.

The best measure of sovereign risk seems to be the CDS premia (in 82% of the cases), located as the leader or in a bidirectional causal relationship (50% of the cases) with the spread of the bond. A bidirectional relationship means that the CDS contracts constitute good instruments of measurement of sovereign risk because their prices (i.e. premia) are closely related to the spread of the bonds.

If the CDS premia are related to the spreads, then the conclusion can be drawn that the use of credit contracts constitutes a good way of measuring the sovereign risk since these contracts react when there are changes in the market variables of the country in question. On the other hand, one of the disadvantages of using the CDS premia as a measure of sovereign risk is the relatively small size of this market. During the first years of the crisis, the CDS market grew strongly until mid-2011. However, with the announcement of the EU ban on naked CDS in October 2011 and its coming into effect in November 2012, the liquidity of the market dropped considerably. This new situation may hinder the utility of the sovereign CDS as a tool for measuring the risk and the probability of default of the issues of public debt in the Eurozone.

Contrary to the findings of Fontana and Sheicher (2016), CDS leads in most countries, and not only in the peripheral countries. In the study of Delis and Mylonidis (2011), a Granger bidirectionality is found in peripheral countries; in our study these cases are enhanced to include other countries, such as Finland, Belgium, France and Austria, if the absolute approach is given (spread of “the country”

calculated against the yield of the German bond plus the premium of German CDS in USD and CDS premia in “the country” in USD). Except for the case of Belgium, the other three countries present a change from leadership of CDS to bidirectionality when the absolute approach is taken into consideration (Finland just in the case of 10-year term).

The two principal reasons why CDS should be considered as a measure of sovereign risk in times of crisis are:

Using the differentials of debt, we are not analysing, in absolute terms, the evolution of a particular sovereign issue since this depends on the asset of reference chosen as being risk-free. For this reason, the premium of the CDS for Germany has been added to the spread. The differentials have also been used in a relative way, as is normal practice. Calculating the spreads of the bonds against other benchmarks, such as the swap rates, does not seem to produce better results than using the classic approaches of the yield of the German bond with or without the addition of the premium of the corresponding CDS.

The yields on bonds may offer an inadequate measure of sovereign risk in times of crisis because they may be “contaminated” by effects such as the investors’ “flight to quality”, which biases the risk premia of the most solvent countries towards lower values.

In our study, there is independence of the variables only in the case of Finland (both terms) and Germany (10-year term) when taking into account IRS as the risk-free rate, as Fontana and Scheicher (2010) propose. The case of the leadership of the spread of the bond is given by Italy (10-year term) or Italy and Spain (5-year term).

In summary, a certain relationship of causality exists between the spreads of sovereign bonds and the premia of CDS; it has also been demonstrated that the CDS premia cause the sovereign risk spreads in some cases. In the light of the data and its interpretation, we can conclude that trading in the CDS market contains clear and useful information on the sovereign risk of a country and CDS trading has become a parallel market with respect to the determination of the prices of public debt bonds. It is given also, the worst results taking into account the Interest Rate Swap. However, as remarked before, the market currently shows rather low activity caused by the EU regulation on naked trading. The almost unanimous opinion in the market and in academia is that this ban should be lifted, because, without a certain degree of speculation, the market could not be sustainable.

References

- Alexopoulou, I., Andersson, M., & Georgescu O.M. (2009). *An Empirical Study on the Decoupling Movements between Corporate Bond and CDS Spreads*. Retrieved from: <http://hdl.handle.net/10419/153519>.
- Ammer, J., & Cai, F. (2011). Sovereign CDS and Bond Pricing Dynamics in Emerging Markets: Does the Cheapest-to-Deliver Option Matter? *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 21, 369-87.
- Arce, O., Mayordomo, S., & Peña, J.I. (2011). Do Sovereign CDS and Bond Markets Share the Same Information to Price Credit Risk? An Empirical Application to the European Monetary Union Case, *XIX Foro de Finanzas*.
- Arce, O., Mayordomo, S., & Peña, J.I. (2013). Credit-Risk Valuation in the Sovereign CDS and Bonds Markets: Evidence from the Euro Area Crisis. *Journal of International Money and Finance*, 35, 124-

- Beber, A., Brandt, M.W., & Kavajecz, K.A. (2009). Flight-to-Quality or Flight-to-Liquidity? Evidence from the Euro-Area Bond Market. *Review of Financial Studies*, 22(3), 925-957.
- Blanco, R., Brennan, S., & Marsh, I.W. (2005). An Empirical Analysis of the Dynamic Relation between Investment-Grade Bonds and Credit Default Swaps. *The Journal of Finance*, October, 2255-2281.
- Blommestein, H., Eijffinger, S. & Qian, Z. (2016). Regime-Dependent Determinants of Euro Area Sovereign CDS Spreads. *Journal of Financial Stability*, 22, 10-21.
- Bowe, M., Klimaviciene, A., & Taylor, A.P. (2009, March). Information Transmission and Price Discovery in Emerging Sovereign Credit Risk Markets. *Mid-West Finance Association Annual Conference, Chicago*.
- Broto, C., & Pérez-Quirós, G. (2011). Sovereign CDS Premia during the Crisis and Their Interpretation as a Measuer of Risk. *Economic Bulletin*, (APR), 1-9.
- Broto, C. & Pérez-Quirós, G. (2015). Disentangling Contagion among Sovereign CDS Spreads during the European Debt Crisis. *Journal of Empirical Finance*, 32, 165-179.
- Chan-Lau, M.J.A., & Kim, M.Y.S. (2004). Equity Prices, Credit Default Swaps, and Bond Spreads in Emerging Markets, *International Monetary Fund*, No. 4-27.
- Delatte, A.L., Gex, M., & López-Villavicencio, A. (2012). Has the CDS Market Influenced the Borrowing Cost of European Countries during the Sovereign Crisis? *Journal of International Money and Finance*, 31(3, April), 481-497.
- Delis, M.D., & Mylonidis, N. (2011). The Chicken or the Egg? A Note on the Dynamic Interrelation between Government Bond Spreads and Credit Default Swaps. *Finance Research Letters*, 8(3, September), 163-170.
- Duffie, D. (1999). Credit Swap Valuation. *Financial Analysts Journal*, 55(1), 73-87.
- Fontana, A., & Scheicher, M. (2010). *An Analysis of Euro Area Sovereign CDS and Their Relation with Government Bonds*. Frankfurt (Germany). Retrieved from: <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/scpwps/ecbwp1271.pdf>.
- Fontana, A., & Scheicher, M. (2016). An Analysis of Euro Area Sovereign CDS and Their Relation with Government Bonds'. *Journal of Banking and Finance*, 62, 26-40.
- Forte, S., & Peña, J.I. (2009). Credit Spreads: An Empirical Analysis on the Informational Content of Stocks, Bonds, and CDS. *Journal of Banking and Finance* 33 (11, November), 2013-2025.
- Galariotis, E.C., Makrchoriti, P., & Spyrou, S. (2016). Sovereign CDS Spread Determinants and Spillover Effects during Financial Crisis: A Panel VAR Approach. *Journal of Financial Stability*, 26, 62-77.
- Gómez-Puig, M., & Sosvilla-Rivero, S. (2014). Causality and Contagion in EMU Sovereign Debt Markets. *International Review of Economics and Finance*, 33, 12-27.
- Gonzalo, J., & Granger, C. (1995). Estimation of Common Long-Memory Components in Cointegrated

- Systems. *Journal of Business and Economic Statistics*, 13(1), 27-35.
- Hasbrouck, J. (2016). One Security , Many Markets: Determining the Contributions to Price Discovery. *The Journal of Finance*, 50(4), 1175–1199. Retrieved from: <http://www.jstor.org/stable/2329348>.
- Hull, J.C., & White, A.D. (2004). Valuation of a CDO and an n -Th to Default CDS Without Monte Carlo Simulation. *The Journal of Derivatives*, 12(2, Winter), 8-23.
- International Monetary Fund (IMF) (2013). A New Look Aat the Role of Sovereign Credit Default Swaps.
- Kim, S.J., Salem, L., & Wu, E. (2015). The Role of Macroeconomic News in Sovereign CDS Markets: Domestic and Spillover News Effects from the U.S., the Eurozone and China. *Journal of Financial Stability*, 18, 208-24.
- Martín-García, M., Téllez-Valle, C., & Martín-Marín, J.L. (2014a). Evolution of Sovereign Rating Models in the Current Crisis. *Journal Globalization, Competitiveness and Governability*, 8(1), 16-33.
- Martín-García, M, Téllez-Valle, C., & Martín-Marín, J.L. (2014b). Sovereign Bond Spreads and Credit Default Swap Premia: Cointegration and Causality. *Investment Management and Financial Innovations*, 11(2), 47-59.
- Muratori, U. (2015). Contagion in the Euro Area Sovereign Bond Market. *Social Sciences*, 4(1), 66-82. Retrieved from: www.mdpi.com/journal/socsci.
- Ngene, G., Carley, H., & Hassan, K.M. (2014). Persistence of volatilitu of sovereign credit risk in presence of structural breaks. *Journal of Derivatives & Hedge Funds*, 20, 10-27.
- Palladini, G., & Portes, R. (2011). *Sovereign CDS and Bonds Pricing Dynamics in the Euro-Area*. (No. w17586). National Bureau of Economic Research.
- Ruffoni, S. (2014). Wherever Did Europe’s Sovereign CDS Trading Go?. *Wall Street Journal, Moneybeat*. Retrieved from: <https://blogs.wsj.com/moneybeat/2014/01/31/wherever-did-europes-sovereign-cds-trading-go/>.
- Schuster, G. (2005). Determinantes Del Riesgo País: Una Medición a Través de Los Swaps de Deuda’. *Premio Nacional de Derviados Mex-DER Asigna México*.
- Zhang, G., & Zhang, S. (2013). Information Efficiency of the U.S. Credit Default Swap Market: Evidence from Earnings Surprises. *Journal of Financial Stability*, 9, 720-730.
- Zhu, H. (2006). An Empirical Comparison of Credit Spreads between the Bond Market and the Credit Default Swap Market. *Journal of Financial Services Research*, 29(3), 211-235.



Toma de Decisiones Estratégicas en Entornos Inciertos

BLANCO-MESA, FABIO

Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Escuela de Administración de Empresas
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja (Colombia)
Correo electrónico: fabio.blanco01@uptc.edu.co

LEÓN-CASTRO, ERNESTO

Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción (Chile)
Correo electrónico: eleon@ucsc.cl

ACOSTA-SANDOVAL, ALEJANDRA

Facultad Sede Duitama
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama (Colombia)
Correo electrónico: maria.acosta04@uptc.edu.co

RESUMEN

El proceso de toma de decisiones tiene una incidencia relevante en los resultados de las empresas, lo que ha llevado a desarrollar novedosos métodos que permitan evaluar bajo condiciones no controlables elementos subjetivos y racionales. En ese sentido, el objetivo principal de este trabajo estudia los operadores de agregación en la toma de decisiones en entornos inciertos. Se presentan dos metodologías que permiten agregar información, que se llaman operadores OWA y BON-OWA. La aplicación de estos operadores se realiza en la selección de lanzamiento de nuevos productos. La principal ventaja de estos operadores es que permiten capturar la actitud del decisor y la comparación e interrelación continua de la información. Así, se destaca el análisis holístico que ofrecen estos métodos sobre la toma de decisiones en incertidumbre, que permite integrar conceptos de la teoría administrativa y la teoría de la agregación en un caso aplicado, visualizando como la inclusión de la información genera cambios dentro de los rankings de selección de alternativas.

Palabras clave: toma de decisiones, incertidumbre, operadores de agregación.

Clasificación JEL: C02; C43; D81; L1.

MSC2010: 18B35; 47A54.

Strategic Decision-Making in Uncertain Environments

ABSTRACT

Decision-making has a relevant incidence on firms results, which has led to develop novel methods that allow assessing subjective and rational elements under uncontrollable conditions. In this sense, the main aim of this work is to study aggregation operators in decision-making in uncertain environments. Two methodologies allow aggregating information are presented, which are called OWA and BON-OWA operators. The application of these operators is made in the selection of new product release. The main advantage of these operators is that they allow to capture the attitude of the decision maker and the continuous comparison and interrelation of the information. Thus, the holistic analysis offered by these methods on decision making in uncertainty is highlighted, which allows to integrate concepts of administrative and aggregation theories in an applied case, visualizing how the inclusion of information generates changes within the selection of alternatives.

Keywords: decision-making, uncertainty, aggregation operators.

JEL classification: C02; C43; D81; L1.

MSC2010: 18B35; 47A54.



1. Introducción.

La toma de decisiones en entornos inciertos es un campo que ofrece resultados válidos a partir de la subjetividad y el razonamiento inspirado desde la lógica difusa (Zadeh, 1965). La lógica difusa analiza el concepto de los conjuntos borrosos, que permite usar los conjuntos Booleanos clásicos en una lógica de valores múltiples. Las investigaciones en la toma de decisiones en incertidumbre tienen origen en los estudios de los conceptos de conjuntos difusos (Zadeh, 1965), entornos difusos (Bellman & Zadeh, 1970), razonamiento aproximado (Zadeh, 1975a; 1975b; 1975c) y aplicaciones de los conjuntos difusos en los sistemas de decisión (Zimmermann, 1986). Su principal argumento se basa en que un gran número de las decisiones en el mundo real ocurren en un entorno en el que las consecuencias de posibles acciones no son conocidas con precisión. En ese sentido, una decisión puede ser vista como una intersección de los objetivos y restricciones dadas dentro de un proceso de múltiples etapas donde la inteligencia humana tiene la habilidad de manipular conceptos difusos y responder instrucciones difusas (Bellman & Zadeh, 1970). Dentro de las problemáticas que se han trabajado a través de metodologías difusas se encuentran decisiones financieras (Zeng & Su, 2015), pronóstico del tipo de cambio (León-Castro et al., 2018b), métodos alternativos de solución de conflictos (Pérez-Arellano et al., 2019), medición de la innovación (Alfaro-García et al., 2018), selección de productos (Merigó & Gil-Lafuente, 2010), evaluación de proyectos (Doskócil, 2015), análisis de clientes (Ortigosa-Hernández & Gil-Lafuente, 2016), entre muchas otras.

Una de las aproximaciones más estudiadas en este campo es el operador *Ordered Weighted Average* (OWA) como método utilizado para la toma de decisiones. Este método permite agregar la información y obtener un orden, en el que se muestran de forma descendente o ascendente las opciones evaluadas. A partir de este método se han creado múltiples extensiones que permiten ordenar, relacionar y diferenciar la información, uno de los cuales es el operador BON-OWA. Este operador combina las características del operador OWA (Yager, 1988) y la media de Bonferroni (Bonferroni, 1950). La media de Bonferroni permite establecer la relación de dos medias aritméticas y el producto. Así, el BON-OWA permite interrelacionar, comparar continuamente y ordenar la información.

En ese sentido, el presente trabajo tiene como objetivo principal estudiar los operadores de agregación en la toma de decisiones en entornos inciertos. Para alcanzarlo, se hará una revisión de la teoría de la decisión en entornos inciertos y se presentarán los conceptos básicos de los operadores OWA y BON-OWA como herramientas de agregación de información. Posteriormente, se presenta la aplicación de los operadores a través de un caso de selección de producto a lanzar al mercado de una empresa mexicana. En dicho caso, se evalúan cuatro diferentes productos que tienen la posibilidad de ser lanzados al mercado a través de seis elementos de evaluación seleccionados por la alta dirección de la organización y cada uno es evaluado por el área de desarrollo y operaciones de la empresa. Esta información es analizada a través de cuatro operadores distintos de agregación de información y se detalla cada uno de estos resultados. Finalmente, este estudio permite de manera holística observar una metodología novedosa sobre toma de decisiones en situaciones de incertidumbre, que integra conceptos de la teoría administrativa y la teoría de la agregación en un caso aplicado donde se visualiza cómo al agregar información las ordenaciones de las alternativas varían.

La actual investigación tiene la siguiente estructura. En la sección 2 se profundiza sobre la teoría de la toma de decisiones en incertidumbre, operadores OWA y BON-OWA y un caso práctico de los operadores. En la sección 3 se presenta un caso práctico de los operadores sobre selección de productos y la sección 5 resume las principales conclusiones del trabajo.

2. Teoría y métodos para la toma de decisiones en entornos inciertos.

2.1. Teoría de la toma de decisiones en incertidumbre.

Ante un mundo globalizado caracterizado por la alta cantidad de información, cambios constantes e incertidumbre, los fenómenos relacionados con la realidad y la complejidad humana son cada vez menos previsibles y más inciertos, difusos y difíciles de captar (Gil-Aluja, 1999; Yager, 1996b; 2006). Esto ha llevado al desarrollo de estudios que pueden combinar metodologías que traten la incertidumbre y la probabilidad con el fin de obtener secuencias y escenarios significativos de los hechos que ocurren en la realidad.

Es así como inspirados en la lógica difusa (Zadeh, 1965), se han utilizado de forma relevante dentro del análisis de toma de decisiones, con la finalidad de que éstas se acerquen cada vez más a las realidades que viven las personas/organizaciones/países/mundo. Dentro de los trabajos que se han realizado al respecto se encuentran los realizados con conjuntos difusos (Klir & Yuan, 1995; Garg, 2016), conjuntos vagos (Chen & Tan, 1994; Hong & Choi, 2000), conjuntos difusos intuicionistas (Lin et al., 2007), técnica para el orden de preferencias por similitud con la solución ideal (TOPSIS) (Chen, 2000; Boran et al., 2009), entre otras.

Su principal argumentación se basa en que un gran número de las decisiones en el mundo real ocurren en un entorno, en el que las consecuencias de posibles acciones no son conocidas con precisión. En ese sentido, una decisión puede ser vista como una intersección de objetivos y restricciones dadas dentro de un proceso de múltiples etapas donde la inteligencia humana tiene la habilidad de manipular conceptos difusos y responder instrucciones difusas (Bellman & Zadeh, 1970).

Basado en lo anterior, en la toma de decisiones se ha pasado del concepto de probabilidad al de posibilidad destacando diferencias importantes entre ellas. Según Blanco-Mesa (2015) son dos términos que se utilizan indistintamente para interpretar la realidad al etiquetar eventos como probables, cuando debería decirse qué realidad es posible. Por un lado, la probabilidad está relacionada con el azar, la aleatoriedad, la medida y lo objetivo soportado por un conjunto de leyes para explicar la realidad con hechos del pasado. Por otro lado, la posibilidad está relacionada con lo difuso, las valuaciones, lo subjetivo, la percepción y la sensación, donde la realización de los hechos no se puede ubicar en el tiempo y en el espacio, el pasado no aporta información suficiente y las acciones presentes son valuadas para la previsión de los acontecimientos.

Bajo esta lógica se ha creado un marco teórico para el análisis de la información de forma posibilista y análoga, en donde la información debe incorporarse dentro de la medición (Zadeh, 1999). Esta actitud hacia el análisis de la información de forma análoga y la incertidumbre del comportamiento humano es la que ha llevado al estudio de un nuevo campo de análisis de decisión (Chen & Hwang, 1992). En ese sentido, el desarrollo de este campo de investigación se centra en el tratamiento de problemas de toma de decisiones de múltiple criterio (MCDM, siglas en inglés para *Multiple Criteria Decision Making*), en los que se tiene en cuenta la subjetividad del decisor para seleccionar, priorizar, y ordenar diferentes acciones y observar la factibilidad de una alternativa de acuerdo a los recursos disponibles (Blanco-Mesa et al., 2017).

Así, las metodologías de la lógica difusa son combinadas con la MCDM para el tratamiento de los problemas en situaciones de incertidumbre y alta subjetividad, ya que pueden involucrar variables lingüísticas y variables difusas al momento de definir metas, pros y contras de las características de las decisiones (Tzeng & Huang, 2011). Un aspecto a destacar es que los problemas de MCDM pueden ser clasificados en dos: a) toma de decisiones con atributos múltiples (MADM, siglas en inglés para *Multiple Attribute Decision Making*) y b) toma de decisiones con múltiple objetivo (MODM, siglas en inglés para *Multiple Objective Decision Making*) (Hwang & Yoon, 1981). Dentro de las MADM, el número de alternativas ya han sido establecidas y el proceso de toma de decisiones selecciona, prioriza y ordena un número finito de acciones de curso. En las MODM el principal interés se enfoca en diseñar la alternativa “más” posible en relación a la limitación existente de los recursos disponibles (Chen &

Hwang, 1992). Recientemente, Xu (2015) ha propuesto una nueva categoría llamada la toma de decisiones inciertas con atributos múltiples (UMADM, siglas en inglés para *Uncertain Multiple Attribute Decision Making*), que permite ordenar y priorizar la información de acuerdo a su peso. Las UMADM usan operadores de agregación como la media ponderada (WA) (Harsanyi, 1955), la media ponderada ordenada (OWA, siglas en inglés para *Ordered Weighted Average*) (Yager, 1988) y la media ponderada híbrida (HWA) (Xu, 2008).

Así, con el desarrollo de los diferentes métodos para la toma de decisiones son muchas las aplicaciones y aproximaciones que se han propuesto en áreas como las ciencias computacionales, ingeniería, ciencia de la gestión de operaciones, matemáticas, negocios económicos y sistemas de control automático. Asimismo, estos nuevos métodos son aplicados a problemas empresariales actuales como la gestión de la cadena de suministros, toma de decisiones en inversiones, evaluación de personal, rediseño de productos y servicios de mantenimiento (Blanco-Mesa et al. 2017).

2.2. El operador OWA como método para la toma de decisiones.

Actualmente, existen múltiples propuestas desarrolladas con la matemática de la lógica difusa para la toma de decisiones. En este trabajo profundizaremos en el operador OWA. Este método permite agregar la información y obtener ordenaciones de forma descendente o ascendente de las opciones evaluadas. Las investigaciones desarrolladas bajo este método abarcan campos como la ingeniería, informática, economía y estudios en empresa, en los que se observan avances teóricos, matemáticos y aplicaciones prácticas. Las aplicaciones teóricas van dirigidas al desarrollo de nuevos algoritmos y a la integración de métodos para la ordenación de la información. Dentro de las aplicaciones y algoritmos desarrollados se destacan los hechos en el campo de los estudios empresariales, que abordan temas relacionados con las finanzas (Gil-Aluja, 1996; Merigó & Gil-Lafuente, 2010; 2007; 2006), estrategia (Wei & Merigó, 2012; Merigó & Gil-Lafuente 2008; 2012; Merigó & Casanovas, 2010; Vigier et al., 2017; Merigó, 2015), emprendimiento (Blanco-Mesa et al., 2015; 2018a), grupos de interés (Llopis & Palacios-Marqués, 2017; Blanco-Mesa et al., 2018b; 2018c), gestión de los recursos humanos (Merigó & Gil-Lafuente, 2011; Canós et al., 2014; Canós & Liern, 2008), gestión del riesgo empresarial (Blanco-Mesa et al., 2019) y mercadeo (Brijs et al., 2006). Estos estudios hacen importantes aportaciones metodológicas para el tratamiento de información proveniente de tomadores de decisiones siendo capaz de parametrizar su actitud y sus preferencias.

Dentro de los campos para la aplicación y el desarrollo de estos métodos en estudios empresariales es la toma de decisiones a nivel estratégico. En este proceso de toma de decisiones se involucra la intuición, la racionalidad y el conocimiento. La intuición involucra tareas y procesos complejos en cortos horizontes de tiempo con una alta carga de subjetividad y juicios de valor. La racionalidad es un proceso analítico, sistémico, basado en reglas y con mecanismos explícitos, que tienen una gran aceptación entre los tomadores de decisiones ya que siguen un proceso de toma de decisiones paso a paso. El conocimiento puede ser obtenido a través de la experiencia, la práctica, la capacitación y educación continuada, que a su vez es acumulado, compartido y replicado y puede ser usado en cualquier momento para dar soluciones a problemas. Por lo tanto, resulta pertinente profundizar en los estudios de toma de decisiones estratégicas en incertidumbre usando estos novedosos métodos, ya que permiten capturar la actitud del tomador de decisiones cuando la información disponible es insuficiente o confusa.

2.3. Conceptos básicos del operador OWA.

El operador OWA fue propuesto por Ronald Yager (1988). La finalidad de este operador es obtener un valor representativo a partir de la agregación de una serie de datos que reflejan los parámetros de optimismo/pesimismo predeterminados. Así, la información provista por cada tomador de decisiones evidencia su grado de optimismo o pesimismo. La definición del operador OWA es la siguiente.

Definición 1: Un operador OWA se define como una función de dimensión n es una aplicación $F: R^n \rightarrow R$, que está asociada en un vector de ponderación W de dimensión n $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ que cumple con las siguientes condiciones:

- $w_j \in [0, 1]$
- $\sum_{j=1}^n w_j = 1$
- $f(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n w_j b_j$ (1)

La característica fundamental del operador OWA es el reordenamiento de los argumentos a través de la asociación con una ponderación, de acuerdo a b_j que es el valor más alto (o bajo) de los argumentos a_1, a_2, \dots, a_n . Así, la ordenación introduce la no linealidad en el proceso de agregación. A continuación, se mostrará un ejemplo matemático del procedimiento:

$$W = [0.5, 0.4, 0.1, 0.7]$$

entonces:

$$f(0.4, 0.2, 0.5, 0.3) = (0.5) \times (0.5) + (0.3) \times (0.4) + (0.4) \times (0.1) + (0.2) \times (0.7) = 0.55$$

El operador OWA es una media ponderada que cumple con propiedades que definen a este método como un operador de medidas, cuyas características son las siguientes (Yager, 1988; 1996a; 2002):

- a) Conmutativa: $f(a_1, a_2, \dots, a_n) = f(d_1, d_2, \dots, d_n)$;
- b) Monotonía: $f(c_1, c_2, \dots, c_n) \leq f(a_1, a_2, \dots, a_n)$;
- c) Delimitado: $\min\{a_i\} \leq f(a_1, \dots, a_n) \leq \max\{a_i\}$;
- d) Idempotencia: $f(a_1, a_2, \dots, a_n) = a$;
- e) Carácter actitudinal: $\alpha(W) = \sum_{j=1}^n w_j \left(\frac{n-j}{n-1}\right)$;
- f) Entropía: $H(W) = -\sum_{j=1}^n w_j \ln(w_j)$;
- g) Operador de balance: $Bal(W) = \sum_{j=1}^n \frac{(n+1-2j)}{n-1} w_j$;
- h) Grado de divergencia: $Div(W) = \sum_{j=1}^n w_j \left(\frac{n-j}{n-1} - \alpha(W)\right)^2$.

Tradicionalmente, en la teoría de la decisión han existido varios criterios que permiten hacer una elección de alternativa en situaciones de incertidumbre. Una característica destacada de estos criterios es que se desconoce el resultado final, por lo que la actitud del tomador de decisiones juega un rol

importante. A continuación se presentan algunos de estos criterios explicados por Casanovas et al. (2014):

- a) Optimista: $w_1 = 1$ y $w_j = 0, \forall j \neq 1$, i.e. $F(a_1, \dots, a_n) = \text{Max}\{a_j\}$;
- b) Pesimista: $w_n = 1$ y $w_j = 0, \forall j \neq n$, i.e. $f(a_1, \dots, a_n) = \text{Min}\{a_j\}$;
- c) Laplace: $w_j = \frac{1}{n}, \forall j \neq 1$ i.e. $f(a_1, \dots, a_n) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j$;
- d) Hurwicz: $w_1 = \alpha$ $w_n = 1 - \alpha$ y $w_j = 0, \forall j \neq 1$, i.e. $f(a_1, \dots, a_n) = \alpha \text{Max}\{a_j\} + (1 - \alpha) \text{Min}\{a_j\}$.

Dada la flexibilidad que proporciona este algoritmo para la obtención de vectores de peso se han propuestos diversas familias, tales como maximal entropy (Me-OWA) (O'Hagan, 1990), Step-OWA (Yager, 1993), Window-OWA (Yager, 1993), S-OWA (Yager, 1994), Olympic-OWA (Yager, 1996a) y E-Z-OWA (Yager, 2003) que han permitido desarrollar múltiples extensiones de este operador en combinación con otros algoritmos que permiten comparar e interrelacionar la información.

2.4. El operador Bonferroni-OWA.

En el campo de la teoría de la agregación se han desarrollado una gran cantidad de métodos para la toma de decisiones en incertidumbre (Blanco-Mesa et al., 2017). En este trabajo se estudiará el operador Bonferroni-OWA y algunas de sus extensiones para su aplicación en la toma de decisiones en incertidumbre.

La media de Bonferroni involucra el producto de cada uno de los argumentos con la media del resto de los argumentos, es decir, es la relación de dos medias aritméticas y el producto. Éste es un método simple que permite que se realicen una gran cantidad de argumentos o que se construyan intervalos de confianza mientras se asegura que se mantenga un coeficiente de confianza global (Bonferroni, 1950). Así, este método permite hacer múltiples comparaciones entre cada argumento de entrada y captura su interrelación (Blanco-Mesa et al., 2016). Este operador se define de la siguiente manera:

$$B(a_1, a_2, \dots, a_n) = \left(\frac{1}{n} \frac{1}{1-n} \sum_{j \neq k}^n a_j^q \right)^{\frac{1}{r+q}}, \quad (2)$$

Una regla fundamental para poder aplicar la media de Bonferroni es que los argumentos a deben ser mayores o iguales a 0 y que los parámetros r, q deben ser mayores o iguales a 0.

Yager (2009) propone un nuevo algoritmo que combina el operador OWA y la media de Bonferroni y sugiere una generalización de este operador. Este operador se define de la siguiente manera:

$$\text{BON} - \text{OWA}(a_1, \dots, a_n) = \left(\frac{1}{n} \sum_i a_i^r \text{OWA}_W(V^i) \right)^{\frac{1}{r+q}}, \quad (3)$$

La característica fundamental de este operador combina el de los operadores presentados anteriormente. Adicionalmente, el vector (V^i) contiene todos los argumentos a_j excepto los argumentos a_i .

2.5. Caso práctico de los operadores OWA y BON-OWA.

Para entender el funcionamiento de estos operadores y compararlos para observar sus resultados se presenta un ejemplo matemático ilustrativo. Este ejemplo sigue una secuencia de 5 pasos que permiten llevar el proceso de toma de decisión. Los pasos son los siguientes:

Paso 1: En este paso se determinan las alternativas y las características con las que se crearán los argumentos para ser ponderados.

Paso 2: Con las alternativas y las características determinadas se crea la matriz de argumentos a_i para ser ponderados.

Paso 3: En el paso tres se determina el vector de peso W para cada uno de los argumentos. Este vector de peso se puede determinar de múltiples maneras: de forma directa de acuerdo al criterio de un experto o grupo de expertos, usando la aproximación de O'Hagan (1990), la familia de funciones de unidad básica de intervalo monótonico (BUM, siglas en inglés para *Basic Unit-interval Monotonic*) (Yager, 2009) y la función $f(x) = x^r$ que hace referencia al carácter actitudinal del tomador de decisiones (Yager, 2009).

Paso 4: Se hace el tratamiento de la información obtenida con el operador seleccionado.

Paso 5: En este último paso se ordena la información, ya sea de forma descendente o ascendente según las características del operador usado, y se ordenan las alternativas para seleccionar aquella cuyo resultado sea mayor.

El caso de ejemplo a desarrollar es un problema de selección de personal para un cargo X y que tiene un número de candidatos C_n con un número de habilidades ya determinadas H_n . Como esas habilidades se pueden interrelacionar, se decide el uso del operador BON-OWA.

Paso 1. En un proceso de decisión se asume que ser un jefe de recursos humanos requiere completar el proceso de selección entre cinco candidatos C_1, C_2, C_3, C_4 y C_5 , y para ello necesita saber cómo se interrelacionan las siete habilidades exigidas: H_1 (Programación), H_2 (Matemáticas), H_3 (Diseño web), H_4 (Relaciones interpersonales), H_5 (Análisis), H_6 (Desarrollo de Software) y H_7 (Redes sociales), entre cada uno de ellos.

Paso 2. A partir de esta información se construye la matriz de ponderaciones de los argumentos a_i , que se asume que es obtenida por información previamente recolectada en pasos anteriores del proceso de selección (Tabla 1).

Tabla 1. Ponderaciones de las habilidades.

	H₁	H₂	H₃	H₄	H₅	H₆	H₇
C₁	0.5	0.4	0.5	1.0	1.0	0.8	0.4
C₂	0.7	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6	0.8
C₃	0.3	0.2	0.8	1.0	0.5	0.6	1.0
C₄	0.3	0.2	0.8	0.7	0.7	0.5	1.0
C₅	0.5	0.8	0.2	0.3	1.0	0.6	1.0

Fuente: Elaboración propia.

Paso 3. Asimismo, el jefe de personal determina la importancia de cada característica dentro del proceso de selección, que es el vector de peso α_i . Así, los vectores de peso para cada habilidad son los siguientes: $\alpha_1 = 0.9$ $\alpha_2 = 0.6$, $\alpha_3 = 0.7$ $\alpha_4 = 0.5$ $\alpha_5 = 0.7$ $\alpha_6 = 0.9$ $\alpha_7 = 0.6$.

Paso 4. Con la información de entrada disponible se realiza su tratamiento matemático. Para mostrar cómo se desarrolla el proceso se tomará las ponderaciones de las habilidades del candidato C_1 :

$$f_{C_1}(H_1, \dots, H_7) = (0.5) \times (0.9) + (0.4) \times (0.6) + (0.5) \times (0.7) + (1.0) \times (0.5) + (1.0) \times (0.7) + (0.8) \times (0.9) + (0.4) \times (0.6) = 3.2$$

El resultado para el candidato C_1 es **3.2**. Este procedimiento se lleva a cabo con cada uno de los candidatos restantes, los resultados obtenidos son los siguientes:

$$f_{C_2}(H_1, \dots, H_7) = 3.04 \quad f_{C_3}(H_1, \dots, H_7) = 3 \quad f_{C_4}(H_1, \dots, H_7) = 2.9 \quad f_{C_5}(H_1, \dots, H_7) = 3.22$$

Paso 5. Con los resultados definitivos se hace la ordenación de los candidatos en forma descendente, donde el primero es la opción de mayor preferencia para ocupar el cargo. La ordenación es la siguiente:

$$C_5 > C_1 > C_2 > C_3 > C_4$$

Para hacer la aplicación con el operador BON-OWA se definen los parámetros r y q , que son iguales a 1 para cada uno. En este caso, los primeros tres pasos son iguales para este operador. A continuación, se describe detalladamente el paso 4.

Paso 4. Se definen los vectores (V^i) para cada uno de los candidatos. Para mostrar cómo se hace, se tomarán las ponderaciones de las habilidades del candidato C_1 y se crearán los siete vectores:

$$C^1V^1 = (0.4 + 0.5 + 1.0 + 1.0 + 0.8 + 0.4) \quad C^1V^2 = (0.5 + 0.5 + 1.0 + 1.0 + 0.8 + 0.4)$$

$$C^1V^3 = (0.5 + 0.4 + 1.0 + 1.0 + 0.8 + 0.4) \quad C^1V^4 = (0.5 + 0.4 + 0.5 + 1.0 + 0.8 + 0.4)$$

$$C^1V^5 = (0.5 + 0.4 + 0.5 + 1.0 + 0.8 + 0.4) \quad C^1V^6 = (0.5 + 0.4 + 0.5 + 1.0 + 1.0 + 0.4)$$

$$C^1V^7 = (0.5 + 0.4 + 0.5 + 1.0 + 1.0 + 0.8)$$

El resultado de la suma de cada uno de los vectores se multiplica por su vector de peso, $OWA_W(C^1V^i) = \sum C^1V^i \times \alpha_i$. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$OWA_W(C^1V^1) = (0.4 \times 0.6) + (0.5 \times 0.7) + (1.0 \times 0.5) + (1.0 \times 0.7) + (0.8 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) = 2.75$$

$$OWA_W(C^1V^2) = (0.5 \times 0.9) + (0.5 \times 0.7) + (1.0 \times 0.5) + (1.0 \times 0.7) + (0.8 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) = 2.96$$

$$OWA_W(C^1V^3) = (0.5 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) + (1.0 \times 0.5) + (1.0 \times 0.7) + (0.8 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) = 2.85$$

$$OWA_W(C^1V^4) = (0.5 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) + (0.5 \times 0.7) + (1.0 \times 0.7) + (0.8 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) = 2.70$$

$$OWA_W(C^1V^5) = (0.5 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) + (0.5 \times 0.7) + (1.0 \times 0.5) + (0.8 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) = 2.50$$

$$OWA_W(C^1V^6) = (0.5 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) + (0.5 \times 0.7) + (1.0 \times 0.5) + (1.0 \times 0.7) + (0.4 \times 0.6) = 2.48$$

$$OWA_W(C^1V^7) = (0.5 \times 0.9) + (0.4 \times 0.6) + (0.5 \times 0.7) + (1.0 \times 0.5) + (1.0 \times 0.7) + (0.8 \times 0.9) = 2.96$$

El resultado obtenido es multiplicado por cada una de las ponderaciones de las habilidades y sumado, su total será dividido por número total de los argumentos tenidos en cuenta, BON –

$OWA(C^1H^1, \dots, C^1H^n) = \left(\frac{1}{n} \sum_i C^1H^i OWA_W(C^1V^i) \right)^{\frac{1}{r+q}}$. Los resultados obtenidos son:

$$BON - OWA(C^1H^1, \dots, C^1H^7)$$

$$= \left(\frac{((0.5 \times 2.75) + (0.4 \times 2.96) + (0.5 \times 2.85) + (1.0 \times 2.7) + (1.0 \times 2.5) + (0.8 \times 2.48) + (0.4 \times 2.96))}{7} \right)^{\frac{1}{1+1}}$$

$$BON - OWA(C^1H^1, \dots, C^1H^7) = \left(\frac{12.352}{7} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$BON - OWA(C^1H^1, \dots, C^1H^7) = (1.7645)^{\frac{1}{2}}$$

$$BON - OWA(C^1H^1, \dots, C^1H^7) = 1.3284$$

El resultado para el candidato C_1 es **1.3284**. Este procedimiento se lleva a cabo con cada uno de los candidatos restantes, los resultados obtenidos son los siguientes:

$$BON - OWA(C^2H^1, \dots, C^2H^7) = 1.2610$$

$$BON - OWA(C^3H^1, \dots, C^3H^7) = 1.2412$$

$$BON - OWA(C^4H^1, \dots, C^4H^7) = 1.1930$$

$$BON - OWA(C^5H^1, \dots, C^5H^7) = 1.2625$$

Paso 5. Con los resultados definitivos se hace la ordenación de los candidatos en forma descendente, donde el primero es la opción de mayor preferencia para ocupar el cargo. La ordenación es la siguiente:

$$C_1 > C_5 > C_2 > C_3 > C_4$$

A continuación, en la Tabla 2 se muestra la comparación de los resultados y las ordenaciones obtenidos por ambos operadores. Se evidencia que al usar el operador OWA la preferencia es el candidato C_5 y para el operador BON-OWA es C_1 . Estas diferencias se deben a las características de cada uno de los operadores. Por un lado, el operador OWA nos permite solamente agregar la información y asociarla con un vector de peso para obtener una ordenación de la opción más preferida a la menos preferida. Por otro lado, el operador BON-OWA no solamente nos permite agregar la

información y obtener su orden, sino que también establece la interrelación existente entre cada uno de los argumentos y hacer una comparación continua de los mismos. Por lo tanto, para nuestro ejemplo de selección de personal el operador BON-OWA nos permite obtener un resultado más robusto al establecer la interrelación y comparación continua de las habilidades de cada uno de los candidatos.

Tabla 2. Comparación de operadores.

Candidato	OWA	Ordenación	BON-OWA	Ordenación
<u>C₁</u>	3.20	2	<u>1.3283</u>	<u>1</u>
C ₂	3.04	3	1.2609	3
C ₃	3.00	4	1.2412	4
C ₄	2.90	5	1.1929	5
<u>C₅</u>	<u>3.22</u>	<u>1</u>	1.2601	2

Fuente: Elaboración propia.

Hasta este punto, se ha estudiado la teoría de toma de decisiones en incertidumbre y nos hemos enfocado particularmente en los operadores OWA y BON-OWA como métodos en la toma de decisiones en entornos inciertos. De estos operadores se han expuesto sus principales definiciones y características destacando su capacidad de agregación de información y de interrelación y comparación continua.

3. Caso de estudio.

Este trabajo pretende mostrar la relación entre las variables y examinar las asociaciones existentes entre ellas desde un método deductivo con el fin de obtener explicaciones particulares a partir de conclusiones generales. Bajo este método se busca explicar la relación entre las diferentes variables conexas con el propósito de analizar cómo los objetivos son priorizados en la toma de decisiones para la selección de productos a lanzarse al mercado. El caso es el siguiente:

La empresa mexicana XYZ (seudónimo utilizado porque la empresa solicitó guardar el anonimato), dedicada a la fabricación de fertilizantes agrícolas con inicios de actividad en 1984 y presencia a nivel nacional, desea realizar una inversión para poder lanzar al mercado un fertilizante cuya característica principal es ser amigable con el medio ambiente y disminuir los residuos que deja en la tierra, mantos acuíferos y canales de riego. Ante esta problemática, la alta dirección ha realizado un análisis de todas las alternativas que tienen respecto a esta temática y al final, no pueden decidirse entre 4, cuyas características cumplen con las necesidades básicas para salir al mercado. Sin embargo, no se cuenta con el capital, ni con la infraestructura física para poder comenzar la producción de los 4 productos al mismo tiempo, por lo que se debe tomar la decisión de qué producto comenzar a elaborar. Los pasos para determinar los resultados y el uso de los operadores BON-OWA serán los mismos que se detallaron en la sección 2.5 del artículo.

Paso 1. Para realizar esto, se seleccionaron 6 elementos a evaluar de cada producto, con el fin de que sean la base para la toma de decisiones. Estos elementos son.

$e_1 = \text{tamaño del mercado objetivo}$

$e_2 = \text{margen de utilidad del producto}$

$e_3 = \text{inversión de capital inicial}$

$e_4 =$ nivel de complejidad de desarrollo

$e_5 =$ número de personas necesarias para la nueva producción

$e_6 =$ tiempo de vida estimado en el mercado

El análisis de cada elemento es el siguiente:

- a. e_1 se considera como respuesta 1 cuando el mercado es regional o 2 cuando es nacional.
- b. e_2 la respuesta será 1 si aporta menos del 5% a la utilidad total de la compañía, 2 entre 5% y 10% y 3 en casos mayores al 10%.
- c. e_3 será 1 si la inversión inicial es mayor a 75 mil dólares, 2 entre 50 mil y 75 mil dólares y 3 mayores a 50 mil dólares.
- d. e_4 cuando el nivel de complejidad de desarrollo sea alto será 1, cuando sea medio es 2 y cuando sea bajo es 3.
- e. e_5 en caso de que el número de empleados para la nueva producción sea mayor a 20 es 1, 2 será entre 10-20 y menor a 10 es 3.
- f. e_6 la respuesta es 1 cuando el tiempo de vida es menor a 5 años, 2 cuando es entre 5 y 10 años y 3 en el caso de más de 10 años.

Paso 2. Teniendo en cuenta la información proporcionada por la alta dirección se puede observar que aquel producto cuya calificación sea la mayor será el que sea lanzado al mercado por encima de los otros. Posteriormente, el departamento de producción procedió a evaluar cada uno de los productos viables y los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Evaluación de los productos.

	P₁	P₂	P₃	P₄
e₁	1	1	1	2
e₂	2	3	3	2
e₃	3	3	2	2
e₄	3	2	3	2
e₅	2	2	2	3
e₆	3	3	2	2

Fuente: Elaboración propia.

Con la información presentada en la Tabla 3 se procedió a analizar de forma inicial mediante un promedio simple cada producto, obteniendo los siguientes resultados $P_1 = 2.33, P_2 = 2.50, P_3 = 2.16, P_4 = 2.16$. Esto implica que el orden es $P_2 > P_1 > P_3$ o P_4 . Siendo entonces P_2 el producto que debería salir al mercado. Sin embargo, la alta dirección decidió que no todos los elementos a evaluar tienen la misma importancia dentro de la evaluación, por lo que se decidió dar peso a cada elemento y posteriormente analizarse a través de los operadores de agregación de información.

Paso 3. Se determinan los vectores de peso W_i para cada uno de los argumentos.

La alta dirección ha determinado que los pesos para cada uno de los elementos a evaluar son los siguientes (Tabla 4).

Tabla 4. Peso de los elementos.

Elementos	Peso
e ₁	0.10
e ₂	0.25
e ₃	0.25
e ₄	0.10
e ₅	0.20
e ₆	0.10

Fuente: Elaboración propia.

Paso 4. Con las ponderaciones y los vectores de peso definidos se procede al tratamiento de la información usando la media ponderada, el operador OWA y el operador BON-OWA. Los resultados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados utilizando distintos operadores de agregación de información.

	Media ponderada	OWA	BON-OWA
P ₁	2.30	2.60	1.40
P ₂	2.30	2.70	1.39
P ₃	2.35	2.40	1.43
P ₄	2.25	2.25	1.39

Fuente: Elaboración propia.

Paso 5. Con los resultados obtenidos se procede a hacer la ordenación de los objetivos y observar su preferencia.

Con los resultados obtenidos contamos con 4 diferentes operadores para analizar los resultados cuyo ordenamiento se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Ordenamiento utilizando distintos operadores de agregación de información.

Operador	Ordenación
Media	$P_2 > P_1 > P_3 > P_4$
Media ponderada	$P_3 > P_1 > P_2 > P_4$
OWA	$P_2 > P_1 > P_3 > P_4$
BON-OWA	$P_3 > P_1 > P_2 > P_4$

Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados y discusión.

A través de lo observado en la Tabla 6 se analiza que existen dos operadores (Media y OWA) que seleccionan a P_2 como la opción más viable a trabajar y dos operadores (Media ponderada y BON-OWA) indican que debería ser P_3 . De tal forma y considerando que el operador BON-OWA es el que incluye mayor información dentro de los resultados se puede afirmar que la opción P_3 es aquel producto

que debería salir al mercado. Un dato importante también se pudiera obtener si sumamos la calificación de las ordenaciones para cada producto, en donde se daría la calificación de 4 cuando sea primer lugar a 1 cuando sea cuarto lugar; mediante esta técnica obtenemos que $P_1 = 12, P_2 = 13, P_3 = 12, P_4 = 7$.

Con estos resultados podemos observar primero que de forma general el mejor producto para lanzar al mercado sería P_2 ; además un dato interesante es que aun cuando nunca fue seleccionado como la mejor opción P_1 se identifica como un producto de igual importancia que P_3 en relación a su calificación general. Finalmente, consideramos que el uso de este tipo de operadores genera una visión global de las posibilidades y dependiendo de lo que se desee analizar podríamos seleccionar una opción u otra, demostrando de forma clara cómo las decisiones empresariales cuentan con un grado elevado de incertidumbre. De tal forma que, cambiando un factor de mercado o elemento dentro de la toma de decisiones éstas pueden alterarse, por lo que visualizar todos los escenarios permite mejorar las posibilidades de éxito de la decisión seleccionada y así permitir a la organización una mejor rentabilidad y permanencia dentro del mercado.

5. Conclusiones.

En el presente trabajo se ha estudiado la toma de decisiones en entornos inciertos. La teoría de toma de decisiones en incertidumbre se fundamenta en la aplicación de las matemáticas difusas en la toma de decisiones. En ese sentido, se hace una revisión de la evolución de la toma de decisiones difusas desde el racionamiento aproximado hasta los operadores de agregación. Dentro de los diferentes métodos propuestos para la toma de decisiones se ha profundizado en el operador OWA y en una de sus extensiones llamado el operador Bonferroni OWA. Este operador se caracteriza por hacer una agregación continua e interrelacionada de la información y obtener una ordenación de ésta al final del procedimiento. Para entender este proceso se presentan dos ejemplos numéricos que indican el paso a paso de los métodos.

Para observar la aplicación de este método se lleva a cabo un estudio de caso para la toma de decisiones estratégicas en la selección de productos para lanzar al mercado de una empresa mexicana. Mediante el uso de diferentes operadores de agregación de información se encontró que dependiendo de cuál se utilice, las opciones más viables se encontraban entre P_3 y P_2 . Sin embargo, considerando que el operador que incluye mayor información a la hora de generar los resultados es el BON-OWA, se recomienda a la organización lanzar al mercado P_3 . A través de este análisis, se puede observar cómo las decisiones dentro del mundo empresarial cuentan con incertidumbre, por lo que el uso de diferentes herramientas que sean adaptables y permitan visualizar mejor los escenarios existentes con el uso de operadores OWA y sus extensiones es recomendable.

En conclusión, se estudió de manera holística una metodología novedosa sobre toma de decisiones estratégicas en incertidumbre, que nos permitió integrar conceptos de la teoría administrativa y la teoría de la agregación en un caso aplicado en el que se destaca más la importancia de la información y no su medición.

Finalmente, para futuras líneas de investigación se realizará el análisis de diferentes decisiones empresariales a través de operadores de agregación de información como es el caso de decisiones financieras, legales, en ingeniería, económicas y demás, relacionadas con las diferentes áreas empresariales (Laengle et al., 2017). Adicionalmente, se planteará la extensión de los operadores de OWA mediante el uso de medias móviles (León et al., 2016; 2018a), operadores priorizados (Avilés-Ochoa et al, 2018), logaritmos (Alfaro-García et al., 2018), entre otros.

Referencias

- Alfaro-García, V.G., Merigó, J.M., Gil-Lafuente, A.M., & Kacprzyk, J. (2018). Logarithmic aggregation operators and distance measures. *International Journal of Intelligent Systems*, 33(7), 1488-1506.
- Avilés-Ochoa, E., León-Castro, E., Perez-Arellano, L.A., & Merigó, J.M. (2018). Government transparency measurement through prioritized distance operators. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(4), 2783-2794.
- Bellman, R.E., & Zadeh, L.A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, 17(4), p.B-141-B-164.
- Blanco-Mesa, F., Gil-Lafuente, A.M., & Merigó, J.M. (2015). New aggregation methods for decision-making in the selection of business opportunities. In J. Gil-Aluja et al., eds. *Scientific Methods for the Treatment of Uncertainty in Social Science*. Girona: Springer International Publishing, pp. 3-18.
- Blanco-Mesa, F., Merigó, J.M., & Kacprzyk, J. (2016). Bonferroni means with distance measures and the adequacy coefficient in entrepreneurial group theory. *Knowledge-Based Systems*, 111(1), 217-227.
- Blanco-Mesa, F., Merigó, J.M., & Gil-Lafuente, A.M. (2017). Fuzzy decision making: a bibliometric-based review. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 32(3), 2033-2050.
- Blanco-Mesa, F., Gil-Lafuente, A.M., & Merigó, J.M. (2018a). New aggregation operators for decision-making under uncertainty: an applications in selection of entrepreneurial opportunities. *Technological and Economic Development of Economy*, 24(2), 335-357.
- Blanco-Mesa, F., Gil-Lafuente, A.M., & Merigo, J.M. (2018b). Dynamics of stakeholder relations with multi-person aggregation. *Kybernetes*, 47(9), 1801-1820.
- Blanco-Mesa, Fabio, Gil-Lafuente, A.M., & Merigó, J.M. (2018c). Subjective stakeholder dynamics relationships treatment: a methodological approach using fuzzy decision-making. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 24(4), 441-472.
- Blanco-Mesa, Fabio, Rivera-Rubiano, J., Patiño-Hernandez, X., & Martinez-Montaña, M. (2019). The importance of enterprise risk management in large companies in Colombia. *Technological and Economic Development of Economy*, 1-34. DOI: 10.3846/tede.2019.9380.
- Bonferroni, C. (1950). Sulle medie multiple di potenze. *Bollettino dell'Unione Matematica Italiana*, 5(3-4), 267-270.
- Boran, F. E., Genç, S., Kurt, M., & Akay, D. (2009). A multi-criteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method. *Expert Systems with Applications*, 36(8), 11363-11368.
- Brijs, K., Vanhoof, K., Brijs, T., & Karlis, D. (2006). Using fuzzy set theory to assess country-of-origin effects on the formation of product attitude. In V. Torra et al. (eds.). *Modeling Decisions for Artificial Intelligence*. Tarragona: Springer Berlin Heidelberg, pp. 138-149.
- Canós, L., & Liern, V. (2008). Soft computing-based aggregation methods for human resource management. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 669-681.

- Canós, L., Casasús, T., Liern, V., & Pérez, J.C. (2014). Soft computing methods for personnel selection based on the valuation of competences. *International Journal of Intelligent Systems*, 29(12), 1079-1099.
- Casanovas, M., Merigó, J.M. & Torres-Martínez, A. (2014). *Inteligencia computacional en la gestión del riesgo asegurador: Operadores de agregación OWA en procesos de tarificación*, Madrid: Fundación MAPFRE.
- Chen, C.T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9.
- Chen, S. M., & Tan, J. M. (1994). Handling multicriteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory. *Fuzzy sets and systems*, 67(2), 163-172.
- Chen, S.J. & Hwang, C.L. (1992). *Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Doskócil, R. (2015). Fuzzy logic: An instrument for the evaluation of project status. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 19, 5-23.
- Garg, H. (2016). A novel correlation coefficients between Pythagorean fuzzy sets and its applications to decision-making processes. *International Journal of Intelligent Systems*, 31(12), 1234-1252.
- Gil-Aluja, J. (1996). Towards a new paradigm of investment selection in uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 84(2), 187-197.
- Gil-Aluja, J. (1999). *Elements for a theory of decision in uncertainty* (Vol. 32). Springer Science & Business Media.
- Harsanyi, J.C. (1955). Cardinal welfare, individualistic ethics, and interpersonal comparisons of utility. *Journal of Political Economy*, 63(4), 309-321.
- Hong, D.H., & Choi, C.H. (2000). Multicriteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 103-113.
- Hwang, C.-L. & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Klir, G.J., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications* (Vol. 574). New Jersey: Prentice Hall PTR.
- Laengle, S., Loyola, G., Merigó, J.M. (2017). Mean-variance portfolio selection with the ordered weighted average, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 25(2), 350-362.
- León-Castro, E., Avilés-Ochoa, E., & Gil-Lafuente, A.M. (2016). Exchange rate USD/MXN forecast through econometric models, time series and HOWMA operators. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 50(4), 135-150.
- León-Castro, E., Avilés-Ochoa, E., & Merigó, J.M. (2018b). Induced heavy moving averages. *International Journal of Intelligent Systems*, 33(9), 1823-1839.
- León-Castro, E., Avilés-Ochoa, E., Merigó, J.M., & Gil-Lafuente, A.M. (2018a). Heavy moving averages and their application in econometric forecasting. *Cybernetics and Systems*, 49(1), 26-43.

- Lin, L., Yuan, X.H., & Xia, Z.Q. (2007). Multicriteria fuzzy decision-making methods based on intuitionistic fuzzy sets. *Journal of computer and System Sciences*, 73(1), 84-88.
- Llopis, A., & Palacios-Marqués, D. (2017). Applications of ordered weighted averaging (OWA) operators in environmental problems. *Multidisciplinary Journal for Education, Social and Technological Sciences*, 4(1), 52-63.
- Merigó, J.M., & Casanovas, M. (2010). The fuzzy generalized OWA operator and its application in strategic decision making. *Cybernetics and Systems*, 41(5), 359-370.
- Merigó, J.M., & Gil-Lafuente, A.M. (2006). Using OWG operators in the selection of financial products. *Lectures on Modelling and Simulation*, 7(3), 49-55.
- Merigó, J.M., & Gil-Lafuente, A.M. (2007). Unification point in methods for the selection of financial products. *Fuzzy economic review*, 12(1), 35-50.
- Merigó, J.M., & Gil-Lafuente, A.M. (2008). The generalized adequacy coefficient and its application in strategic decision making. *Fuzzy Economic Review*, 13(2), 17-36.
- Merigó, J.M., & Gil-Lafuente, A.M. (2010). New decision-making techniques and their application in the selection of financial products. *Information Sciences*, 180(11), 2085-2094.
- Merigó, J.M., & Gil-Lafuente, A.M. (2011). OWA operators in human resource management. *Economic computation and economic cybernetics studies and research*, 45(2), 153-168.
- Merigó, J.M., & Gil-Lafuente, A.M. (2012). A method for decision making with the OWA operator. *Computer Science and Information Systems*, 9(1), 357-380.
- Merigó, J.M. (2015). Decision-making under risk and uncertainty and its application in strategic management. *Journal of Business Economics and Management*, 16(1), 93-119.
- O'Hagan, M. (1990). Using maximum entropy-ordered weighted averaging to construct a fuzzy neuron. In *Proceedings of the 24th Annual IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, pp. 618-623.
- Ortigosa-Hernández, M., & Gil-Lafuente, A.M. (2016). Metodología para elaborar leyes de posibilidad de retirada del cliente: una aplicación al sector del vestido. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 22, 139-163.
- Pérez-Arellano, L.A., León-Castro, E., Avilés-Ochoa, E., & Merigó, J.M. (2019). Prioritized induced probabilistic operator and its application in group decision making. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 10 (3), 451-462.
- Tzeng, G.-H. & Huang, J.-J. (2011). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*, Boca Raton: Chapman and Hall/CRC.
- Vigier, H.P., Scherger, V., & Terceño, A. (2017). An application of OWA operators in fuzzy business diagnosis. *Applied Soft Computing Journal*, 54, 440-448.
- Wei, G.W., & Merigó, J.M. (2012). Methods for strategic decision-making problems with immediate probabilities in intuitionistic fuzzy setting. *Scientia Iranica*, 19(6), 1936-1946. DOI: 10.1016/j.scient.2012.07.017.

- Xu, Z. (2008). Hybrid weighted distance measures and their application to pattern recognition. In C. Fyfe et al., eds. *Intelligent Data Engineering and Automated Learning-IDEAL 2008*. Daejeon: Springer Berlin Heidelberg, pp. 17-23.
- Xu, Z. (2015). *Uncertain multi-attribute decision-making: Methods and applications*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Yager, R.R. (1988). On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision-making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18(1), 183-190.
- Yager, R.R. (1993). Families of OWA operators. *Fuzzy Sets and Systems*, 59(2), 125-148.
- Yager, R.R. (1994). Interpreting linguistically quantified propositions. *International Journal of Intelligent Systems*, 9(6), 541-569.
- Yager, R.R. (1996a). Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 11(1), 49-73.
- Yager, R.R. (1996b). On the inclusion of variance in decision making under uncertainty. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 4(5), 401-419.
- Yager, R.R. (2002). Heavy OWA operators. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 1(4), 379-397.
- Yager, R.R. (2003). E-Z OWA weights. In *10th IFSA World Congress*. Istanbul, pp. 39-42.
- Yager, R.R. (2006). Generalizing variance to allow the inclusion of decision attitude in decision making under uncertainty. *International Journal of Approximate Reasoning*, 42(3), 137-158.
- Yager, R.R. (2009). On generalized Bonferroni mean operators for multi-criteria aggregation. *International Journal of Approximate Reasoning*, 50(8), 1279-1286.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zadeh, L.A. (1975a). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I. *Information Sciences*, 8, 199-249.
- Zadeh, L.A. (1975b). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning II. *Information Sciences*, 8(4), 301-357.
- Zadeh, L.A. (1975c). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning III. *Information Sciences*, 9(1), 43-80.
- Zadeh, L.A. (1999). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 100(1), 9-34.
- Zeng, S.Z., & Su, W. (2015). Extended vikor method based on induced aggregation operators for intuitionistic fuzzy financial decision-making. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 49(4), 289-303.
- Zimmermann, H.J. (1978). Results of Empirical Studies in Fuzzy Set Theory. In: Klir G.J. (eds). *Applied General Systems Research*. NATO Conference Series, vol 5. Springer, Boston, MA. DOI: 10.1007/978-1-4757-0555-3_21.



Evaluación de la eficiencia del gasto social en los países EU15 con análisis envolvente de datos y métodos cluster borrosos

DE ANDRÉS SÁNCHEZ, JORGE

Cátedra de Inclusión Social Social & Business Research Laboratory (SBRLab)
Universidad Rovira i Virgili
Correo electrónico: jorge.deandres@urv.cat

BELZUNEGUI ERASO, ÁNGEL GABRIEL

Cátedra de Inclusión Social Social & Business Research Laboratory (SBRLab)
Universidad Rovira i Virgili
Correo electrónico: angel.belzunegui@urv.cat

VALLS FONAYET, FRANCESC

Cátedra de Inclusión Social Social & Business Research Laboratory (SBRLab)
Universidad Rovira i Virgili
Correo electrónico: francesc.valls@urv.cat

RESUMEN

En el estudio de los sistemas de bienestar la relación entre el gasto social y los indicadores de vulnerabilidad como la tasa de pobreza o índices de desigualdad de ingresos tienen gran interés en la literatura. Este trabajo evalúa la productividad del gasto social de los estados de la EU15 (los estados de bienestar más consolidados de la EU28), en el período 2011-2015, con metodología Análisis Envolvente de Datos. Posteriormente, con un método clustering difuso identificamos los patrones existentes de gasto social y su eficiencia. Observamos tres grupos de países. El primero engloba la mayor parte de estado del bienestar nórdico y continental. El segundo grupo, conformado por Luxemburgo e Irlanda, son países con el menor volumen de gastos social sobre PIB pero a la vez son países eficientes. El tercero engloba a los estados del bienestar mediterráneos, junto con Gran Bretaña, que son los menos eficientes en la reducción de los indicadores de vulnerabilidad.

Palabras clave: desigualdad de rentas, pobreza, frontera eficiente, análisis envolvente de datos, clustering borroso.

Clasificación JEL: C49; F02; H50; H53.

MSC2010: 03E72; 62A86; 90C08.

Evaluation of the efficiency of social spending in EU15 countries with data envelopment analysis and fuzzy clustering methods

ABSTRACT

In the study of welfare systems, the relation of the social expenditure and the indicators of vulnerability as poverty rates or income inequality indexes focus a great interest in the literature. In this way, we evaluate the productivity of social transfer policies of EU15 states, which are the countries with more consolidated Welfare States within EU28, during the period 2011-2015, with data envelopment analysis. Subsequently, with a fuzzy clustering method we identify the existing patterns of social expenditures and their efficiency. We identify three groups. The first of them embeds most of the Nordic and continental welfare states. The second group is only made up with Luxembourg and Ireland, that are the countries with the lowest social spending but at the same time, they are within the group of efficient countries. The third group is made up of Mediterranean welfare states and United Kingdom and they are the less efficient countries in reducing vulnerability indexes.

Keywords: income inequality, poverty risk, efficient frontiers, data envelopment analysis, fuzzy clustering.

JEL classification: C49; F02; H50; H53.

MSC2010: 03E72; 62A86; 90C08.



1. Introducción.

Un aspecto de interés en el análisis de sistemas de bienestar es la relación entre el volumen del gasto social (GS) y los indicadores de vulnerabilidad, como el riesgo de pobreza y el índice de desigualdad de rentas (índice Gini). Es necesario constatar la existencia de diferentes orientaciones en las políticas sociales según los países, dependiendo de las problemáticas sociales concretas, de las políticas sociales preexistentes, los sistemas de regulación del empleo y, más genéricamente, del estado del bienestar (EB). La Tabla 1 muestra que los países con mayor volumen de gasto social en relación al PIB son aquellos que presentan menor riesgo de pobreza después de prestaciones sociales. Son abundantes los estudios empíricos que han puesto de manifiesto la fuerte relación negativa entre el GS y la pobreza y la desigualdad de ingresos, como por ejemplo en Cantillon et al. (1997), Bradbury y Jäntti (2001), Atkinson (2000), Beblo y Knaus (2001), Oxley et al. (2001).

Cantillon, Marx y Van den Bosch (2002) ponen de manifiesto que a pesar de la existencia de una fuerte correlación negativa entre gasto social y tasas de pobreza para diferentes países europeos, no se puede derivar un camino directo consistente en aumentar el gasto social para reducir la pobreza. Los autores realizan una simulación a partir de los datos del Luxembourg Income Study y sugieren que invertir más dinero en sistemas de transferencia social tendría resultados desiguales en la disminución del riesgo de pobreza en función del país. Si el gasto social fuera el único camino para reducir la pobreza, las recomendaciones políticas serían simples: aumentar el gasto (y/o mejorar su focalización en los países en los que ya es grande). La expansión del gasto no siempre tendría un fuerte efecto en la rebaja de las tasas de pobreza. La convergencia de los gastos sociales no produciría automáticamente una convergencia de las tasas de pobreza y este fenómeno sería más evidente en el caso de países como España e Italia, según la simulación realizada. Los autores sugieren que para el caso de España e Italia, las transferencias sociales aumentadas podrían ir a parar en forma de ingresos a las capas sociales intermedias y no pobres. Además, una distribución muy desigual de los salarios o un gran volumen de salarios precarios podrían hacer más difícil la redistribución de rentas. El efecto marginal de más gasto difiere considerablemente de un país a otro y no siempre es lineal.

Vandenbroucke y Vleminckx (2011) advierten que factores como la *re-commodification* o la *resource competition* en los nuevos Estados de bienestar, pueden cuestionar la relación existente entre gasto social y la lucha contra la pobreza, en la medida en que forman parte de la nueva configuración de las sociedades postindustriales y del papel que debe jugar el estado, las empresas y las entidades sociales como proveedores de bienestar. De manera similar, Cantillon (2011) cuestiona la estrategia de Lisboa argumentando que las transferencias monetarias dirigidas a personas sin trabajo no han tenido los efectos esperados y que las políticas redistributivas tampoco han sido suficientemente eficaces para paliar la pobreza. Varios estudios han manifestado el alcance limitado de las políticas de asistencia social, como Cincinnato y Nicaise (2009) para el caso de Bélgica, Bogdanov y Zahariev (2009), para Bulgaria, Anker et al. (2009) en Dinamarca, Ruoppila y Lamminmäki (2009) en Finlandia, Legros (2009) en Francia, Radu (2009) en Rumanía, Nelson (2003) en Suecia, Finn et al. (2008) en el Reino Unido.

Las consideraciones anteriores motivan el objetivo del presente trabajo, que evalúa la eficiencia del gasto social de los Estados que forman parte de la Unión Europea desde antes del 2000 (EU15) en la reducción de pobreza y la desigualdad de rentas durante el periodo 2011-2015. Tal como indican Afonso et al. (2010), existe una amplia literatura sobre eficiencia de políticas de gasto público, pero sobre todo en sanidad y enseñanza. Podemos remarcar Gupta y Verhoeven (2001), Clements (2002), Afonso y St Aubyn (2004, 2006), Herrera y Pang (2005), Agasisti y Johnes (2010) o Kapsoli y Teodoru (2017). Sin embargo, en nuestro caso buscamos determinar hasta qué punto los resultados alcanzados en reducción de la pobreza y desigualdad, que serán los outputs evaluados, se corresponde con el gasto social medido en relación al PIB y la situación inicial de la situación de vulnerabilidad analizada antes de gasto (inputs). Así, nuestro trabajo iría en la línea del trabajo de Afonso et al. (2010), elaborado para los países del ámbito de la OCDE y con datos del año 2000.

En la EU15 se diferencian las siguientes tipologías de estado del bienestar: el modelo nórdico, (Dinamarca, Finlandia, Suecia y los Países Bajos), el modelo continental (Austria, Bélgica, Francia, Alemania y Luxemburgo), el modelo anglosajón (Irlanda y el Reino Unido) y el modelo mediterráneo (Grecia, Italia, Portugal y España). Con el objetivo de validar si la clasificación de los EB realmente se acomoda a la evidencia empírica referente al esfuerzo en gasto social y su efectividad en la disminución de los índices de vulnerabilidad realizamos un análisis clúster. En este análisis utilizaremos un enfoque de fuzzy clustering (Bezdek, 1981) en lugar de las metodologías de clustering más convencionales. Cuando usamos un algoritmo cluster k-means convencional todos los elementos analizados obligatoriamente se clasifican exclusivamente en un clúster. No obstante, en los fenómenos sociales la pertenencia exclusiva a una determinada tipología es normalmente irreal y simplificadora. Así, citando a Kandel (1982) la principal relación entre la teoría de los subconjuntos borrosos y los problemas de reconocimiento de patrones y clasificación recae en que en los problemas reales la mayor parte de categorías son difusas por naturaleza. Con fuzzy clustering podremos captar la posible ambigüedad de algunos estados al intentarlos clasificar en una única tipología, pero también reflejará la pertenencia inequívoca de otros a un grupo concreto.

El trabajo se ha estructurado de la siguiente manera: después de la introducción, se presentan los datos empleados en el análisis y se realiza un primer análisis descriptivo de sus relaciones. Posteriormente, la metodología utilizada para calcular la productividad del gasto social y la aplicación a los países EU15. A continuación, se realiza un análisis clúster que lleva a detectar las principales tipologías en el binomio gasto social/productividad en la reducción de los índices de vulnerabilidad. Finalmente, se presentan las principales conclusiones que se extraen del análisis.

2. Base de datos y análisis descriptivo de las relaciones entre gasto social e indicadores de vulnerabilidad.

El análisis se basa en datos de Eurostat relativos al periodo 2011 a 2015 (Tabla 1). El riesgo de pobreza antes de ejecutarse prestaciones sociales (a efectos de aligerar la lectura, se asimilan los conceptos de transferencias sociales y prestaciones sociales) y el índice de Gini antes de realizarse estas prestaciones presentan correlación positiva y significativa ($r_{x,y} = 0,617$). En lo que respecta al índice de Gini y el riesgo de pobreza después de prestaciones, la correlación es significativa y alta ($r_{x,y} = 0,883$) (Tabla 2). El riesgo de pobreza antes de prestaciones (RPa) y su valor después (RPp) están altamente correlacionados ($r_{x,y} = 0,831$). Una correlación positiva, pero no tan alta, también la observamos entre el índice de Gini antes de prestaciones (IGa) y después de estas (IGp) ($r_{x,y} = 0,563$). Tal como podíamos esperar, la correlación entre el nivel de GS y RPp e IGp es negativa y significativa, al menos, con un nivel del 10%: en ambos casos la correlación se sitúa en $-0,527$ y $-0,466$.

Tabla 1. Datos de partida para la evaluación de la eficiencia del gasto social en relación a la reducción de la pobreza en los países de la UE (15) referentes al periodo 2011-2015.

	<i>GS</i>	<i>RPa</i>	<i>RPp</i>	<i>IGa</i>	<i>IGp</i>
Francia	33,64	44,34	13,66	50,1	29,66
Dinamarca	32,34	40,84	12,02	51,62	27,22
Finlandia	30,72	42,68	12,36	47,24	25,5
Holanda	30,7	37,84	11,28	45,88	26,06
Bélgica	29,98	43,02	15,26	47,84	26,16
Italia	29,48	45,78	19,74	48,96	32,62

Austria	29,46	44,26	14,18	47,36	27,32
Suecia	29,24	44,54	15,86	56,62	26,64
Alemania	28,88	43,66	16,42	56,08	29,66
Reino Unido	28,44	44,04	16,24	54,68	31,4
Grecia	26,8	52,24	22,18	60,18	34,34
Portugal	26,48	46,8	18,92	59,36	34,22
España	25,32	46,12	21,56	50,08	34,34
Luxemburgo	22,42	45	15,84	48,44	29,32
Irlanda	22,1	47,72	16,32	52,5	30,32

Los países están ordenados según el Gasto social (*GS*).

RPp: Riesgo de pobreza después de prestaciones 2011-2015 (base 100)

RPa: Riesgo de pobreza antes de prestaciones 2011-2015 (base 100)

GS: Gasto social como porcentaje del PIB 2011-2015

IGp: Índice de Gini después de prestaciones 2011-2015 (base 100)

IGa: Índice de Gini antes de prestaciones 2011-2015 (base 100)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

Tabla 2. Correlaciones entre las diferentes variables empleadas en el estudio de la pobreza y su significación.

	<i>RPp</i>	<i>RPa</i>	<i>IGp</i>	<i>IGa</i>	<i>GS</i>
<i>RPp</i>	1				
<i>RPa</i>	0,8308 (4,611 ^{***})	1			
<i>IGp</i>	0,8839 (5,396 ^{***})	0,7414 (3,693 ^{***})	1		
<i>IGa</i>	0,5501 (2,396 ^{**})	0,6179 (2,795 ^{***})	0,5630 (2,468 ^{**})	1	
<i>GS</i>	-0,5273 (-2,271 ^{**})	-0,5529 (-2,411 ^{**})	-0,4657 (-1,954 [*])	-0,2308 (-0,910)	1

Nota: Entre paréntesis el valor del estadístico *z* de prueba y con “***”, “**”, “*” se denota la significación estadística del coeficiente de correlación con un nivel de significación estadística del 1%, 5% y 10% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

A partir de los datos de la Tabla 1 se miden los resultados conseguidos en políticas de reducción de los índices de vulnerabilidad en términos absolutos. La reducción absoluta del riesgo de pobreza (*RAP*) se expresa:

$$RAP = IPa - IPp \quad (1)$$

De manera análoga se mide la reducción de la desigualdad en el reparto de la renta en términos absolutos (*RAG*):

$$RAG = IGa - IGp \quad (2)$$

La Tabla 3 recoge la posición (rango) que ocupa cada país de EU15 en cuanto a *RAP* y a *RAG*. Aquí se evalúa únicamente el resultado final del *GS* en la reducción de la pobreza y la desigualdad, sin ponderar el *GS* ni la situación de los indicadores antes de ejecutar el mismo. Los rangos correspondientes a *RAP* y *RAG* están correlacionados con baja intensidad; efectivamente, no generan jerarquías idénticas y, en cualquier caso, las correlaciones obtenidas (tanto de Pearson como de

Spearman) no son significativas. Así, mientras que hay países que tienen un rango destacable en *RAP* y uno más discreto en *RAG* (Francia, Luxemburgo y Austria), otros, como Reino Unido, Alemania y Portugal presentan el comportamiento contrario. Finalmente, España o Italia tienen una jerarquía similar en ambos indicadores. Así pues, la correlación positiva pero no significativa de ambas variables, *RAP* y *RAG*, ofrece la idea de cierta relación entre las magnitudes, pero en absoluto elevada.

Tabla 3. Jerarquía de países según la reducción absoluta del riesgo de pobreza y del índice de Gini (*RAP* y *RAG*) y rangos de la reducción, en el periodo 2011-2015.

	<i>RAP</i>	<i>RAG</i>	<i>Rango RAP</i>	<i>Rango RAG</i>
Alemania	27,24	26,42	12	2
Austria	30,08	20,04	4	11
Bélgica	27,76	21,68	11	9
Dinamarca	28,82	24,4	7	5
España	24,56	15,74	15	15
Finlandia	30,32	21,74	3	8
Francia	30,68	20,44	2	10
Grecia	30,06	25,84	5	3
Holanda	26,56	19,82	13	12
Irlanda	31,4	22,18	1	7
Italia	26,04	16,34	14	14
Luxemburgo	29,16	19,12	6	13
Portugal	27,88	25,14	9	4
Reino Unido	27,8	23,28	10	6
Suecia	28,68	29,98	8	1

Nota: La correlación de Pearson entre *RAP* y *RAG* es 0,3397 y la de Spearman 0,2393 y en ambos casos no son significativas.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

3. Evaluación de la eficiencia del gasto social en la reducción de la pobreza y la desigualdad de rentas.

3.1. Obtención de fronteras productivas mediante el análisis envolvente de datos.

El análisis de la eficiencia del gasto social se lleva a cabo con la técnica de Análisis Envolvente de Datos (DEA, Data Envelopment Analysis), propuesto en el clásico trabajo de Charnes et al. (1978). Esta metodología permite valorar la eficiencia de las políticas de los países de la EU15 respecto a la reducción de la desigualdad de rentas y la pobreza, tanto individualmente como considerando conjuntamente ambos objetivos. Se trata seguramente de la técnica analítica más ampliamente utilizada en análisis de productividad, como ponen de manifiesto Liu et al. (2013) y Emrounejad y Yang (2018). Es amplia literatura sobre la eficiencia de políticas públicas aplicando DEA, sobre todo en los ámbitos de sanidad, enseñanza e investigación. Al respecto, destacan los trabajos de Gupta y Verhoeven (2001), Clements (2002), Afonso y St. Aubyn (2004, 2006), González-Pérez et al. (2007), Coccia et al. (2015), Kapsoli y Teodoru (2017) y Anderson et al. (2017). En cambio, escasean los trabajos en el ámbito concreto que nos ocupa, la eficiencia del gasto social en la disminución de los indicadores de vulnerabilidad. Como trabajo más relevante se puede destacar Afonso et al. (2010), realizado con datos de principios del XXI del *Luxemburg Income Study*. En nuestro caso utilizamos datos más actualizados y nos centramos en los países de la EU15.

El análisis DEA parte de que el conjunto de n unidades decisoras (UD) evaluadas producen R outputs a partir de J inputs. Así, denotamos como y_{ri} a la cantidad de output del tipo r producido por la i -ésima unidad decisor, donde $i = 1, 2, \dots, n$, y $r = 1, 2, \dots, R$ mientras que x_{ji} es la cantidad de input j utilizado por dicha UD siendo $j = 1, 2, \dots, J$. El trabajo clásico de Charnes et al. (1978) asigna como ratio de eficiencia para la unidad productiva o -ésima θ_o al valor máximo del ratio de productividad, $\theta = \frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{ro}}{\sum_{j=1}^J v_j x_{jo}}$. Así, para medir la productividad de la unidad productiva o -ésima debemos resolver el programa matemático:

$$\max_{u_r, v_j} \theta = \frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{ro}}{\sum_{j=1}^J v_j x_{jo}}$$

sujeto a:

$$\frac{\sum_{r=1}^R u_r y_{ri}}{\sum_{j=1}^J v_j x_{ji}} \leq 1, i=1, 2, \dots, n$$

$$u_r > 0, r = 1, 2, \dots, R; v_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

Este programa matemático, a priori planteado como programa fraccional, puede transformarse en un programa lineal, sin más que suponer que $\sum_{j=1}^J v_j x_{jo} = 1$ y transformar las n restricciones del ratio de productividad de cada país por $\sum_{r=1}^R u_r y_{ri} - \sum_{j=1}^J v_j x_{ri} \leq 0, i=1, 2, \dots, n$. Así, si en programa de maximización $\theta_o = 1$, no podemos descartar que la unidad de decisión evaluada sea eficiente respecto al resto de la muestra mientras que si $\theta_o < 1$ no hay ninguna duda de que la o -ésima unidad decisor es ineficiente. Según Sherman y Zhu (2006), el método DEA da a las UD el “beneficio de la duda” en el sentido en que el programa matemático (3) busca obtener los pesos u_r y v_j de tal manera que la unidad productiva evaluada sea presentado como lo más eficiente posible en comparación del resto de UD.

Es más habitual resolver el programa (3) a partir del programa dual asociado a (3). Éste se plantea como:

$$\min_{\theta, \lambda_i} \theta$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ji} \leq \theta x_{jo}, j = 1, 2, \dots, J$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i y_{ri} \leq y_{ro}, r = 1, 2, \dots, R$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \leq 1$$

$$\lambda_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

donde la introducción en el programa (4) por Banker et al. (1984) de la restricción $\sum_{i=1}^n \lambda_i \leq 1$ posibilita la consideración de que los rendimientos no sean constantes a escala.

3.2. Evaluación de la eficiencia del gasto social en la reducción absoluta del riesgo de pobreza (*RAP*) y de la disminución de la desigualdad (*RAG*).

En primer lugar, se valora la eficiencia del gasto social de los países de la UE de forma individual en la reducción absoluta de la tasa de pobreza, *RAP* y en la disminución absoluta de la desigualdad de rentas, *RAG*. Se considera en ambos casos como factores determinantes el gasto social (*GS*) y el riesgo de pobreza y el índice de Gini antes de prestaciones. Posteriormente, se valora el logro conjunto de ambos objetivos. Se aplica en todos los casos la metodología DEA descrita, con el programa dual (4). Así, para evaluar la eficiencia del gasto social del *o-ésimo* estado en la reducción de la pobreza exclusivamente planteamos:

$$\min_{\theta, \lambda_i} \theta$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{15} \lambda_i GS_i \leq \theta GS_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i RPa_i \leq \theta RPa_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i RAP_i \leq RAP_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i \leq 1; \lambda_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, 15$$

(5)

Para determinar la eficiencia en la disminución de la desigualdad de rentas basta con plantear un programa análogo a (5) donde *RPa_i* quedará sustituido por *IGa_i* y *RAP_i* debe reemplazarse por *RAG_i*. Concretamente plantearíamos:

$$\min_{\theta, \lambda_i} \theta$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{15} \lambda_i GS_i \leq \theta GS_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i RGA_i \leq \theta RGA_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i RAG_i \leq RAG_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i \leq 1; \lambda_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, 15 \quad (6)$$

La utilización de los métodos DEA permite la evaluación conjunta de *RAP* y *RAG*. Para ello planteamos un programa matemático que combine (5) y (6) de la siguiente forma:

$$\min_{\theta, \lambda_i} \theta$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{15} \lambda_i GS_i \leq \theta GS_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i RPa_i \leq \theta RPa_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i IGA_i \leq \theta IGA_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i RAP_i \leq RAP_o;$$

$$\sum_{i=1}^{15} \lambda_i RAG_i \leq RAG_o; \sum_{i=1}^{15} \lambda_i \leq 1; \lambda_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, 15 \quad (7)$$

En la Tabla 4 se muestran los valores y los rankings obtenidos de la resolución de los modelos (5), (6) y (7). Teniendo en cuenta, exclusivamente, la eficiencia en la reducción de la pobreza, se observa que los países menos eficientes son en general los que tienen un estado del bienestar de tipo mediterráneo (Grecia, Italia y Portugal), mientras que los más eficientes pueden pertenecer tanto al modelo tanto nórdico (Finlandia y Holanda) como anglosajón (Irlanda) o continental (Francia).

Tabla 4. Medidas de eficiencia de DEA de los países de la EU15.

	Eficiencia según (5)	Eficiencia según (6)	Eficiencia según (7)	Jerarquía según (5)	Jerarquía según (6)	Jerarquía según (7)
Alemania	0,9381	0,9565	0,9903	12	9	10
Austria	0,9761	0,9851	1	7	7	1
Bélgica	0,9408	0,995	0,9953	10	6	9
Dinamarca	0,9978	0,9738	1	6	8	1
España	0,9467	0,9562	0,9562	8	10	13
Finlandia	1	1	1	1	1	1
Francia	1	0,9245	1	1	15	1
Grecia	0,8719	0,9496	0,9496	15	12	15
Holanda	1	1	1	1	1	1
Irlanda	1	1	1	1	1	1
Italia	0,9034	0,9535	0,9535	14	11	14
Luxemburgo	1	1	1	1	1	1
Portugal	0,9238	0,9369	0,97	13	13	11
Reino Unido	0,9381	0,9307	0,9669	11	14	12
Suecia	0,9412	1	1	9	1	1

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

En cuanto a la eficiencia exclusiva en la reducción de *IG*, (5), se observa una tónica similar, pero con matices. Entre los países más ineficientes encontramos de nuevo los países mediterráneos y también el Reino Unido (éste estaba jerarquizado en posiciones retrasadas al evaluarse exclusivamente la eficiencia en *RAP*) y, sorprendentemente, Francia, que estaba entre los países más eficientes en *RAP*. En cuanto a los países más eficientes, países con EB de modelo nórdico (Finlandia, Holanda, Suecia) y también los dos países que presentan menor gasto social, Luxemburgo e Irlanda. En general los países con EB continental se sitúan en posiciones intermedias.

Cuando se evalúa conjuntamente la eficiencia en *RAP* y *RAG* (modelo (7)), los países eficientes vuelven a ser, esencialmente, países con modelo de EB nórdico (Holanda, Dinamarca, Suecia y Finlandia), más Francia y países con menor gasto social (Luxemburgo e Irlanda). Los países más ineficientes son los mediterráneos y el Reino Unido, nuevamente. En las posiciones centrales encontramos, esencialmente, países con EB continentales.

En la Tabla 5 podemos observar que la eficiencia en *RAP* y *RAG* está positivamente relacionada (Rho de Spearman = 0,583), y aun siendo estadísticamente significativa, está lejos de ser perfecta. Hay países eficientes en *RAP* e ineficientes en *RAG* (Francia) y viceversa (Suecia).

Tabla 5. Correlación por rangos de Spearman de las medidas de eficiencia de los modelos (5), (6) y (7).

	Jerarquía en (5)	Jerarquía en (6)	Jerarquía en (7)
Jerarquía en (5)	1		
Jerarquía en (6)	0,5826 (2,581**)	1	
Jerarquía en (7)	0,8449 (4,795***)	0,6514 (3,012***)	1

Nota: Entre paréntesis el valor del estadístico *z* de prueba y con “***”, “**”, “*” se denota significación estadística del coeficiente de correlación con un nivel de significación estadística del 1%, 5% y 10% respectivamente.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

4. Detección de patrones en las políticas públicas de pobreza y desigualdad en los países de la EU15.

4.1. Análisis clúster *k-means* borroso versus *k-means* convencional.

El análisis clúster es un método utilizado para la detección de grupos homogéneos dentro de una muestra de estudio. Los algoritmos clúster *k-means* convencionales permiten clasificar cada elemento de un conjunto de n elementos exclusivamente en un grupo de los K preestablecidos, considerándose la exclusividad de pertenencia. Una vez se ha fijado el número de clústeres deseados, la determinación de centroides busca minimizar la dispersión de los elementos dentro de un grupo como:

$$\begin{aligned} \underset{c_k, u_{i,k}}{\text{Min}} \quad & \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n u_{i,k} \|x_i - c_k\|^2 \\ \text{sujeto a } & \sum_{k=1}^K u_{i,k} = 1, u_{i,k} \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (8a)$$

Siendo $\|\cdot\|$ una norma normalmente euclídea, x_i la observación del i -ésimo elemento sobre un conjunto de características, c_k el *prototipo* o *centroide* del clúster k y $u_{i,k}$ el nivel de pertenencia del elemento i al clúster k , $u_{i,k} \in \{0,1\}$. Así, $u_{i,k} = 1$ si el elemento i -ésimo es clasificado en el grupo k y $u_{i,k} = 0$ en caso contrario.

La modelización fuzzy *k-means* relaja la condición de exclusividad de pertenencia a un grupo y supone que cualquier elemento puede pertenecer en un cierto grado delimitado en el intervalo $[0, 1]$, a más de uno de los grupos prefijados. Así, el programa de optimización anterior queda re-expresado como (8b):

$$\begin{aligned} \underset{c_k, u_{i,k}}{\text{Min}} \quad & J = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n (u_{i,k})^m \|x_i - c_k\|^2 \\ \text{sujeto a } & \sum_{k=1}^K u_{i,k} = 1, 0 \leq u_{i,k} \leq 1 \end{aligned} \quad (8b)$$

donde el parámetro m es denominado en la literatura como *fuzzificador* y puede tomar valores $1 \leq m < \infty$. Cuando $m \rightarrow 1$, la partición resultante es una convencional (nítida) mientras que si $m \rightarrow \infty$ el análisis clúster no añade valor ya que $u_{i,k} \rightarrow \frac{1}{K}$. Tal como indican Klawonn et al. (2015), el análisis clúster convencional puede ser entendido como un caso particular del análisis clúster borroso ya que los grupos borrosos pueden ser transformados en grupos nítidos considerando que cualquier observación x_i pertenece exclusivamente al clúster s si $u_{i,s} = \max_{k=1}^K u_{i,k}$.

En problemas de clasificación relativos a las Ciencias Sociales, la definición de las clases suele ser difusa, de tal forma que muchos de los elementos a clasificar pueden participar de características de más de un grupo. Así, si se establecen dos grupos en función de la eficiencia en *RAP* "alta eficiencia en *RAP*" y "baja eficiencia en *RAP*", la misma naturaleza con la que hemos etiquetado estas clases económicas nos lleva a considerar el fuzzy clustering como una alternativa interesante al hard clustering. Así, aceptaríamos que la pertenencia de Luxemburgo al primer grupo y Grecia el segundo es inequívoca, pero Dinamarca, con un índice de eficiencia en *RAP* de 0,99, muy cercano a 1, participaría, en cierto grado, de ambos grupos. El análisis fuzzy clustering ha sido ampliamente utilizado en problemas de clasificación de tipo económico y social. Así, Derrig y Ostaszewski (1995) clasifican varios municipios del estado de Massachussets en función de variables relacionadas con el fraude en seguros de automóvil; Yu et al. (2012) y Yu et al. (2014) clasifican las provincias chinas en función del cumplimiento de los objetivos de emisiones en CO_2 y Wu et al. (2013) categorizan las regiones chinas en función de la vulnerabilidad de su producción agrícola. En Khoshnevisan et al. (2015) se clasifican explotaciones agrarias de Irán en función de su eficiencia energética. En el ámbito

de la gestión empresarial, Costea y Bleotu (2012) aplica el fuzzy clustering para discriminar instituciones financieras en Rumania, mientras que Khaleie et al. (2012) lo hace en la selección de proveedores y Hirschinger et al. (2015) en problemas de logística.

Klawonn et al. (2015) introducen una nueva razón de tipo algorítmico para emplear métodos de fuzzy clustering. Indican que el clustering borroso en muchas ocasiones evita los problemas algorítmicos de los métodos convencionales clúster k-means como, por ejemplo, que sus resultados dependen fuertemente de la inicialización del algoritmo. Además, fuzzy clustering no es únicamente una simple mejora de los algoritmos convencional k-clustering sino que abre la posibilidad de realizar análisis clúster más flexibles y sofisticados que los que se pueden hacer con el análisis clúster nítido. La obtención de los centroides y los niveles de pertenencia asociados a los grupos puede ser resuelto con el algoritmo propuesto en Bezdek (1981). Éste se basa en la aplicación recurrente de las siguientes ecuaciones. La primera estipula que el centroides del clúster k-ésimo es la media ponderada:

$$c_k = \frac{\sum_{i=1}^n (u_{i,k})^m x_i}{\sum_{i=1}^n (u_{i,k})^m} \quad (8c)$$

La segunda ecuación estipula que el nivel de pertenencia del elemento i -ésimo al k -ésimo clúster, $u_{i,k}$, se encuentra como:

$$u_{i,k} = \left[\sum_{s=1}^K \left(\frac{\|x_i - c_k\|^2}{\|x_i - c_s\|^2} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right]^{-1} \quad (8d)$$

Así, los pasos que sigue el algoritmo de Bezdeck son los siguientes:

Paso 1: A partir de un número predefinido del número de clústeres, K y de m , escoge un nivel inicial de pertenencia de cada elemento a cada clúster $u_{i,k}^{(0)}$, de tal manera que $\sum_{k=1}^K u_{i,k}^{(0)} = 1$.

Paso 2: Con (8c) calcula el centroide del clúster k -ésimo de la primera iteración, $c_k^{(0)}$, $k=1,2,\dots,K$.

Paso 3: Con (8d) calcula el nivel de pertenencia de cada elemento a cada clúster. En esta primera iteración obtenemos $u_{i,k}^{(1)}$ $i = 1,2, \dots, n$; $k = 1,2, \dots, K$.

Paso 4: Calcula el valor de la función de coste en (8b) con $u_{i,k}^{(1)}$. Si se produce en su valor una mejora respecto al asociado a $u_{i,k}^{(0)}$ en una cuantía superior a un valor predefinido ε , repite los tres pasos anteriores a partir del valor $u_{i,k}^{(1)}$ para encontrar $u_{i,k}^{(2)}$ e implementa este paso. Así, en la iteración i -ésima, si a partir de $u_{i,k}^{(i)}$ se produce una mejora en la función objetiva respecto a $u_{i,k}^{(i-1)}$ superior al valor predefinido ε , se vuelven a implementar los cuatro pasos descritos. El algoritmo finaliza en el momento en que la iteración no proporciona una mejora en la función de coste superior a ε .

Una cuestión relevante en el análisis fuzzy k-means es la elección del número óptimo de clústeres K . Esto ha generado una extensa literatura tal como se muestra en el *survey* de Wang y Zhang (2007). Aquí utilizamos dos índices de validación del número de clústeres que parten de una filosofía diferente. El primero únicamente utiliza los niveles de pertenencia y es un refinamiento que Dave (1996) hace sobre el clásico índice de Bezdek (1981). Denominamos este índice como *IDB* y lo calculamos como

$$IDB = 1 - \frac{K}{K-1} \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n (u_{i,k})^2 \right)$$

El número óptimo de clústeres es aquel valor de que K maximice IDB y, básicamente, será aquella partición que se acerca a una partición *hard*.

El segundo índice que empleamos es el propuesto en Xie y Beni (1991), que Wang y Zhang (2007) entienden como más completo ya que, aparte de los niveles de pertenencia, utiliza el valor de las observaciones. El valor óptimo de K debe minimizar la dispersión dentro de las clases y, al mismo tiempo, maximizar la dispersión entre clases. Si denominamos este índice como IXB , el K óptimo deberá minimizarlo, ya que:

$$IXB = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n (u_{i,k})^m \|x_i - c_k\|^2}{n \cdot \min_{j,k} \|c_j - c_k\|^2}$$

4.2. Patrones en la eficiencia del gasto social de los estados de la EU15.

Con la metodología fuzzy clustering ya descrita buscamos identificar los patrones existentes en los países EU15 en el volumen de políticas sociales y su productividad, medida a partir de la modelización DEA en tres niveles:

- a) En primer lugar agrupamos los países por su volumen de GS y su productividad en RAP . Este análisis será denotado como $GS-RAP$.
- b) En segundo lugar repetimos el mismo análisis considerando la productividad de GS en RAG . Nos referimos a este análisis como $GS-RAG$.
- c) Finalmente teniendo en cuenta el volumen de GS y su productividad tanto en RAP como en RAG ($GS-RAP / RAG$).

En todas las variables, GS y el índice de eficiencia, utilizamos sus valores estandarizados. Para establecer el número final de clústeres, tal como sugieren Yu et al. (2012), partiremos de un número máximo de $\sqrt{n} = \sqrt{15} \approx 4$ y un mínimo de 2. Además, empleamos $m = 2$, que suele ser la alternativa más común en trabajos empíricos. Calculamos los centroides de los clústeres y los niveles de pertenencia de los elementos de la muestra para $k = 2, 3$, y 4 y con los índices IBX e IDB , establecemos la partición que entendemos óptima. En la Tabla 6 se recogen los valores que toman los índices IDB y IXB en los análisis clúster planteados. Puede observarse que en todos los casos los índices de validación sugieren que el número óptimo de grupos es $K = 3$.

Tabla 6. Índices de validación de número de clústeres en un análisis fuzzy k-means.

k	Análisis GS-RAP		Análisis GS-RAG		Análisis GS-RAP/RAG	
	IDB	IXB	IDB	IXB	IDB	IXB
2	-0,1043	0,0850	-0,1714	0,1365	-0,1583	0,1521
3	0,1897	0,0239	0,1454	0,0433	0,1454	0,0530
4	0,1031	0,0995	0,1110	0,0657	0,0819	0,1455

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

4.2.1. Patrones de eficiencia del gasto social en la reducción de la pobreza.

La Tabla 7 recoge los valores estandarizados de GS y el índice de eficiencia y los niveles de pertenencia de cada país a los tres clústeres, mientras que la Tabla 8 muestra sus centroides.

De los tres grupos identificados, los dos primeros se componen de países que, en general, son eficientes en la reducción de la pobreza pero que difieren en el volumen del GS. El primer clúster, engloba países con EB nórdico (Dinamarca, Holanda y Finlandia) o continental (Austria y Francia). Estos países manifiestan eficiencia en la reducción de la pobreza y presentan un nivel de GS claramente por encima del promedio de la EU15. En el segundo hay dos países, Luxemburgo e Irlanda, eficientes según el análisis DEA pero con GS notablemente por debajo del promedio de la EU15. El sensible nivel de pertenencia a este segundo grupo de España se explica por su similitud en cuanto al GS (de los más reducidos de la EU15) y no por su grado de eficiencia, que está por debajo del promedio.

Tabla 7. Grupos del análisis cluster fuzzy k-means GS-RAP.

	GS	Eficiencia en RAP	u_{i1}	u_{i2}	u_{i3}
Alemania	0,146	-0,496	0,036	0,016	0,948
Austria	0,323	0,426	0,659	0,082	0,258
Bélgica	0,482	-0,43	0,147	0,041	0,812
Dinamarca	1,201	0,953	0,976	0,008	0,016
España	-0,939	-0,287	0,128	0,286	0,585
Finlandia	0,707	1,006	0,973	0,01	0,017
Francia	1,598	1,006	0,895	0,035	0,07
Grecia	-0,488	-2,101	0,134	0,136	0,731
Holanda	0,701	1,006	0,972	0,01	0,018
Irlanda	-1,921	1,006	0,002	0,994	0,003
Italia	0,329	-1,337	0,074	0,041	0,885
Luxemburgo	-1,824	1,006	0,001	0,998	0,001
Portugal	-0,585	-0,842	0,055	0,064	0,882
Reino Unido	0,012	-0,496	0,025	0,013	0,962
Suecia	0,256	-0,42	0,077	0,028	0,894

Notas: (a) Los valores de GS y la medida de eficiencia vienen estandarizados.

(b) La media y la desviación estándar de GS son 28,400 y 3,279 respectivamente. Las del índice de eficiencia en RAP son 0,956 y 0,041.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

En el tercer grupo, el volumen de GS es muy heterogéneo aunque su promedio es cercano al promedio de la EU15. Agrupa a países menos eficientes en la reducción de la pobreza, comparativamente a los dos anteriores grupos. Están los países mediterráneos (Italia, España, Italia y Grecia), dos países con modelo EB continental (Alemania, Bélgica), que pasan a ser tres si consideramos a Austria (presenta un nivel de pertenencia al grupo de 0,258); y, finalmente, Suecia y Reino Unido.

Tabla 8. Centroides de los clústeres identificados en la Tabla 7.

	GS	Eficiencia en RAP
Centroide del clúster 1	0,935	0,900
Centroide del clúster 2	-1,807	0,920
Centroide del clúster 3	-0,015	-0,762

Notas: (a) Los valores de *GS* y la medida de eficiencia vienen estandarizados.

(b) La media y la desviación estándar de *GS* son 28,400 y 3,279 respectivamente. Las del índice de eficiencia en *RAP* son 0,956 y 0,041.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

4.2.2. Patrones de eficiencia del gasto social en la reducción de la desigualdad

La Tabla 9 recoge los valores estandarizados de *GS* y de eficiencia en *RAG* y los niveles de pertenencia de cada país a los tres clústeres identificados, mientras que en la Tabla 10 se indican sus centroides. Diferenciamos tres grupos, que presentan una configuración muy similar a los que detectamos en el análisis *GS-RAP*. Los dos primeros se componen de países que en general son eficientes en la disminución de la desigualdad pero que tienen un volumen muy diferente en gasto social. El primer grupo engloba países con EB nórdico (Dinamarca, Suecia, Holanda y Finlandia) y dos continentales (Austria y Bélgica). Francia presenta una sensible pertenencia a este grupo, más por su alto valor en gasto social que por su nivel de eficiencia al reducir la desigualdad. El segundo grupo se compone esencialmente de dos países (Luxemburgo e Irlanda) que según el análisis DEA son completamente eficientes pero con *GS* notablemente por debajo del denominador común de la EU15. Llama de nuevo la atención la sensible pertenencia de España a este clúster, que puede imputarse a su patrón en *GS* y no por su eficiencia en la disminución efectiva en *RAG*.

En el tercer grupo el *GS* es muy heterogéneo, con promedio cerca del de la EU15. En este grupo todos los países son escasamente eficientes en la reducción de la desigualdad en comparación a los grupos anteriores. Se engloban aquí, de nuevo, los países mediterráneos (Italia, España, Italia y Grecia), dos países con EB continental (Alemania y Francia) y Reino Unido. También es remarcable la sensible pertenencia de Dinamarca, debido a que su eficiencia en *RAG* (0,97), está sensiblemente alejada de la eficiencia plena (1).

Tabla 9. Grupos del análisis cluster fuzzy k-means *GS-RAG*.

	GS	Eficiencia en en RAG	u_{i1}	u_{i2}	u_{i3}
Alemania	0,146	-0,507	0,101	0,03	0,869
Austria	0,323	0,508	0,919	0,025	0,055
Bélgica	0,482	0,859	0,991	0,003	0,005
Dinamarca	1,201	0,107	0,716	0,059	0,225
España	-0,939	-0,517	0,156	0,204	0,64
Finlandia	0,707	1,036	0,967	0,014	0,02
Francia	1,598	-1,642	0,286	0,105	0,608
Grecia	-0,488	-0,751	0,059	0,042	0,898
Holanda	0,701	1,036	0,967	0,013	0,019
Irlanda	-1,921	1,036	0,002	0,996	0,002
Italia	0,329	-0,613	0,104	0,028	0,867

Luxemburgo	-1,824	1,036	0,001	0,999	0
Portugal	-0,585	-1,202	0,063	0,052	0,885
Reino Unido	0,012	-1,422	0,046	0,026	0,928
Suecia	0,256	1,036	0,921	0,038	0,042

Notas: (a) Los valores de *GS* y la medida de eficiencia vienen estandarizados.

(b) La media y la desviación estándar de *GS* son 28,400 y 3,279 respectivamente. Las del índice de eficiencia en *RAG* son 0,971 y 0,028.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

Tabla 10. Centroides de los clústeres identificados en la Tabla 9.

	<i>GS</i>	Eficiencia en <i>RAG</i>
Centroide del clúster 1	0,935	0,900
Centroide del clúster 2	-1,807	0,920
Centroide del clúster 3	-0,015	-0,762

Notas: (a) Los valores de *GS* y la medida de eficiencia vienen estandarizados.

(b) La media y la desviación estándar de *GS* son 28,400 y 3,279 respectivamente. Las del índice de eficiencia en *RAG* son 0,971 y 0,028.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

4.2.3. Patrones de eficiencia del *GS* en la reducción de la pobreza y la desigualdad considerados conjuntamente

La Tabla 11 recoge los valores estandarizados de *GS* y de eficiencia conjunta en *RAP* y *RAG* y los niveles de pertenencia de cada país a los tres clústeres. En la Tabla 12 se indican sus centroides. Vuelven a diferenciarse tres grupos, no obstante, los grupos se muestran de forma mucho más nítida, ya que no hay países que pertenezcan a más de un grupo con niveles de presunción superiores a 0,1. Los dos primeros clústeres se componen de países que son eficientes en la ejecución del *GS* pero con un volumen muy diferente en el mismo. El primer grupo abarca todos los países con EB nórdico (Dinamarca, Suecia, Holanda y Finlandia) y continental (Austria, Bélgica, Francia y Alemania). El segundo grupo se conforma esencialmente de Luxemburgo e Irlanda, que se manifiestan eficientes según el análisis DEA, pero tienen un *GS* notablemente por debajo del resto de países de la EU15. En el tercer grupo el *GS* es muy heterogéneo y su promedio está por debajo, en cualquier caso, del de EB nórdico y continental. Se trata de países mediterráneos (Italia, España, Italia y Grecia), con el añadido del Reino Unido.

Tabla 11. Grupos del análisis cluster fuzzy k-means *GS-RAP* y *RAG*.

	<i>GS</i>	Eficiencia conjunta en <i>RAP</i> y <i>RAG</i>	u_{i1}	u_{i2}	u_{i3}
Alemania	0,146	0,245	0,788	0,083	0,129
Austria	0,323	0,73	0,947	0,026	0,026
Bélgica	0,482	0,496	0,975	0,011	0,015
Dinamarca	1,201	0,73	0,931	0,029	0,04
España	-0,939	-1,469	0,048	0,061	0,89
Finlandia	0,707	0,73	0,997	0,001	0,001
Francia	1,598	0,73	0,847	0,062	0,092
Grecia	-0,488	-1,798	0,032	0,028	0,94
Holanda	0,701	0,73	0,997	0,001	0,001
Irlanda	-1,921	0,73	0,001	0,998	0,001
Italia	0,329	-1,606	0,087	0,045	0,868
Luxemburgo	-1,824	0,73	0	1	0
Portugal	-0,585	-0,774	0,085	0,08	0,835
Reino Unido	0,012	-0,932	0,082	0,039	0,878
Suecia	0,256	0,73	0,925	0,038	0,037

Notas: (a) Los valores de *GS* y la medida de eficiencia vienen estandarizados.

(b) La media y la desviación estándar de *GS* son 28,400 y 3,279 respectivamente. Las del índice de eficiencia en *RAP* y *RAG* conjuntamente son 0,985 y 0,02.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

Tabla 12. Centroides de los clústers identificados en la Tabla 11.

	<i>GS</i>	Eficiencia en <i>RAP</i> y <i>RAG</i>
Centroide del clúster 1	0,674	0,648
Centroide del clúster 2	-1,843	0,714
Centroide del clúster 3	-0,336	-1,325

Notas: (a) Los valores de *GS* y la medida de eficiencia vienen estandarizados.

(b) La media y la desviación estándar de *GS* son 28,400 y 3,279 respectivamente. Las del índice de eficiencia en *RAP* y *RAG* conjuntamente son 0,985 y 0,02.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat, 2018.

5. Conclusiones.

En este trabajo evaluamos la eficiencia del gasto social en la reducción de los índices de vulnerabilidad de los países de la EU15 combinando la metodología *Data Envelopment Analysis* (DEA), que permite medir el grado de eficiencia de los países, con un análisis clúster borroso para detectar patrones en el binomio volumen de gasto social/eficiencia del gasto social. Este análisis nos permite identificar si la efectividad del gasto social tiene relación con la clasificación comúnmente aceptada de Estados de Bienestar (Esping-Andersen, 1990; Ferrera, 1998; 2005): nórdico, continental, anglosajón y mediterráneo.

En general, los países con modelo de EB nórdico suelen ser eficientes tanto en la reducción de la pobreza como en la de la desigualdad. La única excepción sería Suecia y, en mucho menor grado, Dinamarca que se alinean de forma clara en el primer estado y más residual en el segundo, en el grupo de países escasamente eficientes respecto a la reducción de la pobreza. Los países con EB continental suelen ser eficientes en la reducción de los índices de vulnerabilidad, pero se observan más excepciones que en el caso de los países nórdicos, sobre todo en la reducción de la pobreza. Así, Bélgica, Alemania y, de forma no tan clara, Austria, se incluyen en el grupo de los países no eficientes en la reducción del riesgo de pobreza. En cuanto a la disminución del índice de Gini, Francia y Alemania se alinean en el grupo de países escasamente eficientes. No obstante, cuando consideramos la eficiencia en la reducción de la pobreza y la desigualdad conjuntamente, ningún país con EB nórdico o continental se agrupa en el clúster de estados no eficientes.

Podemos observar que el grupo de países mediterráneos (Italia, España, Grecia y Portugal) se manifiestan consistentemente ineficientes con independencia de que realicemos el análisis en la reducción de la pobreza, de la reducción del índice de Gini o de la reducción de ambos conjuntamente. Forman, de hecho, el núcleo del grupo de países ineficientes en los tres análisis clúster realizados. El comportamiento de los dos países con estado de bienestar anglosajón, Irlanda y Reino Unido, es contradictorio. Irlanda se manifiesta claramente eficiente en la reducción de todos los índices de vulnerabilidad mientras que Reino Unido se agrupa en todos los análisis clúster con los países con EB mediterráneo.

Referencias

- Afonso, A., & Aubyn, M.S. (2006). Cross-country efficiency of secondary education provision: A semi-parametric analysis with non-discretionary inputs. *Economic modelling*, 23(3), 476-491.
- Afonso, A., & St Aubyn, M. (2004). Non-parametric approaches to education and health expenditure efficiency in OECD countries. *Journal of Applied Economics*, 8(2), 227-246.
- Afonso, A., Schuknecht, L., & Tanzi, V. (2010). Income distribution determinants and public spending efficiency. *The Journal of Economic Inequality*, 8(3), 367-389.
- Agasisti, T., & Johnes, G. (2010). Heterogeneity and the evaluation of efficiency: the case of Italian universities. *Applied Economics*, 42(11), 1365-1375.
- Andersson, C., Antelius, J., Månsson, J., & Sund, K. (2017). Technical efficiency and productivity for higher education institutions in Sweden. *Scandinavian journal of educational research*, 61(2), 205-223.
- Anker, J. et al. (2009). *Overview and Analysis. Minimum Income Schemes in Denmark: A Study of National Policies*, Brussels: European Commission.
- Atkinson, A. (2000). A European Social Agenda: Poverty Benchmarking and Social Transfers. *Euromod Working Paper* No. EM3/00.
- Banker RD, Charnes A., & Cooper WW. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiency in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092.
- Beblo, M., & Knaus, T. (2001). Measuring Income Inequality in Euroland. *The Review of Income and Wealth*, 47, 301-320.

- Bezdek, J.C. (1981). Objective Function Clustering. In *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*, Springer, Boston, MA. pp. 43-93.
- Bogdanov, G., & Zahariev, B. (2009). *Analysis of the Situation in Relation to Minimum Income Schemes in Bulgaria. A Study of National Policies*. Brussels: European Commission.
- Bradbury, B., & Jäntti, M. (2001). Child poverty across twenty-five countries. In Bradbury, B., Jenkins, S., & Micklewright, J. (eds.), *The dynamics of Child Poverty in Industrialised Countries*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 62-91.
- Cantillon, B., Marx, I., & Van den Bosch, K. (1997). The Challenge of Poverty and Social Exclusion. In OECD (ed.), *Towards 2000: The New Social Policy Agenda*, Paris: OECD.
- Cantillon, B. (2011). The Paradox of the Social Investment State. Growth, Employment and Poverty in the Lisbon Era. *Working Paper No. 11 / 03*, University of Antwerp. http://www.centrumvoorsociaalbeleid.be/sites/default/files/CSB%20Working%20Paper%2011%2003_March%202011.pdf
- Cantillon, B., Marx, I., & Van den Bosch, K. (2002). The Puzzle of Egalitarianism: About the Relationships between Employment, Wage Inequality, Social Expenditures and Poverty. *Working Papers No 337*, Luxembourg: Luxembourg Income Study.
- Charnes, A., Cooper, W.W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444.
- Cincinnati, S., & Nicaise, I. (2009). *Minimum Income Schemes: Panorama and Assessment. A Study of National Policies*, Brussels: European Commission.
- Clements, B. (2002). How efficient is education spending in Europe? *European Review of Economics and Finance*, 1(1), 3-26.
- Coccia, M., Falavigna, G., & Manello, A. (2015). The impact of hybrid public and market-oriented financing mechanisms on the scientific portfolio and performances of public research labs: a scientometric analysis. *Scientometrics*, 102(1), 151-168.
- Costea, A., & Bleotu, V. (2012). A new fuzzy clustering algorithm for evaluating the performance of non-banking financial institutions in Romania. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 46, 179-199.
- Dave, R.N. (1996). Validating fuzzy partitions obtained through c-shells clustering. *Pattern Recognition Letters*, 17(6), 613-623.
- Derrig, R.A., & Ostaszewski, K.M. (1995). Fuzzy techniques of pattern recognition in risk and claim classification. *Journal of Risk and Insurance*, 62(3), 447-482.
- Emrouznejad, A., & Yang, G.L. (2018). A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978-2016. *Socio-Economic Planning Sciences*, 61, 4-8.
- Esping-Andersen, G. (1990). *Three Worlds of Welfare Capitalism*, Cambridge: Cambridge Polity Press.

- Ferrera, M. (2005). Welfare states and social safety nets in Southern Europe: an introduction. In M. Ferrera (Ed.), *Welfare State Reform in Southern Europe. Fighting poverty and social exclusion in Italy, Spain, Portugal and Greece*, Routledge: Abingdon, pp. 1-23.
- Ferrera, M. (1998): *Le trappole del welfare*, Bologna: Il Mulino.
- Finn, D., Schulte, B., Eichhörn, O., Kaufmann, O., & Konle-Seidl, R. (2008). *Employment First': activating the British Welfare State. Bringing the Jobless into Work? Experiences with Activation Schemes in Europe and the US*. Berlin: Springer.
- González-Pérez, B., Mendaña-Cuervo C., López-González, E., & Caño-Alegre, C. (2007). ¿Son eficientes las Universidades Públicas? Aplicación del análisis envolvente de datos en el caso de Castilla y León. En P. Moyano Pesquera, N. Somarriba Arechavala, J. E. Fernández Arufe (dir.), J. L. Rojo García (dir.), *Anales de economía aplicada 2007*, 5, 129-153.
- Gupta, S., & Verhoeven, M. (2001). The efficiency of government expenditure: experiences from Africa. *Journal of Policy Modeling*, 23(4), 433-467.
- Herrera, S., & Pang, G. (2005). *Efficiency of public spending in developing countries: an efficiency frontier approach* (Vol. 3645). NY: World Bank Publications.
- Hirschinger, M., Spickermann, A., Hartmann, E., Gracht, H., & Darkow, I.L. (2015). The Future of Logistics in Emerging Markets-Fuzzy Clustering Scenarios Grounded in Institutional and Factor-Market Rivalry Theory. *Journal of Supply Chain Management*, 51(4), 73-93.
- Kandel, A. (1982). *Fuzzy Techniques in Pattern Recognition*, New York: John Wiley and Sons.
- Kapsoli, M.J., & Teodoru, I.R. (2017). Benchmarking Social Spending Using Efficiency Frontiers. *Working Paper 17/197*, International Monetary Fund.
- Khaleie, S., Fasanghari, M., & Tavassoli, E. (2012). Supplier selection using a novel intuitionist fuzzy clustering approach. *Applied Soft Computing*, 12(6), 1741-1754.
- Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., Mousazadeh, H., Shamshirband, S., & Ab Hamid, S. H. (2015). Developing a fuzzy clustering model for better energy use in farm management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 27-34.
- Klawonn, F., Kruse, R., & Winkler, R. (2015). Fuzzy clustering: More than just fuzzification. *Fuzzy sets and systems*, 281, 272-279.
- Legros, M. (2009). *Minimum Income Schemes. From Crisis to Another, The French Experience of Means-tested Benefits*, Brussels: European Commission.
- Liu, J. S., Lu, L. Y., Lu, W. M., & Lin, B. J. (2013). A survey of DEA applications. *Omega*, 41(5), 893-902.
- Nelson, K. (2003). *Fighting Poverty: Comparative Studies on Social Insurance, Means-tested Benefits and Income Redistribution*. *Dissertation Series* No. 60, Stockholm: Swedish Institute for Social Research.
- Oxley, H., Dang, Th.-Th., Förster, M., & Pellizari, M. (2001). Income inequalities and poverty among children and households with children in selected OECD countries. In K. Vleminckx y T. Smeeding

- (eds), *Child Well-being, Child Poverty and Child Policy in Modern Nations: What do we know*, Bristol: Policy Press, pp. 371-405.
- Radu, M. (2009). *Analysis of the Situation in Relation to Minimum Income Schemes in Romania. A Study of National Policies*. Brussels: European Commission.
- Ruoppila, S., & Lamminmäki, S. (2009). *Minimum Income Schemes. A Study of National Policies*. Brussels: European Commission.
- Sherman, H. D., & Zhu, J. (2006). Data Envelopment Analysis Explained. *Service Productivity Management: Improving Service Performance using Data Envelopment Analysis (DEA)*, 49-89.
- Vandenbroucke, F., & Vleminckx, K. (2011). Disappointing poverty trends: is the social investment state to blame? An exercise in soul-searching for policy-makers. *Working Paper No. 11 / 01*, University of Antwerp.
- Wang, W., & Zhang, Y. (2007). On fuzzy cluster validity indices. *Fuzzy sets and systems*, 158(19), 2095-2117.
- Wu, D., Yan, D.H., Yang, G.Y., Wang, X.G., Xiao, W.H., & Zhang, H.T. (2013). Assessment on agricultural drought vulnerability in the Yellow River basin based on a fuzzy clustering iterative model. *Natural hazards*, 67(2), 919-936.
- Xie, X.L., & Beni, G. (1991). A validity measure for fuzzy clustering», *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 13(8), 841-847.
- Yu, S., Wei, Y.M., & Wang, K. (2014). Provincial allocation of carbon emission reduction targets in China: an approach based on improved fuzzy cluster and Shapley value decomposition. *Energy Policy*, 66, 630-644.
- Yu, S., Wei, Y.M., Fan, J., Zhang, X., & Wang, K. (2012). Exploring the regional characteristics of inter-provincial CO₂ emissions in China: An improved fuzzy clustering analysis based on particle swarm optimization. *Applied Energy*, 92, 552-556



Selección de un modelo para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica mediante el método AHP

GÓMEZ ROMERO, JOSÉ ANDRÉS

Comisión Federal de Electricidad (México)

Correo electrónico: andresszz@hotmail.com

SOTO FLORES, ROCÍO

Escuela Superior de Comercio y Administración Unidad Santo Tomás

Instituto Politécnico Nacional (México)

Correo electrónico: mrsoto@ipn.mx

GARDUÑO ROMÁN, SUSANA

Instituto Politécnico Nacional (México)

Correo electrónico: sgarduno@ipn.mx

RESUMEN

El desarrollo sostenible es un tema de interés desde hace más de tres décadas, derivado de lo cual, se han elaborado diversas soluciones que buscan implementar y controlar el desarrollo sostenible en las empresas. El sector de energía hidroeléctrica busca atender sus problemáticas ambientales y sociales a través de diversos modelos. El objetivo de este trabajo es seleccionar un modelo de desarrollo sostenible para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica mediante un método de toma de decisiones. Mediante el método proceso analítico jerárquico (AHP) y un grupo de enfoque se determinan las ponderaciones de los criterios, subcriterios y alternativas de los modelos de desarrollo sostenible. Una vez utilizado el método AHP se jerarquizaron los modelos de desarrollo sostenible, se determinó que el modelo del protocolo del IHA obtuvo la mayor ponderación, seguido de los modelos del BS 8900 y el Dow Jones Sustainability Indexes. En el análisis de sensibilidad se validó la selección del modelo del protocolo de la IHA. Los resultados presentados confirman que el protocolo de la IHA es el modelo de desarrollo sostenible más apropiado para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica, lo que proporciona apoyo a quienes buscan justificar su decisión de seleccionar un modelo de desarrollo sostenible, mediante métodos multicriterio.

Palabras clave: proceso analítico jerárquico, sostenibilidad hidroeléctrica, modelos de sostenibilidad, toma de decisiones multicriterio.

Clasificación JEL: C44; D79; Q01; Q25.

MSC2010: 90B50; 90C31.

Selection of a model to evaluate hydroelectric sustainability through the AHP method

ABSTRACT

Sustainable development is the theme that has remained in the interest for more than three decades, as the result of which various solutions have been developed that seek to implement and control sustainability development in companies. The hydropower sector seeks to address its environmental and social problems through various models. The objective of this work is to select a sustainable development model to evaluate hydroelectric sustainability through a method of multicriteria decision making.

Through the method of Analytical Hierarchical Process (AHP), and a focus group it is possible to determine the weightings of the criteria, sub-criteria and alternatives of sustainable development models.

Once the AHP method was applied, the sustainable development models were hierarchized, it was found that the hydropower sustainability assessment protocol obtained the highest priority among the models, followed by the BS 8900 standard and the Dow Jones Sustainability Indexes (DJSI). In the sensitivity analysis, the selection of the hydropower sustainability assessment protocol model was validated, as it remained in the first place in three of the four proposed scenarios.

The results showed that the hydropower sustainability assessment protocol is the most appropriate sustainable development model to evaluate hydroelectric sustainability. This provides support to those who seek to justify their decision to select a sustainable development model, using multicriteria methods.

Keywords: analytical hierarchical process, sustainable hydropower, sustainability models, multi-criteria decision-making.

JEL classification: C44; D79; Q01; Q25.

MSC2010: 90B50; 90C31.



1. Introducción.

En la historia de la humanidad, numerosas culturas y civilizaciones reconocieron la necesidad de establecer relaciones holísticas entre la sociedad, la economía y el medio ambiente. Esto se incrementó con la Revolución Industrial y los cambios que de ahí se derivaron, como el acelerado avance tecnológico y científico y la espiral de adelantos que han llevado a la humanidad a cambios intensos que impactaron positiva y negativamente. De estos cambios han surgido nuevas tendencias y políticas, entre las que destaca el desarrollo sostenible que emana de un antiguo principio de la cultura humana, como es el respeto al entorno y a la relación ser humano-naturaleza (Quintana, 2011).

En 1987, la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo elaboró el informe Brundtland, titulado *Nuestro Futuro Común*, donde se formalizó el concepto de desarrollo sostenible como aquel que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades (CMMAD,1987).

Según Van Marrewijk (2010), inicialmente el desarrollo sostenible estaba relacionado sólo con temas ambientales; no obstante, en la actualidad incluye los aspectos sociales, ambientales en las actividades empresariales y las interacciones con las partes interesadas. Los modelos, normas, métodos y herramientas en materia de sostenibilidad fueron creados para conseguir la integración de las organizaciones a la sostenibilidad, con orientación a mejorar su impacto social y su reputación. Para Olcese, Rodríguez y Alfaro (2008), las normas son parte de la estrategia de las organizaciones públicas y privadas que evolucionan de acuerdo con sus necesidades.

1.1. La sostenibilidad empresarial.

Para sistematizar las prácticas de la sostenibilidad, en las últimas tres décadas, se presentaron diversas soluciones a través de diferentes modelos como acuerdos, convenios y protocolos negociados en diversas cumbres mundiales. A la vez, se instituyeron guías, directrices, normas, protocolos y sistemas de gestión que proporcionan elementos conducentes para debatir los procedimientos que utilizan en las empresas para vigilar la planeación e implementación del desarrollo sostenible (Gil & Barcellos, 2011). Entonces surge la necesidad de promover el desarrollo económico de modo sostenible como un reto para las organizaciones e instituciones de los gobiernos, por lo que se pusieron en práctica los modelos para el desarrollo sostenible que tienen el propósito de apoyar estos desafíos.

Para Olcese, Rodríguez y Alfaro (2008), las normas en desarrollo sostenible se integran a la dirección estratégica de las empresas. En cuanto a Zdanyte y Neverauskas (2014), consideran que es posible que una organización logre el desarrollo sostenible cuando sus objetivos se establecen en un entorno económico, social y ambiental o en áreas centradas en la implementación de este desarrollo, mediante un cambio gradual de la cultura.

Por otra parte, para Hart y Milstein (2003), el desarrollo sostenible es complicado y multifactorial que no se resuelve con una sola acción empresarial. Así, las organizaciones tienen la meta de prevenir la contaminación disminuyendo sus residuos, empleando tecnologías amigables con el ambiente y limpias. Además, las organizaciones tienen el compromiso de ser socialmente incluyentes con sus partes interesadas mediante interacciones y diálogos, buscarán la manera de desarrollar medidas económicamente factibles para atender los problemas sociales y ambientales que puedan presentarse en el futuro, con una visión de desarrollo sostenible.

De aquí que las organizaciones reaccionen en forma diferente ante el reto que implica el desarrollo sostenible, ya que algunas ignoran los problemas de sostenibilidad; otras actúan sólo en el campo teórico, pero no en su comprensión organizacional y, otros más, intentan completar los aspectos de desarrollo sostenible con las estrategias y conocimientos del negocio. De lo anterior se derivan acciones que son adoptadas por las empresas para lograr el desarrollo sostenible que, en ocasiones, son acompañadas por la aplicación de modelos para su control (Mike, 2013).

Para analizar los modelos de desarrollo sostenible se necesita precisar información acerca de aquellos modelos actuales, que promueven dicho progreso limpio, que a su vez; son clasificados en normas, políticas, informes e indicadores bursátiles. Dentro de ellos, se pueden caracterizar las dimensiones de sostenibilidad, específicamente en los aspectos de tipo social, ambiental y económico.

Tabla 1. Modelos de desarrollo sostenible.

Modelos	Año	Autor / lugar	Tipo/Evaluación	Dimensiones
Pacto Mundial	2000, 2010 y 2017	ONU Suiza	Prácticas / Sin evaluación	Derechos humanos, Condiciones laborales, Medio ambiente, y Corrupción
WCD	1998, 2000	UINC Suiza	Informe / Evaluación externa	Social, Ambiental, Económico y Técnico
Protocolo IHA	2004, 2006 y 2012	IHA Reino Unido	Protocolo/Evaluación externa	Social, Ambiental, Económico y Técnico
RSAT	2010 y 2014	ECSHDMRC	Herramienta / Evaluación externa	Social, Ambiental, Económico y Técnico
Políticas de seguridad	1997, 2006, 2012	Banco Mundial Suiza	Políticas / Evaluación externa	Social y Ambiental
Principios de Ecuador	2003, 2006, 2013	EPFI Reino Unido	Principios / Evaluación externa	Socia y Ambiental
IFC	2006, 2014	Banco Mundial Suiza	Normas/Evaluación externa	Social y Ambiental
BS 8900	2006 y 2013	BSI Inglaterra	Estándar/Auditoría certificable	Social, Ambiental y Económico
AA 1000	1999 y 2008	ISEA Reino Unido	Informe/Auditoría sin certificar	Social (grupos de interés)
GRI	2000, 2002 2006 y 2013	GRI Holanda	Informe/Auditoría certificable	Social, Ambiental y Económico
DJSI	1999 y 2014	RobecoSAM's Estados Unidos	Índices/Verificación documental	Social, Ambiental y Económico
FTSE4 Good	2001 y 2011	UNICEF, EIRIS Reino Unido	Índices/Verificación documental	Ambiental , Responsabilidad social y Gobierno corporativo
IPC Sostenible	2011 y 2014	EIRIS México	Índices/Verificación documental	Ambiental , Responsabilidad social y Gobierno corporativo

Fuente: Elaboración propia.

Se observa, que los modelos están clasificados en siete normas, tres informes y tres indicadores, además, por lo menos tienen una dimensión de sostenibilidad y se agrupan de la siguiente forma:

- Social. Sólo se incluye el modelo AA1000 que se relaciona con los grupos de interés.
- Social - Ambiental. Se basan en un enfoque de financiación de proyectos de infraestructura; la integran los modelos, las políticas de seguridad del Banco Mundial, el Pacto Mundial, los Principios de Ecuador y los estándares de sostenibilidad del IFC.
- Social - Ambiental - Económica. Se basan en un enfoque más holístico y de aplicación para todo tipo de empresas u organizaciones; la integran los modelos Global Reporting Initiative y la norma BS 8900:2013 Desarrollo Sostenible.
- Social - Ambiental - Económica. Se basan en un enfoque para empresas que cotizan en índices bursátiles sostenibles; la integran los modelos Dow Jones Sustainability Indexes, FTSE4 Good y el IPC Sostenible.

- **Social - Ambiental - Económica.** Se basan en un enfoque de sostenibilidad hidroeléctrica; la integran los modelos World Commission on Dams, Protocolo de Evaluación de Sostenibilidad Hidroeléctrica del IHA y The Rapid Basin-Wide Hydropower Sustainability Assessment Tool el IPC Sostenible.

A continuación, se presenta una descripción breve de los modelos que fomentan el desarrollo sostenible con vigencia al año 2019:

- **AA1000 AccountAbility.** Son normas de acceso libre y proveen los requerimientos para asegurar la sostenibilidad. Describen un conjunto de procesos que una organización puede seguir para contabilizar, administrar y comunicar su desenvolvimiento social y ético, sin precisar o especificar cuál debiera ser ese desenvolvimiento (AA1000AS, 2008).
- **Políticas de seguridad del Banco Mundial.** Estas políticas son aplicables a todos los que solicitan préstamos del Banco Mundial. Aquí se establecen obligaciones socioambientales que deben cumplir quienes solicitan financiación para un proyecto, lo que se formaliza de acuerdo con los compromisos del Banco Mundial según los criterios establecidos, tales como transparencia y consulta (Banco Mundial, 2012).
- **Pacto Mundial.** Prácticas voluntarias en las que las organizaciones se obligan a converger sus directrices y procesos en 10 principios asociados en las cuatro disciplinas (derechos humanos, normas de seguridad, ambiente y anticorrupción). Con más de 9,900 compañías, en 161 países, es la iniciativa corporativa más grande (Global Compact, 2019).
- **Principios de Ecuador.** Fueron desarrollados por bancos del sector privado, liderados por Citigroup, ABN AMRO, Barclays y WestLB, proporcionan préstamos para proyectos donde el prestatario cumpla con las políticas y procedimientos sociales y ambientales (Principios de Ecuador, 2013).
- **The International Finance Corporation (IFC por sus siglas en inglés).** Son estándares de desempeño para la gestión de riesgos y la mitigación de impactos ambientales y sociales, incrementando las oportunidades de financiación para proyectos del sector privado de sus países miembros (IFC, 2019).
- **Dow Jones Sustainability Indexes (DJSI por sus siglas en inglés).** Fue la primera comparación global de sostenibilidad que evaluaba el desempeño sostenible de las 2,500 empresas que figuraban en el Índice del Mercado Global Dow Jones. Los parámetros de este Índice han prevalecido en el mundo durante más tiempo como el punto clave de referencia para la inversión de sostenibilidad en las empresas y para los inversores que toman en cuenta la sostenibilidad al momento de invertir, como en una red de empresas que adoptan las mejores prácticas (RobecoSAM's, 2014).
- **FTSE4 Good.** Es un índice de referencia con reconocimiento mundial, para inversores que desean identificar empresas con prácticas de sostenibilidad y políticas de responsabilidad social. Los criterios del FTSE4Good se desarrollan a partir de un proceso de consulta al mercado y se aprueban por un comité independiente de expertos (FTSE, s.f.).
- **IPC Sostenible.** Es un índice de la Bolsa Mexicana de Valores, que agrupa a sus empresas destacadas en materia de sostenibilidad. Los criterios que evalúa son: medio ambiente, responsabilidad social y gobierno corporativo (BMV, 2013).
- **The Global Reporting Initiative (GRI por sus siglas en inglés).** Es una iniciativa que contiene una guía para desarrollar informes de sostenibilidad con base en las tres esferas clásicas: ambiente, economía y sociedad. Los informes resultantes de las evaluaciones pueden ser publicados en su página (GRI, 2019).

- **Norma BS 8900:2013.** Es un estándar para medir la sostenibilidad, se utiliza para que las empresas integren la gestión del desarrollo sostenible en la toma de decisiones que realizan diariamente. Las empresas, sin importar el tamaño o sector, pueden ser auditadas en la gestión del desarrollo sostenible. Esta evaluación está dirigida a los consultores y gerentes responsables de la sostenibilidad en la organización. Además, incluye la rendición de cuentas y la mejora continua (BSI, 2013).
- **World Commission on Dams (WCD** por sus siglas en inglés). En 1997, se formó WCD patrocinado por el Banco Mundial y ONG ambientales, con los objetivos de revisar la eficacia de las grandes presas y proponer criterios para la planeación, diseño, operación y desmantelamiento. En el 2000, la WCD elaboró su informe final, reconocido como una contribución en el debate sobre cuestiones polémicas derivadas de las grandes presas. Este informe proporcionó un marco adecuado para la toma de decisiones y sustentó el desarrollo de los proyectos de infraestructura que se debían hacer con una evaluación de riesgo y respetar los derechos de los actores durante el proceso (WCD, 2000). A pesar de que este informe suscitó varias discusiones también equilibró los costos y beneficios de las distintas partes interesadas en el proceso, ya que la WCD es una de los principales modelos utilizados para evaluar la sostenibilidad en las grandes presas (PNUMA, s.f.).
- **Protocolo de Evaluación de Sostenibilidad Hidroeléctrica.** The International Hydropower Association (IHA por sus siglas en inglés) diseñó el protocolo para evaluar la sostenibilidad, la construcción y operación de centrales hidroeléctricas. Así permite la producción de un perfil de sostenibilidad que incluye un sistema de evaluación de proyectos hidroeléctricos a través de la evaluación de buenas prácticas (IHA, 2010).
- **The Rapid Basin-Wide Hydropower Sustainability Assessment Tool (RSAT** por sus siglas en inglés). Es un modelo de diálogo que reúne a los principales actores de una cuenca fluvial para realizar un análisis estructurado de los temas de sostenibilidad (MRC, s.f.). El RSAT fue diseñado para replicar el enfoque estructurado y completo del Protocolo del IHA en un espectro más graduado para promover la mejora continua y que sirva como una herramienta complementaria del protocolo (RSAT, 2013).

Los modelos presentados permiten identificar las dimensiones de sostenibilidad que los conforman, el tipo de modelo, la evaluación a la que son sujetos, la organización que los emitió, el lugar de publicación, así como el año de sus revisiones.

1.2. Pregunta de investigación.

A partir de la descripción y análisis de los modelos de desarrollo sostenible, se propuso confrontar los diversos modelos de desarrollo sostenible, al buscar y establecer criterios que permitan compararlos desde un punto de vista integrado.

A partir de esta perspectiva se concibió la pregunta de investigación: ¿Qué modelo de desarrollo sostenible seleccionar para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica? Además de contar con un método de soporte para la toma de decisiones y lograr jerarquizar los modelos, de un modo práctico y óptimo, con base en criterios de sostenibilidad.

Para dar respuesta al interrogante, a continuación, se muestra el marco teórico, basado en el método proceso analítico jerárquico (AHP); posteriormente, se aplican el método y la recolección de datos conducentes a la toma de decisiones para seleccionar el mejor modelo de desarrollo sostenible, que permita evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica; por último, se informan los resultados logrados y sus conclusiones.

2. Marco Teórico.

Las dificultades de la toma de decisiones fueron afrontadas inicialmente de manera monocriterio. Sin embargo, se ha cambiado el protagonismo en beneficio de los métodos multicriterio, donde se tienen varios criterios que frecuentemente entran en conflicto entre sí. Al mismo tiempo, muestran las predilecciones del tomador de decisiones o del grupo responsable de tomar la decisión durante el proceso de selección (Caballero & Romero, 2006).

2.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

Para afrontar problemas con múltiples criterios y una cantidad determinada de alternativas, Saaty (1980) presentó el AHP, el proceso de toma de decisiones multicriterio que logra descomponer y ordenar un problema de manera esquemática en una jerarquía de prioridades. Mediante comparaciones pareadas, se instauran jerarquías y se influye en las partes que componen el problema, desplegando reflexiones de valor que discrepan, utilizando la escala de Saaty (ver Tabla 2), para criterios cuantitativos y cualitativos o ambos (Saaty, 1980). La escala de Saaty se utiliza para plasmar las comparaciones pareadas que reflejan los pensamientos, los juicios y las intuiciones de los participantes (Casañ, 2013).

Tabla 2. Escala de Saaty.

Calificación numérica	Escala verbal de la preferencia	Definición
1	Igual	Ambos elementos son de igual importancia.
3	Moderada	Moderada importancia de un elemento sobre otro.
5	Fuerte	Importancia fuerte de un elemento sobre otro
7	Muy Fuerte	Importancia demostrada de un elemento sobre otro.
9	Extrema	Importancia absoluta de un elemento sobre otro
2,4,6,8	Términos medios	Valores intermedios, que se emplean para expresar preferencias que se encuentran entre dos de las anteriormente indicadas.

Fuente: Saaty (1997).

Para determinar el autovector, se multiplica al cuadrado la matriz A, a continuación, se normalizan las sumas de las filas y se consigue el valor del autovector. De la Ecuación 1 se despeja λ_{max} para calcular el autovalor:

$$A \cdot x = \lambda_{max} \cdot x \quad (1)$$

donde:

A: matriz recíproca

X: vector propio

λ_{max} : máximo valor propio

Para eludir que la decisión se obtenga de juicios con consistencia bajas y sean considerados aleatorios. El método calcula la inconsistencia total de los juicios mediante la proporción de

consistencia, su porcentaje no deberá ser mayor al diez por ciento. Esto podrá ser influenciado por el tamaño de la matriz A. El índice de consistencia se determina con la Ecuación 2:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

donde:

n: tamaño de la matriz

CI: Índice de Consistencia

λ_{\max} : máximo valor

En último lugar, la razón de consistencia (CR por sus siglas en inglés), se define de tal manera que los valores que estén por encima del 10% significan inconsistencias en la emisión de los juicios y deberán calcularse reiteradamente hasta conseguir coherencias y consistencias de los mismos. El procesamiento de la información se elabora con base en la Tabla 3.

Tabla 3. Índice de Consistencia.

Tamaño de la matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Consistencia Aleatoria	0.00	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.51

Fuente: Saaty (1997).

Para calcular la razón de consistencia CR, se emplean los índices de consistencia y consistencia aleatorio, la razón de consistencia se determina con la Ecuación 3 (Maurtua, 2006; Márquez, 1999; Ávila, 2000; Castillo et al., 2018):

$$CR = \frac{CI}{IA} \quad (3)$$

donde:

CR: Razón de Consistencia

CI: Índice de Consistencia

IA: Índice de Consistencia Aleatoria

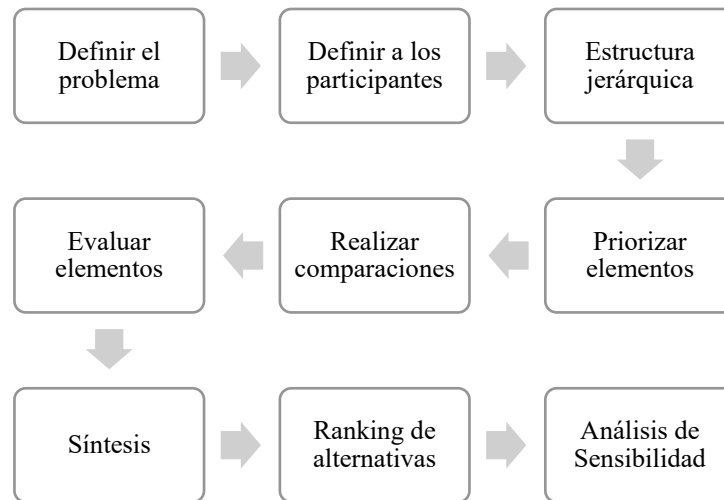
Si el resultado de CR es mayor a 0.10 representa que los juicios de la matriz son inconsistentes, y no son aceptables para tomar de decisiones. Para valores de CR iguales o menores a 0.10 las consistencias son aceptables, válidas y justificadas para la toma de decisiones.

El método AHP puede ser utilizado para tomar decisiones en grupo, ya que permite adoptar situaciones de bienestar que no comprometen a la alta dirección de una organización; fortaleciendo las negociaciones y el aprendizaje cognitivo de la organización (Moreno & Vargas, 2018).

2.1.1. Etapas del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Mediante la representación gráfica de las prioridades del método AHP (Figura 1), se consigue de una manera eficiente y esquemática ordenar los elementos de una problemática compleja decisión, logrando fraccionar las partes que lo integran.

Figura 1. Etapas del AHP.



Fuente: Gómez, Soto & Garduño (2019).

Para Arancibia et al. (2003), Saaty y Vargas (2012), González et al. (2014), el AHP establece las siguientes etapas:

- Definir el problema: se indica el objetivo de la toma de decisiones de manera grupal.
- Definir a los participantes: los participantes deberán ser seleccionados escrupulosamente, ya que en esto radica la representatividad en el método.
- Estructura jerárquica: construir el árbol de decisiones.
- Priorizar elementos: con la información conseguida o compilada de los participantes se combinan los juicios para cada comparación.
- Realizar comparaciones: se inicia con los criterios, se compara su importancia global con el objetivo, después continúa la importancia local de los subcriterios.
- Evaluar elementos: las alternativas se evalúan con cada uno de los subcriterios. Después, se determinan las prioridades locales y globales de las alternativas. Posteriormente, se ejecuta la ponderación final que da cumplimiento al objetivo planteado.
- Síntesis: mediante las comparaciones y la transitividad se logra establecer las jerarquías de las alternativas.
- Ranking de alternativas: se selecciona la mejor alternativa.
- Análisis de Sensibilidad: permite comparar la sensibilidad del resultado con respecto a los posibles cambios en las prioridades de los criterios.

2.2. Aplicación del método AHP en sostenibilidad energética.

En trabajos recientes se localizaron referencias que emplean el método AHP en la sostenibilidad energética y energías renovables (Tabla 4).

Algunos de los trabajos emplearon los métodos multicriterio para establecer la comparación de fuentes de energía convencionales versus energías renovables para producir electricidad (Meixner 2009; Ren et al., 2016). El estudio se refiere a la comparación de las energías renovables mediante la

programación lineal (Afgan & Carvalho, 2002). Otros trabajos centran su análisis en una perspectiva que les permita establecer criterios de evaluación de la sostenibilidad energética (Heo et al., 2010; Wang et al., 2016; Kocaoglu et al., 2016; Patole et al., 2017; Ishfaq, Ali & Ali, 2018). Otras publicaciones reflexionan sobre la aplicación de diversos métodos multicriterio en temas energéticos (Escobar & Moreno, 1994; San Cristóbal, 2012; Al Garni & Awasthi, 2017; Sagbansua & Balo, 2017; Azizkhani et al., 2017; Ali et al., 2018; De Prada et al., 2018). Otros estudios sobre el desarrollo y selección de proyectos hidroeléctricos (Supriyasilp, Pongput & Boonyasirikul, 2009; Patel & Rana, 2018; Arnaiz et al., 2018; Romanelli et al., 2018). En el trabajo de Strantzali y Aravossis (2016) presenta la clasificación de 183 estudios en materia de energías renovables, publicados de 1983 a 2014.

Tabla 4. Aplicación de métodos multicriterios en sostenibilidad energética.

Autor	Título de la publicación
Afgan & Carvalho (2002)	Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants
Meixner (2009)	Fuzzy AHP group decision analysis and its application for the evaluation of energy sources
Supriyasilp, Pongput y Boonyasirikul (2009)	Hydropower development priority using MCDM method
Heo et al. (2010)	Analysis of the assessment factors for renewable energy dissemination program evaluation using fuzzy AHP
Kaya & Kahraman (2010)	Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul
San Cristobal (2012)	Multi criteria analysis in the renewable energy industry
Strantzali & Aravossis (2016)	Decision making in renewable energy investments: A review
Sánchez et al. (2016)	Obtaining the Decision Criteria and Evaluation of Optimal Sites for Renewable Energy Facilities Through a Decision Support System
Ren et al. (2016)	Sustainability decision support framework for industrial system prioritization
Kocaoglu et al. (2016)	Technology Assessment: Criteria for Evaluating a Sustainable Energy Portfolio
Wang et al. (2016)	A group multi-granularity linguistic-based methodology for prioritizing engineering characteristics under uncertainties
Al Garni & Awasthi (2017)	Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabi
Azizkhani et al. 2017	Potential survey of photovoltaic power plants using Analytical Hierarchy Process (AHP) method in Iran
Patole et al. (2017)	Energy sector planning using multiple-index pinch analysis
Sagbansua & Balo (2017)	Decision making model development in increasing wind farm energy efficiency
Ali et al. (2018)	Selection of suitable site in Pakistan for wind power plant installation using analytic hierarchy process (AHP)
Ishfa, Ali & Ali (2018)	Selection of Optimum Renewable Energy Source for Energy Sector in Pakistan by Using MCDM Approach
Patel & Rana (2018)	A Selection of the Best Location for a Small Hydro Power Project using the AHP-Weighted Sum and PROMETHEE Method.
Arnaiz et al. (2018)	Facilitating universal energy access for developing countries with micro-hydropower: Insights from Nepal, Bolivia, Cambodia and the Philippines
De Prada et al. (2018)	Territorial Planning: Interactive Multi-Criteria Decision for Urban Patterns. Case Study: Río Cuarto, Córdoba, Argentina
Romanelli et al. (2018)	Site Selection for Hydropower Development: A GIS-Based Framework to Improve Planning in Brazil.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se muestra la aplicación del AHP con modelos de desarrollo sostenible.

Tabla 5. Aplicación de métodos multicriterios mediante modelos de sostenibilidad.

Autor	Título de la publicación
Chowdhury et al. (2012)	An AHP-QFD integrated approach for mitigating barriers of corporate sustainability.
Goyal & Rahman (2014)	Corporate sustainability performance assessment: an analytical hierarchy process approach.
Özçelik & Öztürk (2014)	Evaluation of Banks' Sustainability Performance in Turkey with Grey Relational Analysis.
Menichini & Rosati (2014)	A fuzzy approach to improve CSR reporting: an application to the Global Reporting Initiative indicators.
Gold & Awashi (2015)	Sustainable global supplier selection extended towards sustainability risks from (1+ n) th tier suppliers using fuzzy AHP based approach.
Calabrese et al. (2016)	A fuzzy Analytic Hierarchy Process method to support materiality assessment in sustainability reporting.
Yue et al. (2018)	Evaluation of the Three Gorges Dam project using multi-criteria analysis (MCA) based on a sustainable perspective
Bhandari, Saptalena & Kusch (2018)	Sustainability assessment of a micro hydropower plant in Nepal
Gómez et al. (2018)	Methodology to assess the market value of companies according to their financial and social responsibility aspects: An AHP approach
Gómez et al. (2019)	Determination of the Weightings of Hydroelectric Sustainability Criteria by Combining AHP and GP extended Methods

Fuente: Elaboración propia.

Algunos trabajos emplearon el AHP para mitigar las barreras de sostenibilidad en las empresas (Menichini & Rosati 2014; Calabrese, et al., 2016). Los estudios de caso emplean los indicadores del GRI para evaluar la sostenibilidad (Goyal & Rahman, 2014; Özçelik & Öztürk, 2014; Gold & Awashi, 2015; Gómez et al., 2018). Otros estudios emplearon como criterios los temas de sostenibilidad hidroeléctrica del IHA (Yue et al., 2018; Bhandari, Saptalena & Kusch, 2018; Gómez et al., 2019).

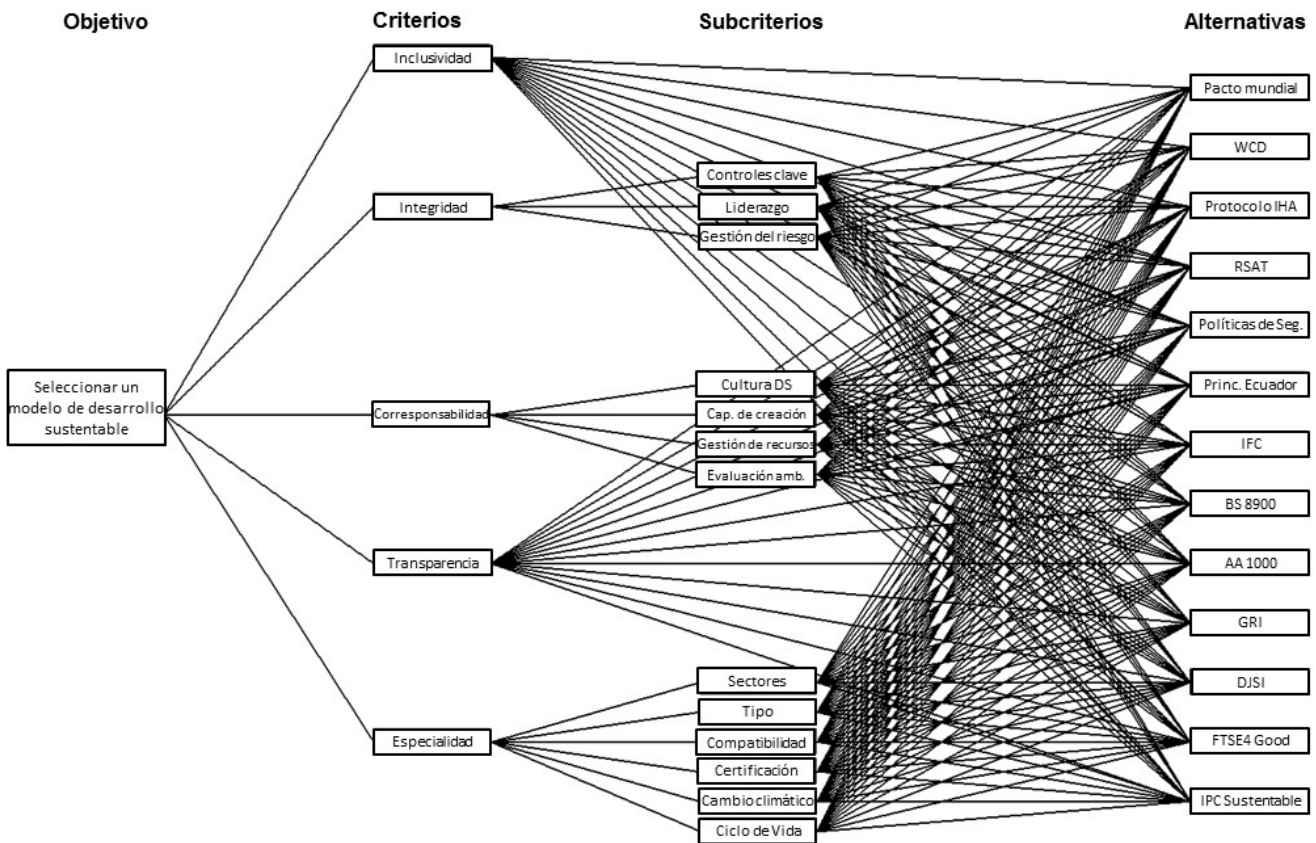
En la revisión de los trabajos anteriores, se identificó que no existe una aplicación directa del método AHP u otro método multicriterio que compare los diversos modelos de desarrollo sostenible, de aquí la importancia de realizar la comparación de los modelos de sostenibilidad y aportar una nueva óptica que facilite su selección conforme a un objetivo predeterminado.

Después de describir la problemática, así como del método AHP, a continuación, se presenta su aplicación, con el objeto de seleccionar el mejor modelo para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica.

3. Materiales y métodos.

El presente trabajo espera contribuir a los tomadores de decisiones que buscan comparar los modelos de desarrollo sostenible para realizar una selección con un fin determinado. En el trabajo de campo se utilizó un grupo de enfoque (*focus group*) para establecer las ponderaciones de los criterios, subcriterios y alternativas del método AHP (Figura 2).

Figura 2. Árbol de jerarquías para modelos de desarrollo sostenible.



Fuente: Elaboración propia partiendo de la norma BS 8900-1:2013.

Para comparar los modelos de desarrollo sostenible, los criterios seleccionados se establecieron con la norma BS:8900-1:2013 (BSI, 2013):

- **Inclusividad:** es la intención claramente expresada, o la política de inclusión, de las partes interesadas en el desarrollo de la estrategia de la organización, su planeación y dirección empresarial.
- **Integridad:** es la adhesión a un conjunto de normas éticas comúnmente aceptadas y comportamientos respetuosos de la legislación.
- **Corresponsabilidad:** es una posición de responsabilidad que puede ser compartida o es propiedad, en su totalidad, de una persona, comunidad u organización.
- **Transparencia:** es un principio relacionado con las actividades y las decisiones que perturban a la economía, la sociedad y el ambiente, así como con la voluntad de comunicarlos de una manera clara, precisa, oportuna, veraz y completa.
- **Especialidad:** son las características particulares que distinguen a los diferentes modelos de desarrollo sostenible.

En este caso, se identificaron 14 subcriterios para inclusividad, integridad, corresponsabilidad y transparencia derivados de la matriz de madurez de desarrollo sostenible (BSI, 2013). Para el criterio de especialidad y sus subcriterios se consideraron las características específicas de cada uno de modelos

de desarrollo sostenible. Las alternativas identificadas son los modelos de desarrollo sostenible de la Tabla 1.

3.1. Recolección de datos.

El Focus Group (grupo de enfoque) se utilizó para obtener las matrices de comparaciones pareadas, solicitadas por el método multicriterio AHP, lo que permitió establecer la prioridad de cada uno de los criterios y subcriterios del árbol de jerarquías. El grupo de enfoque se considera como un tipo de entrevista grupal, que reside en reuniones de grupos pequeños (entre 3 a 10 personas); los participantes conversan en base a uno o varias temáticas expuestas (Hernández et al., 2010).

3.2. Colectivo a entrevistar.

En el método AHP lo principal es la experiencia y los conocimientos del grupo entrevistado, más que el número de participantes a entrevistar. El método estudia a expertos concernientes al objetivo del estudio. Las investigaciones cuantitativas admiten el muestro por conveniencia (Schwab, 1995), tomando en cuenta que se deben analizar a los elementos más significativos y ventajosos para la investigación (Grande & Abascal, 2015). En el mes de febrero de 2019, se realizaron tres reuniones con el grupo de enfoque, con una duración media de 2 horas cada una. Debido a la complejidad de los modelos de desarrollo sostenible, se consideró oportuno que el grupo de expertos cubriera áreas de energía y desarrollo sostenible.

Una muestra no probabilística no requiere representar a los miembros de una población, sino ser una elección de elementos o individuos con características particulares referentes a la problemática (Hernández et al., 2010).

El grupo de enfoque fue conformado por profesores y estudiantes en desarrollo sostenible o temas de energía; ocasionando que se tuviera una variedad de opiniones y punto de vista que difieren sobre la jerarquía de cada uno de los temas y subtemas analizados. Dos de los ocho expertos tienen estudios de licenciatura, tres de maestría y tres cuentan con doctorado. Su experiencia en desarrollo sostenible o energía oscila entre los 5.05 y 20.37 años, con promedio de experiencia de 12.02 años. El 75 por ciento de éstos son mujeres y el 25 por ciento son hombres.

De este modo, el grupo quedó integrado por especialidad:

- Desarrollo sostenible: 5.
- Energía: 3.

4. Resultados.

El análisis de resultados aborda los siguientes aspectos:

- El grupo de enfoque determinó las prioridades de los criterios y subcriterios.
- Compararon los modelos de desarrollo sostenible con cada uno de los subcriterios.

Basándose en la escala de Saaty (ver Tabla 2), se procedió a realizar las comparaciones binarias, mediante una matriz de criterios en relación al objetivo específico y subcriterios versus subcriterios respecto a su criterio, estableciendo un valor según su jerarquía respecto al objetivo; además se obtienen las prioridades particulares y generales de cada criterio y subcriterios.

4.1. Aplicación del modelo de priorización de modelos de desarrollo sostenible.

Una vez identificados los criterios de los modelos de desarrollo sostenible, se llega a la evaluación de cada una de los modelos de desarrollo sostenible de acuerdo con los cinco criterios considerados y relacionados con la Tabla 6, donde se esboza la comparación paritaria entre los criterios considerados, derivando en los resultados siguientes de la comparación.

Tabla 6. Comparación entre criterios de desarrollo sostenible.

	Inclusividad	Integridad	Corresponsabilidad	Trasparencia	Especialidad	Autovector
Inclusividad	1	1/2	1/4	2	1/6	0.078
Integridad	2	1	1/2	3	1/4	0.138
Corresponsabilidad	4	2	1	5	1/2	0.265
Trasparencia	1/2	1/3	1/5	1	1/7	0.051
Especialidad	6	4	2	7	1	0.469

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados derivados de la Tabla 6 reportan que el criterio con mejor posición es el de Especialidad, ya que obtuvo una prioridad de 46.9% ciento. El siguiente fue el criterio de Corresponsabilidad, con una prioridad de 26.2%. Finalmente, en la última posición se ubicó el criterio de Trasparencia, con una prioridad de 5.1 %.

El cálculo de λ_{max} se obtiene mediante el promedio de los valores de la matriz $A \cdot x$ entre x :

$$\lambda_{max} = \frac{A \cdot x}{x} = Promedio \left\{ \frac{0.392}{0.078}, \frac{0.694}{0.138}, \frac{1.338}{0.265}, \frac{0.255}{0.051}, \frac{2.369}{0.469} \right\} = 5.049$$

A continuación, se calcula el índice de consistencia:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{5.049 - 5}{5 - 1} = 0.012$$

Posteriormente, se obtiene la razón de consistencia, tomando el valor de IA de la Tabla 3.

$$CR = \frac{CI}{IA} = \frac{0.012}{1.11} = 0.0109 \leq 0.10$$

El resumen de los resultados anteriores, se observan en la Tabla 7. Los resultados obtenidos en la Tabla 7 señalan que la razón de consistencia CR, es de 0.0109 o del 1.09% por lo que está por debajo del 10% y se considera consistente los valores de las comparaciones de la matriz de la Tabla 6.

Tabla 7. Determinación del autovalor de la matriz A.

Autovector	$A \cdot x$	$\lambda = \frac{A \cdot x}{x}$	$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$	$CR = \frac{CI}{IA}$
0.078	0.392	5.049		
0.138	0.694	5.049		
0.265	1.338	5.049	0.012	0.0109
0.051	0.255	5.049		
0.469	2.369	5.049		

Fuente: Elaboración propia.

De esta misma forma se obtuvieron los subcriterios de integridad, corresponsabilidad y especialidad, que se presentan en las Tablas 8, 9 y 10; en el resumen de la Figura 3 se observan las ponderaciones globales y locales.

Tabla 8. Subcriterios de integridad.

	Controles clave	Liderazgo	Gestión del riesgo	Autovector
Controles clave	1	1/2	2	0.297
Liderazgo	2	1	3	0.540
Gestión del riesgo	½	1/3	1	0.163

CR= 0.061

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Subcriterios de corresponsabilidad.

	Cultura de DS	Capacidad de creación	Gestión de recursos	Evaluación Ambiental	Autovector
Cultura de DS	1	2	½	1/3	0.157
Capacidad de creación	½	1	1/3	1/5	0.088
Gestión de recursos	2	3	1	1/2	0.272
Evaluación Ambiental	3	5	2	1	0.483

CR= 0.066

Fuente: Elaboración propia.

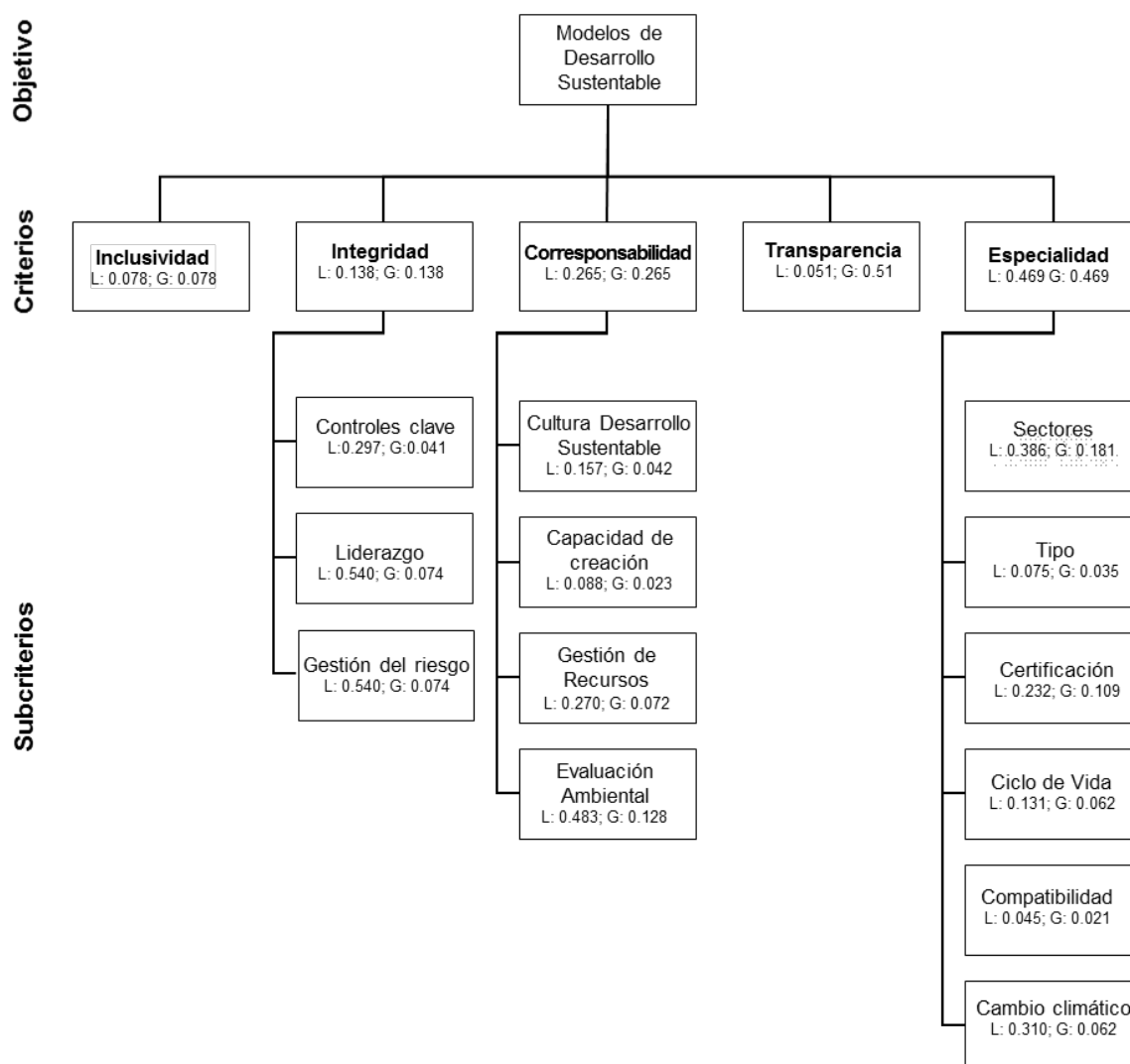
Tabla 10. Subcriterios de especialidad.

	Sectores	Tipo	Certificación o verificación	Ciclo de Vida	Compatibilidad	Cambio climático	Autovector
Sectores	1	5	2	3	7	3	0.386
Tipo	1/5	1	1/3	1/2	2	1/2	0.075
Certificación o verificación	1/2	3	1	2	5	2	0.232
Ciclo de Vida	1/3	2	1/2	1	3	1	0.131
Compatibilidad	1/7	1/2	1/5	1/3	1	1/3	0.045
Cambio climático	1/3	2	1/2	1	3	1	0.31

CR= 0.048

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Ponderaciones de componentes del modelo jerárquico.



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Jerarquización de alternativas y síntesis.

Con la totalidad de comparaciones, se obtiene el ordenamiento de las alternativas, gracias a la jerarquización de estos modelos. La síntesis de los subcriterios en relación a su criterio con las ponderaciones totales, se efectuó en la última comparación en relación al objetivo establecido (Tabla 11).

Tabla 11. Comparaciones entre los modelos de desarrollo sostenible.

Alternativas	Criterios					Ponderación de las Alternativas
	Inclusividad	Integridad	Corresponsabilidad	Trasparencia	Especialidad	
AA 1000	0.1279	0.0658	0.0565	0.1185	0.0640	0.0699
GRI	0.1279	0.0827	0.1025	0.1185	0.0793	0.0917
IFC	0.0387	0.0300	0.0395	0.0360	0.0536	0.0446
Protocolo IHA	0.1279	0.1244	0.1025	0.1185	0.1145	0.1139
BS 8900	0.1279	0.1244	0.1299	0.1185	0.0926	0.1109
DJSI	0.0672	0.1150	0.0806	0.0628	0.1184	0.1011
Pacto Mundial	0.0232	0.0347	0.0452	0.0628	0.0549	0.0475
FTSE4 Good	0.0672	0.0827	0.0933	0.0628	0.0713	0.0779
IPC Sostenibilidad	0.0672	0.0827	0.0806	0.0628	0.0575	0.0681
WCD	0.0672	0.1045	0.0700	0.1185	0.0967	0.0895
RSAT	0.0672	0.0921	0.1010	0.0628	0.0984	0.0940
Política de Seguridad	0.0232	0.0264	0.0307	0.0215	0.0454	0.0359
Principios de Ecuador	0.0672	0.0347	0.0678	0.0360	0.0536	0.0549
Ponderaciones	0.0776	0.1375	0.2650	0.0506	0.4693	

Fuente: Elaboración propia.

Con el cálculo valores globales y locales de los criterios y subcriterios, se consiguen los resultados finales y el orden para cada una de las alternativas (Tabla 12).

Tabla 12. Ranking de alternativas.

Alternativas	Ponderación Global	Orden
Protocolo IHA	0.1139	1
BS 8900	0.1109	2
DJSI	0.1011	3
GRI	0.0917	4
RSAT	0.094	5
WCD	0.0895	6
FTSE4 Good	0.0779	7
AA 1000	0.0699	8
IPC Sostenible	0.0681	9
Principios de Ecuador	0.0549	10
Pacto Mundial	0.0475	11
IFC	0.0446	12
Políticas de Seguridad	0.0359	13

Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior y como resultado del análisis de los modelos comparados, el Protocolo de la IHA es el modelo de desarrollo sostenible más apropiado para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica: como se desprende del análisis y datos reportados, obtuvo una prioridad de 11.4%. El segundo modelo fue el BS 8900, con una prioridad de 11.1%. Finalmente, las políticas de seguridad son las que se ubican en el último lugar, con una prioridad de 3.65%.

4.3. Análisis de Sensibilidad.

A continuación, se presenta un análisis de sensibilidad por escenarios considerando cambios significativos en las ponderaciones de los criterios (Tabla 13):

1. Inclusividad como criterio más importante
2. Integridad como criterio más importante
3. Corresponsabilidad como criterio más importante
4. Transparencia como criterio más importante

Este análisis emplea herramientas informáticas de cálculo (en este caso se empleó el software Web-HIPRE). El análisis consiste en realizar variaciones en las ponderaciones de los criterios y observar, numérica y gráficamente, cómo estos cambios afectan al resto de los valores de las alternativas y su jerarquización (Figura 4).

Es importante tener en cuenta que existen muchas más posibilidades, como las anteriores, para realizar permutaciones y/o alteraciones a los valores de los criterios, que permiten al método ser fluctuante ante posibles adecuaciones por actualizaciones de los modelos de desarrollo sostenible.

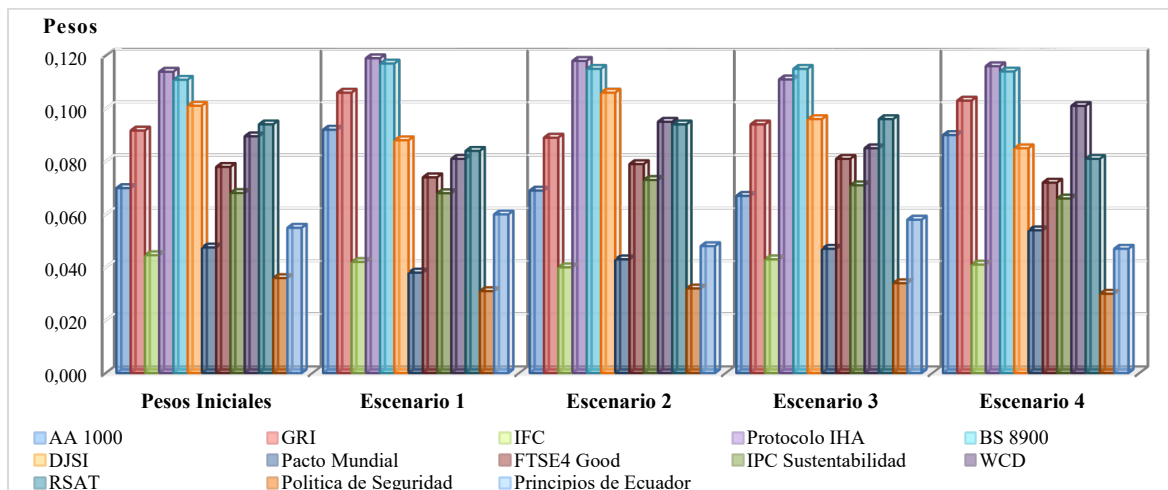
En la Tabla 13 se muestran las ponderaciones de los modelos en cada escenario.

Tabla 13. Escenarios del análisis de sensibilidad.

Alternativas	Valores				
	Inicial	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
AA 1000	0.0699	0.092	0.069	0.067	0.090
GRI	0.0917	0.106	0.089	0.094	0.103
IFC	0.0446	0.042	0.040	0.043	0.041
Protocolo IHA	0.1139	0.119	0.118	0.111	0.116
BS 8900	0.1109	0.117	0.115	0.115	0.114
DJSI	0.1011	0.088	0.106	0.096	0.085
Pacto Mundial	0.0475	0.038	0.043	0.047	0.054
FTSE4 Good	0.0779	0.074	0.079	0.081	0.072
IPC Sostenibilidad	0.0681	0.068	0.073	0.071	0.066
WCD	0.0895	0.081	0.095	0.085	0.101
RSAT	0.0940	0.084	0.094	0.096	0.081
Política de Seguridad	0.0359	0.031	0.032	0.034	0.030
Principios de Ecuador	0.0549	0.060	0.048	0.058	0.047

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Análisis de sensibilidad del Ranking de alternativas.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de la Tabla 13 y graficados en la Figura 4, muestran los cuatro escenarios y los cambios en las ponderaciones de los criterios. Sólo en el escenario tres al asignarle un mayor valor al criterio de corresponsabilidad, el modelo de la norma BS 8900 ocupa el primer puesto. En los otros escenarios el Protocolo del IHA se mantiene en el primer sitio y, en todos los escenarios, el modelo de políticas de seguridad del Banco Mundial obtuvo la menor ponderación.

5. Conclusiones.

Después de analizar los modelos de desarrollo sostenible, se detalló la aplicación del método multicriterio AHP que se empleó para jerarquizarlos. Aquí se identificaron algunos aciertos, en particular con modelo del protocolo del IHA que permite enunciar los siguientes aspectos conclusivos:

- Con base en el análisis de resultados se determinó que el Protocolo de la IHA es el modelo de desarrollo sostenible más apropiado para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica con un 11.3%. Otros modelos que también evalúan la sostenibilidad hidroeléctrica fueron RSAT y WCD que obtuvieron ponderaciones del 9.4% y 8.95% respectivamente.
- En el análisis de sensibilidad empleando el software Web-HIPRE, se observa que de los cuatro escenarios propuestos en tres el Protocolo de la IHA mantiene el primer lugar, validando su selección; sólo en el escenario donde se le asignó mayor valor al criterio de corresponsabilidad, el modelo del BS 8900 ocupa el primer puesto.
- Se observa que el protocolo del IHA se pueden beneficiar de otros modelos, como del BS 8900 al incorporar la sostenibilidad al sistema de gestión de la organización; las normas AA1000 facilitan la rendición de cuentas a las partes interesadas; el GRI fomenta la transparencia a través de informes con indicadores de sostenibilidad; lo anterior permite robustecer, evidenciar y adoptar las mejores prácticas en el sector hidroeléctrico.
- El trabajo ayuda a quienes buscan justificar su decisión de seleccionar un modelo de desarrollo sostenible, ya que permite incorporar más criterios, subcriterios y alternativas a los indicados en este estudio, por la flexibilidad y simplicidad del método AHP. Por otra parte, cabe la mención que cuanto mayor sea la agregación, el método AHP mostrará mayores complicaciones, lo que ocasionaría desconciertos en los cálculos de su operación.

- Se cumplió el objetivo que se centró en la caracterización de los modelos mediante la identificación de criterios de sostenibilidad, de donde se eligió el más adecuado, como se evidenció en los elementos conclusivos incluidos, para atender diferentes necesidades como las de la sostenibilidad hidroeléctrica.

Por lo anterior, me permito recomendar con apego a los resultados de este estudio que considero factible la aplicación de este modelo en las disciplinas de calidad, medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo, gestión de riesgo, partes interesadas, entre otros. También se podrán incorporar en trabajos futuros otros criterios, subcriterios o modelos de desarrollo sostenible, así como la utilización de otros métodos multicriterio grupales como el AHP-GP y fuzzy opinión.

Referencias

- AccounAbility (2008). *AA1000APS: Norma de Principio de Sostenibilidad*. London: AccounAbility.
- Afgan, N., & Carvalho, M. (2002). Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 27(8), 739-755 . DOI: 10.1016/S0360-5442(02)00019-1.
- Ali, Y., Butt, M., Sabir, M., Mumtaz, U., & Salman, A. (2018). Selection of suitable site in Pakistan for wind power plant installation using analytic hierarchy process (AHP). *Journal of Control and Decision*, 5(2), 117-128. DOI: 10.1080/23307706.2017.1346490.
- Al Garni, H., & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206, 1225-1240. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.024.
- Arancibia, S., Contreras, E., Mella, S., Torres, P., & Villablanca, I. (2003). *Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva. Memoria de Ingeniero Civil Industrial*. Universidad de Chile, Santiago.
- Arnaiz, M., Cochrane, T., Dudley, N., & Chang, T. (2018). Facilitating universal energy access for developing countries with micro-hydropower: Insights from Nepal, Bolivia, Cambodia and the Philippines. *Energy Research & Social Science*, 46, 356-367. DOI: 10.1016/j.erss.2018.07.016.
- Ávila, R. (2000). *El AHP, proceso analítico jerárquico y su aplicación para determinar los usos de las tierras: El caso de Brasil. Informe técnico*. Proyecto Regional Información sobre Tierras y Aguas para un Desarrollo Agrícola Sostenible (Proyecto Gcp/Rla/126/Jpn). Santiago, Chile.
- Azizkhani, M., Vakili, A., Noorollahi, Y., & Naseri, F. (2017). Potential survey of photovoltaic power plants using Analytical Hierarchy Process (AHP) method in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1198-1206. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.103BSI (2013).
- BS 8900-1:2013 (2013). *Managing sustainable development of organizations. Guide*. London: The British Standards Institution.
- Banco Mundial (2012). *Safeguard Policies*. Recuperado de <http://go.worldbank.org/WTA1ODE7T0>.
- Bhandari, R., Saptalena, L.G., & Kusch, W. (2018). Sustainability assessment of a micro hydropower plant in Nepal. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1), 1-15. DOI: 10.1186/s13705-018-0147-2.

- BMV (2013). *Guía de ayuda para las Empresas Emisoras que cotizan en la Bolsa Mexicana respecto de la información que deberá estar disponible de manera pública y ser susceptible de evaluación para el Índice IPC Sustentable*. México: Bolsa Mexicana de Valores.
- BSI (2013). *BS 8900-1. Managing sustainable development of organizations*. London: The British Standards Institution.
- Caballero, R., & Romero, C. (2006). Teoría de la Decisión Multicriterio: Un Ejemplo de Revolución Científica Kuhniana. *Boletín de Estadística e Investigación Operativa*, 22 (4), 9-15.
- Calabrese, A., Costa, R., Levialdi, N., & Menichini, T. (2016). A fuzzy analytic hierarchy process method to support materiality assessment in sustainability reporting. *Journal of Cleaner Production*, 121, 248-264. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.005.
- Casañ, A. (2013). *La desición multicriterio; aplicación en las selección de ofertas competitivas en edificación* (Tesis de maestría), Universidad Politecnica de Valencia, Valencia.
- Castillo, M., Álvarez, A., Alfaro, M., Sánchez, J., & Quezada, I. (2018). Factores clave en el desarrollo de la capacidad emprendedora de estudiantes universitarios. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, (25), 111-129.
- CMMAD (1987). *Nuestro Futuro Común*. Madrid: Alianza Editorial.
- De Prada, J., Degioanni, A., Cisneros, J. Cantero, A., Gil, H., Tello, D., .Pereyra, C., & Giayetto, O. (2018). Planificación territorial: elección multicriterio interactiva del patrón de urbanización. Estudio de caso: Río Cuarto, Córdoba, Argentina. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, (26), 25-51.
- Escobar, M., & Moreno, J. (1994). Técnicas multicriterio discretas en la planificación de cuencas fluviales. *Estudios de Economía Aplicada*, (1), 7-30.
- FTSE (s.f.). *Índice FTSE4Good IBEX: Informe de Investigación y análisis*. Madrid: Grupo FTSE.
- Gil, A., & Barcellos, L. (2011). Los desafíos para la sostenibilidad empresarial en el siglo XXI. *Revista Galega de Economía*, 20 (2), 1-22.
- Global Compact (2019). Global Compact. Who we are. Recuperado de <https://www.unglobalcompact.org/what-is-gc>
- Gold, S., & Awasthi, A. (2015). Sustainable global supplier selection extended towards sustainability risks from (1+ n) th tier suppliers using fuzzy AHP based approach. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 966-971. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.208.
- Gómez, T., García, M., Guijarro, F., & Preuss, M. (2018). Methodology to assess the market value of companies according to their financial and social responsibility aspects: An AHP approach. *Journal of the Operational Research Society*, 69(10), 1599-1608. DOI: 10.1057/s41274-017-0222-7.

- Gómez, J., Soto, R., & Garduño, S. (2019). Determinación de las Ponderaciones de los Criterios de Sustentabilidad Hidroeléctrica mediante la Combinación de los Métodos AHP y GP Extendida. *Ingeniería*, 24(2), 116-142. DOI: 10.14483/23448393.14469.
- González, C., Garza, R., & Pérez, E. (2014). Enfoque híbrido simulación-proceso analítico jerárquico: caso de estudio del rediseño de un restaurante. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, (17), 23-41.
- Goyal, P., & Rahman, Z. (2014). Corporate sustainability performance assessment: an analytical hierarchy process approach. *International Journal of Intercultural Information Management*, 4 (1), 1–14. DOI: 10.1504/IJIIM.2014.065285.
- Grande, I., & Abascal, E. (2014). *Fundamentos y Técnicas de Investigación Comercial*. Madrid: ESIC Editorial.
- GRI (2019). *Information. About GRI*. Recuperado de <https://www.globalreporting.org/information/about-gri/Pages/default.aspx>
- Grisales, E., & Murillo, J. (2014). El mercado de bonos de carbono y su aplicación para proyectos hidroeléctricos. *Revista CINTEX*, 18, 131-143.
- Hart, S., & Milstein, M. (2003). Creating Sustainable Value. *The Academy of Management Executive*, 17(2), 56-67. DOI: 10.5465/AME.2003.10025194.
- Heo, E., Kim, J., & Boo, K. (2010). Analysis of the assessment factors for renewable energy dissemination program evaluation using fuzzy AHP. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2214-2220. DOI: 10.1016/j.rser.2010.01.020.
- Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill.
- IFC (2019). *About IFC. Overview*. Recuperado de https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/corp_ext_content/ifc_external_corporate_site/about+ifc_new
- IHA (2010). *Protocolo de Evaluación de la Sostenibilidad de la Hidroelectricidad*. London: Asociación Internacional de la Energía Hidroeléctrica.
- Ishfaq, S., Ali, S., & Ali, Y. (2018). Selection of Optimum Renewable Energy Source for Energy Sector in Pakistan by Using MCDM Approach. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2(1), 61-71. DOI: 10.1007/s41660-017-0032-z.
- Kocaoglu, D., Daim, T., Iskin, I., & Alizadeh, Y. (2016). Technology Assessment: Criteria for Evaluating a Sustainable Energy Portfolio. In T. U. Daim (Ed.), *Hierarchical Decision Modeling: Essays in Honor of Dundar F. Kocaoglu* (pp. 3-34). Cham: Springer International Publishing.
- Márquez, H. (1999). Métodos matemáticos de evaluación de factores de riesgo para el Patrimonio Arqueológico: una aplicación Gis del método de jerarquías analíticas de TL Saaty. *Spal*, 6, 21-37.

- Maurtua, D. (2006). *Criterios de Selección de Personal mediante el uso del proceso de análisis jerárquico. Aplicación en la selección de personal para la Empresa Exotic Foods SAC.* (Licenciado en Investigación Operativa), Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Meixner, O. (2009). Fuzzy AHP group decision analysis and its application for the evaluation of energy sources. In *Proceedings of the 10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process*, Pittsburgh, PA, USA.
- Menichini, T., & Rosati, F. (2014). A fuzzy approach to improve CSR reporting: an application to the Global Reporting Initiative indicators. *Procedia-Social and behavioral Sciences*, 109, 355-359. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.12.471.
- Mike, J. (2013). Reflections from EGOS 2012: culture, design and sustainability. *South Asian Journal of Global Business Research*, 2(1), 33-42. DOI: 10.1108/20454451311303275.
- Moreno, J., & Vargas, L. (2018). Decisión Multicriterio Cognitiva y el Legado del Proceso Analítico Jerárquico. *Estudios de Economía Aplicada*, 36, 67-80.
- MRC (s.f.). RSAT Overview: The Basin-wide Hydropower Sustainability Assessment Tool. Mekong River Commission. Recuperado de <http://www.mrcmekong.org/about-mrc/programmes/initiative-on-sustainable-hydropower/rsat-overview-the-basin-wide-hydropower-sustainability-assessment-tool/>
- Olcese, A., Rodríguez, M., & Alfaro, J. (2008). *Manual de la empresa responsable y sostenible: Conceptos y herramientas de la Responsabilidad Social Corporativa o de la Empresa.* Madrid: McGraw-Hill.
- Özçelik, F., & Öztürk, B. (2014). Evaluation of Banks' Sustainability Performance in Turkey with Grey Relational Analysis. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (63), 189-209.
- Patel, J., & Rana, S. (2018). A Selection of the Best Location for a Small Hydro Power Project using the AHP-Weighted Sum and PROMETHEE Method. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 26(4), 1591-1603.
- Patole, M., Bandyopadhyay, S., Foo, D., & Tan, R. (2017). Energy sector planning using multiple-index pinch analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(7), 1967-1975. DOI: 10.1007/s10098-017-1365-6.
- PNUMA (s.f.). *Dams and development project.* United Nations Environment Programmes: The World Commission on Dams.
- Principios de Ecuador (2013). *Una referencia del sector financiero para determinar, evaluar y gestionar los riesgos ambientales y sociales de los proyectos.* Equar Principles.
- Quintana, G. (2011). Antecedentes y Marco Conceptual del Desarrollo Sustentable. Villavicencio, M. (Ed.): *Desarrollo Sustentable en el contexto actual* (pp. 7-48). México.

- Ren, J., Xu, D., Cao, H., Wei, S., Dong, L., & Goodsite, M. (2016). Sustainability decision support framework for industrial system prioritization. *AIChE Journal*, 62(1), 108-130. DOI: 10.1002/aic.15039.
- RobecoSAM's (2014). *Corporate Sustainability Assessment Methodology*. Zurich: RobecoSAM's AG.
- Romanelli, J., Silva, L., Horta, A., & Picoli, R. (2018). Site Selection for Hydropower Development: A GIS-Based Framework to Improve Planning in Brazil. *Journal of Environmental Engineering*, 144(7), 1-10. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001381.
- RSAT (2013). *Draff The Manual Rapid Basin-wide Hydropower Sustainability Assessment Tool Version 4*.
- Saaty, T. (1980). *Multicriteria decision Making: The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw Hill.
- Saaty, T. (1997). *Toma de Decisiones para Líderes: El proceso analítico jerárquico la toma de decisiones en un mundo complejo*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty, T. & Vargas, L. (2012). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Springer.
- San Cristóbal, J. (2012). *Multi criteria analysis in the renewable energy industry*. Springer, London: Springer Science & Business Media.
- Sagbansua, L., & Balo, F. (2017). Decision making model development in increasing wind farm energy efficiency. *Renewable Energy*, 109, 354-362. DOI: 10.1016/j.renene.2017.03.045.
- Schwab, R. (1995). *Twenty years of policy recommendations for indigenous education: overview and research implications*. Australian: Australian National University.
- Strantzali, E., & Aravossis, K. (2016). Decision making in renewable energy investments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 885-898. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.021.
- Supriyasilp, T., Pongput, K., & Boonyasirikul, T. (2009). Hydropower development priority using MCDM method. *Energy Policy*, 37(5), 1866-1875. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.01.023.
- Van Marrewijk, M. (2010). A Typology of Institutional Frameworks for Organizations. *Technology and Investment*, 1(02), 101-109. DOI: 10.4236/ti.2010.12012.
- Wang, Z., Fung, R., Li, Y., & Pu, Y. (2016). A group multi-granularity linguistic-based methodology for prioritizing engineering characteristics under uncertainties. *Computers & Industrial Engineering*, 91, 178-187. DOI: 10.1016/j.cie.2015.11.012.
- WCD (2000). *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making The Report of the World Commission on Dams*. London: World Commission on Dams.

WEB-Hipre: Global decision support (Version 1.22) [software de computación] (2007). Helsinki University of Technology: Systems Analysis Laboratory.

Yue, H., Wei, Z., Junshan, G., Yihe, M., Junqi, D., Lingkai, Z., & Yanpeng, Z. (2018). Evaluation of the Three Gorges Dam project using multi-criteria analysis (MCA) based on a sustainable perspective. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 121(5), 1-7. DOI:10.1088/1755-1315/121/5/052066.

Zdanyte, K., & Neverauskas, B. (2014). Ensuring of sustainable development for contemporary organizations development. *Economics and management*, 19(1), 120-128. DOI: 10.5755/j01.em.19.1.5737.



Estimadores Bayesianos de distribuciones Weibull aplicados a un modelo de líneas de espera G/G/s

VARGAS-SÁNCHEZ, JHON JAIRO

Facultad de Ingeniería, Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena, Santa Marta (Colombia)
Correo electrónico: jvargass@unimagdalena.edu.co

CAUSADO, EDWIN

Facultad de Ingeniería, Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena, Santa Marta (Colombia)
Correo electrónico: ecausado@unimagdalena.edu.co

MERCADO, HUGO

Facultad de Ingeniería, Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena, Santa Marta (Colombia)
Correo electrónico: hmercado@unimagdalena.edu.co

RESUMEN

Se ha estudiado en la literatura la aproximación de los modelos G/G/s a partir de modelos markovianos M/M/s. Un estudio de un modelo de colas se presenta en el presente artículo usando tiempos de llegadas y servicios Weibull distribuidos cuya estimación de parámetros se realizó con el método Bayesiano cadena de Markov Monte Carlo, específicamente el muestreador de Gibbs. La aproximación de este modelo de líneas de espera es evaluada mediante simulación. Esta metodología se aplicó al caso de repartición de refrigerios en la Universidad del Magdalena en Santa Marta, Colombia. Los resultados muestran la utilidad y potencia para calcular indicadores de un sistema de colas cuando los tiempos entre llegadas y de atención se distribuyen como una Weibull.

Palabras clave: sistemas de colas, cadenas de Markov Monte Carlo, distribución Weibull, estimación bayesiana.

Clasificación JEL: C11; C13.

MSC2010: 60J20.

Bayesian estimators of Weibull distributions applied to a model of waiting lines G/G/s

ABSTRACT

The approximation of G/G/s models from Markov models M/M/s has been studied in the literature. The study of a queue model is detailed in the present article, using times of arrivals and time service distributed by Weibull whose estimation of parameters was performed with the Bayesian method Monte Carlo Markov chain, specifically the Gibbs sampler. The approximations of this model of waiting lines is evaluated by simulation. This methodology was applied to the case of delivery of refreshments to students of the University of Magdalena in Santa Marta, Colombia. The results show the utility and power to calculate indicators of a queue system when both, the arrival and attention times, are distributed as a Weibull.

Keywords: queue system, Monte Carlo Markov chain, Weibull distribution, bayesian estimation.

JEL classification: C11; C13.

MSC2010: 60J20.



1. Introducción.

Un modelo M/M/s es un tipo específico de modelos de líneas de espera. Según la notación de Kendal, las llegadas son exponencialmente distribuidas con media $1/\lambda$ y posee s servidores. Aplicaciones recientes de modelos M/M/s se pueden ver en Guerouahane, Aissani, Farhi y Bouallouche-Medjkoune (2017) en tráfico de carreteras, en Liu y Yu (2016) con sus comportamientos aleatorios externos que afectan la capacidad en el servidor. Investigaciones que usan otra filosofía de colas se observa en Alfa y He (2017) con un modelo PH/PH/k donde el cliente puede encontrar múltiples servidores disponibles y se tiene la capacidad de elegir el de mejor índice de atención. Las ecuaciones de modelos de colas se han desarrollado teniendo en cuenta como base la propiedad de falta de memoria de la distribución exponencial. Pero una dificultad se presenta cuando los tiempos de llegada y de servicios no se comportan de esta manera, pues no se pueden desarrollar analíticamente las ecuaciones de estado para modelos con distribuciones generales G/G/s (Hanschke, 2006). Por ejemplo, en los sistemas de comunicaciones, específicamente en tráfico en conexiones a Internet se trabajan con las llamadas distribuciones de cola larga (Paxon & Floyd, 1995) y (Ausín, Lillo, Ruggeri, & Wiper, 1998). Pero esas medidas de las distribuciones, como se afirma en (Ausín, Wiper, & Lillo, 2008), son usualmente descritas con distribuciones como la Pareto y la Weibull, desafortunadamente los sistemas de colas con tiempo de llegada y servicio con estas características son muy difíciles de analizar debido a la no existencia de sus momentos o de ajuste de las transformaciones de Laplace con expresiones explícitas (detalles en Abate, Choudhury & Whitt, 1994). Para dar solución a dicho problema, han surgido aproximaciones como la de Allen (1990) y Kraemer y Langenbatch-Belz (1976). Una aproximación más reciente es propuesta en Hanschke (2006), basándose en una técnica de clasificación de los retardos en tres partes, tiempo de lote (en inglés *Batching time*), tiempo de llegada y tiempo de servicio; asumiendo que hay un área de despacho inmediatamente después de la cola de llegadas y antes de entrar al servicio. En el presente artículo se usó una de estas aproximaciones, pues en el sistema real se observaron tiempos de llegadas y servicios que deberían ser modelados con una distribución distinta a la exponencial y se encontró que la distribución Weibull fue una buena alternativa.

Existe poca evidencia en la literatura del uso de la distribución Weibull para tiempos de llegada y servicio, pues las más consideradas son Erlang y Gamma. Sin embargo en (Chaudhry & Kim, 2016) se plantea una solución a un sistema $GI^X/Geom/1$ cuyos tiempos de llegada y servicios son discretos, pero dicha solución es encontrada con un patrón lognormal y Weibull. Otro uso de la distribución Weibull es presentado en (Ausín, Wiper, & Lillo, 2008), pero la aplicación de esta distribución se enmarca en los resultados de la solución de un sistema Coxian/Coxian/1, donde las distribuciones de llegada y servicio son aproximaciones del uso de una familia de distribuciones Coxian, pero su planteamiento original no era incluir tiempos Weibull distribuidos. En el presente artículo se presenta una propuesta que contribuye al tratamiento de sistemas G/G/s cuando las respectivas G's son distribuciones Weibull.

Aparte de las distribuciones de probabilidad de los tiempos, en el presente trabajo se considera la estimación Bayesiana de los parámetros de las mismas. Se puede decir que las inquietudes por la modelación de las líneas de espera a partir de estimaciones Bayesianas se produce antes y al comienzo de la anterior década con Armero y Bayarri (Bayesian prediction in m/m/1 queues, 1994), Armero y Bayarri (1997), Armero y Conesa (2000), Wiper (1998) y Ausín, Lillo, Ruggeri y Wiper (2003). En Wiper (1998) se realizan estimaciones Bayesianas para los modelos Er/M/1 y Er/M/c donde los tiempos de llegada son Erlang y los de servicios exponenciales. En Ausín, Wiper y Lillo (2004) se hace inferencia Bayesiana para modelos M/G/1, donde en las distribuciones generales se tratan una clase de mixturas Erlang. En Ausín, Wiper y Lillo (2008) se amplía el trabajo anterior a modelos GI/G/1. Es común que en estas investigaciones de estimación Bayesiana se emplee el método de cadenas de Markov de Monte Carlo (MCMC por sus siglas en inglés). El uso y la potencia de la estimación Bayesiana se empleará en el presente artículo integrado a una aproximación de modelo de colas debido a que los tiempos no son de naturaleza exponencial. El uso de la simulación permitirá validar la metodología empleada.

El resto del artículo se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 se revisan los conceptos de teoría de colas, modelos $M/M/1$, $G/G/s$ y sus aproximaciones. En la sección 2 también se revisan los conceptos de estimación Bayesiana utilizados. En sección 3 mostramos los resultados de aplicación a un caso real de la Universidad del Magdalena Santa Marta Colombia. En la sección 4, las conclusiones.

2. Análisis teórico.

2.1. Modelos de líneas de espera.

El modelo de colas básico, el $M/M/1$ nace de algunos supuestos, propiedades y teoría Estadística. Por ejemplo, se sabe que la distribución exponencial carece de memoria ya que la probabilidad de que ocurra una llegada en un tiempo mayor a $t + \Delta t$ no depende del valor de t dado en la anterior llegada. Esto se expresa matemáticamente como:

$$P\{T > t + \Delta t | T > t\} = \frac{P\{T > t \cap T > t + \Delta t\}}{P\{T > t\}} = e^{-\lambda \Delta t} = P\{T > \Delta t\},$$

donde λ es la tasa de llegadas. Las probabilidades de estado estable y los procesos de nacimiento y muerte son los otros referentes teóricos para construir las ecuaciones de desempeño (Wiston, 2008). Sea $P_{ij}(t)$ la probabilidad de pasar del estado i al estado j en un período t , también se puede pensar en $P_{ij}(t + \Delta t)$ con la misma interpretación.

Llegar al estado j en un tiempo $t + \Delta t$ partiendo del estado i es porque hasta el tiempo t se llegó al estado k y luego en $t + \Delta t$ pasó al estado j . Considérese el estado k como $j - 1$, $j + 1$, j o cualquier otro estado que matemáticamente se expresa con estas 4 probabilidades:

- $P_{i,j-1}(t) [\lambda_{j-1} \Delta t + o(\Delta t)]$ es la probabilidad que haya un nacimiento
- $P_{i,j+1}(t) [\mu_{j+1} \Delta t + o(\Delta t)]$ es la probabilidad de haya una muerte
- $P_{i,j}(t) [1 - \lambda_j \Delta t - \mu_j \Delta t - 2o(\Delta t)]$ es la probabilidad de que no haya ni nacimiento ni muerte
- $o(\Delta t)$ la de cualquier otro estado,

donde la función $o(\Delta t)$ nace de la expansión en serie de Taylor de $e^{-\lambda \Delta t} = 1 - \lambda \Delta t + o(\Delta t)$. Sumando las cuatro probabilidades anteriores, pasando el término $P_{ij}(t)$ a restar, luego dividir en ambos lados por Δt , calculando límite 1 cuando Δt tiende a cero y considerando las probabilidades de estado estable se llega a la ecuación (1):

$$\lambda_{j-1} P_{i,j-1}(t) + \mu_{j+1} P_{i,j+1}(t) - P_{ij}(t) \mu_j - P_{ij}(t) \lambda_j = 0 \quad (1)$$

De la ecuación (1) se desprenden las ecuaciones de desempeño de un sistema de líneas de espera $M/M/1$; el supuesto clave es que cuando t es muy grande, el sistema ha alcanzado el estado estable y las probabilidades P_{ij} se cambian por π_j , ya que no importa de qué estado partió el sistema (Wiston, 2008). Basado en las anteriores explicaciones y usando la siguiente notación se presentan las ecuaciones de estado estable (2) a (7).

- λ = número de llegadas al sistema por unidad de tiempo
- μ = número de clientes atendidos por unidad de tiempo
- L = número promedio de clientes presentes en el sistema de colas
- L_q = número promedio de clientes formados en la cola

- L_s = número promedio de clientes en servicio
- W = tiempo promedio que un cliente pasa en el sistema
- W_q = tiempo promedio que un cliente pasa en la cola
- W_s tiempo promedio que un cliente pasa en el servicio
- ρ = intensidad de tráfico

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (1)$$

$$L = \lambda W \quad (2)$$

$$L_q = \lambda W_q \quad (3)$$

$$L_s = \lambda W_s \quad (4)$$

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (5)$$

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (6)$$

2.1.1. Modelos M/M/s

Siendo s el número de servidores y π_0 la probabilidad de estado estable de que hayan cero clientes en el sistema, las ecuaciones (8) a (13) muestran las medidas de desempeño de un sistema de colas M/M/s.

$$\pi_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{s-1} \frac{(s\rho)^i}{i!} + \frac{(s\rho)^s}{s!(1-\rho)}} \quad (7)$$

$$P(j \geq s) = \frac{(s\rho)^s \pi_0}{s!(1-\rho)} \quad (8)$$

$$L_q = \frac{P(j \geq s)\rho}{1-\rho} \quad (9)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{P(j \geq s)}{s\mu - \lambda} \quad (10)$$

$$L = L_q + L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \quad (11)$$

$$W = \frac{L}{\lambda} = \frac{L_q}{\lambda} + \frac{1}{\mu} = W_q + \frac{1}{\mu} = \frac{P(j \geq s)}{s\mu - \lambda} + \frac{1}{\mu} \quad (12)$$

2.1.2. Modelos G/G/s

Para un sistema G/G/s la condición de estabilidad es:

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} < 1 \quad (13)$$

Una aproximación para calcular las medidas de desempeño es la de Allen-Cunneen que establece que:

$$W_q \approx W_{q,M/M/s} \left(\frac{C_a^2 + C_s^2}{2} \right), \quad (14)$$

donde $W_{q,M/M/s}$ es el tiempo de espera promedio en la cola en el sistema M/M/S, C_a^2 es el cuadrado del coeficiente de variación de las llegadas y C_s^2 es el cuadrado del coeficiente de variación del servicio. Con esta aproximación se pueden calcular las otras medidas de desempeño.

2.2. Estimación Bayesiana de parámetros.

Se usó estimación Bayesiana de parámetros a través del método cadenas de Markov de Monte Carlo (MCMC por sus siglas en inglés, Markov Chain Monte Carlo). Hay dos métodos tradicionales que han sido utilizados en simulaciones Monte Carlo: el muestreo por relevancia (conocido en inglés como importance sampling) y el muestreo por aceptación y rechazo. Este último se aplicó en la estimación de parámetros de los tiempos Weibull. Métodos MCMC, entre otros, están el algoritmo Metrópolis y el muestreador de Gibbs. Este último también se aplicó en la estimación de parámetros. En las siguientes subsecciones se explica el muestreo por rechazo y el muestreador de Gibbs.

2.2.1. Muestreo por aceptación y rechazo

Si se desea muestrear de una distribución univariada con densidad $p(\theta)$ que no es reconocible, se puede usar la densidad de distribución de su Kernel, denótese éste por $p_*(\theta)$, con $p_*(\theta) \propto p(\theta)$. La posterior a veces es irreconocible, pero esta es proporcional a la a priori multiplicada por la verosimilitud. Para muestrear de $p(\theta)$, el método muestreo de aceptación y rechazo usa otra densidad que es fácilmente muestreable, denotada por $q(\theta)$, para la que se puede encontrar una constante M tal que $p_*(\theta) \leq Mq(\theta)$ para todo θ . La función $Mq(\theta)$ es llamada la sobre envolvente del Kernel, idealmente que esté tan como sea posible a $p_*(\theta)$. Para muestrear $p(\cdot)$, se empieza muestreando $\theta \sim q(\cdot)$ y se genera $U \sim U[0, 1]$. Este valor de θ ó es aceptado como una muestra de $p(\cdot)$ o es rechazado y se empieza de nuevo. La variable aleatoria uniforme U determina si θ es aceptado o rechazado. En Christensen, Wesley, Branscum y Timothy (2011), para un θ dado, $Mq(\theta)U \sim U[0, Mq(\theta)]$. Se acepta el θ muestreado si $Mq(\theta)U < p_*(\theta)$ y se rechaza de otra forma. Son rechazados los valores de $Mq(\theta)U$ entre la sobre envolvente y la Kernel. La probabilidad de rechazo es pequeña si el área entre la envolvente y $p_*(\theta)$ es pequeña.

2.2.2. Muestreador de Gibbs

La idea de una cadena de Markov Monte Carlo (MCMC) es definir una secuencia de vectores aleatorios $\theta^1, \theta^2, \theta^3, \dots$ en la que la distribución de θ^k cercana al comienzo de la secuencia puede ser casi cualquier cosa pero a la larga las distribuciones se estabilizan hacia la distribución posterior (Christensen, Wesley, Branscum, & Timothy, 2011). MCMC se usa para muestrear de la distribución conjunta posterior. El muestreador de Gibbs es un método de construcción de cadena de Markov

cuando se puede aislar la distribución condicional de cada parámetro dados todos los otros parámetros.

Para ilustrar el método, supóngase que se tiene un vector de parámetros a estimar $\theta^k = (\theta_1^k, \theta_2^k, \theta_3^k)$, entonces se construye la cadena para posterior $p(\theta|y) = p(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, luego el muestreador de Gibbs está basado en muestrear las distribuciones condicionales determinadas por la posterior, esto es:

$$P_{1|23}(\theta_1|\theta_2, \theta_3); P_{2|13}(\theta_2|\theta_1, \theta_3); P_{3|12}(\theta_3|\theta_1, \theta_2)$$

Para definir la cadena de Markov, primero se muestrea θ^1 de la distribución inicial $q(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \equiv q_1(\theta)$. Esto puede ser un punto de distribución, o un valor inicial, o una selección aleatoria. De hecho en Christensen, Wesley, Branscum y Timothy (2011) se recomienda que puede ser conveniente tener tres bloques independientes así $\theta^1 = (\theta_1^1, \theta_2^1, \theta_3^1)$ como:

$$\theta_1^1 \sim q_1(\theta_1); \theta_2^1 \sim q_2(\theta_2); \theta_3^1 \sim q_3(\theta_3)$$

El segundo paso de la cadena es definir a θ^2 en tres fases, la primera

$$\theta_1^2 | \theta_2^1, \theta_3^1 \sim p_{1|23}(\theta_1 | \theta_2^1, \theta_3^1)$$

segunda

$$\theta_2^2 | \theta_1^2, \theta_3^1 \sim p_{2|13}(\theta_2 | \theta_1^2, \theta_3^1)$$

y tercera

$$\theta_3^2 | \theta_1^2, \theta_2^2 \sim p_{3|12}(\theta_3 | \theta_1^2, \theta_2^2)$$

Ahora generalizando, se muestrea $\theta^k = (\theta_1^k, \theta_2^k, \theta_3^k)$ como

$$\theta_1^k | \theta_2^{k-1}, \theta_3^{k-1} \sim p_{1|23}(\theta_1 | \theta_2^{k-1}, \theta_3^{k-1})$$

$$\theta_2^k | \theta_1^k, \theta_3^{k-1} \sim p_{2|13}(\theta_2 | \theta_1^k, \theta_3^{k-1})$$

$$\theta_3^k | \theta_1^k, \theta_2^k \sim p_{3|12}(\theta_3 | \theta_1^k, \theta_2^k)$$

La aplicación del muestreador de Gibbs con los pasos anteriores aplicados a estimación de parámetros de la distribución Weibull se da la siguiente forma.

Sea

$$y_i \sim Weib(\alpha, \lambda) \tag{15}$$

La función de densidad de probabilidad y la acumulada están dadas por las ecuaciones (17) y (18) respectivamente:

$$f(y_i | \alpha, \lambda) = \lambda \alpha y_i^{\alpha-1} e^{-\lambda y_i^\alpha}, y_i > 0 \tag{16}$$

$$F(y_i|\alpha, \lambda) = 1 - e^{-\lambda y_i^\alpha}, y_i > 0 \quad (17)$$

La función de verosimilitud es:

$$L(\alpha, \lambda) \propto \prod_{i=1}^n \lambda \alpha y_i^{\alpha-1} e^{-\lambda y_i^\alpha} = \lambda^n \alpha^n \left(\prod_{i=1}^n y_i \right)^{\alpha-1} \exp\left(-\lambda \sum_{i=1}^n y_i^\alpha\right) \quad (18)$$

Una selección de la distribución a priori es $\lambda \sim \text{Gamma}(a, b)$, α independiente de λ con densidad a priori $p_O(\alpha)$, entonces la a priori conjunta será

$$p(\alpha, \lambda) \propto p_O(\alpha) \lambda^{\alpha-1} e^{-\lambda b}, \quad (19)$$

y la densidad de la a posteriori

$$p(\alpha, \lambda|y) \propto \lambda^n \alpha^n \left(\prod_{i=1}^n y_i \right)^{\alpha-1} \exp\left(-\lambda \sum_{i=1}^n y_i^\alpha\right) p_O(\alpha) \lambda^{\alpha-1} e^{-\lambda b} \quad (20)$$

que a su vez es

$$\propto \lambda^{\alpha+n-1} \exp\left[-\lambda \left(b + \sum_{i=1}^n y_i^\alpha\right)\right] \alpha^n \left(\prod_{i=1}^n y_i \right)^\alpha p_O(\alpha) \quad (21)$$

La densidad condicional para $\lambda|\alpha, y$ es:

$$p(\lambda|\alpha, y) \propto \lambda^{\alpha+n-1} \exp\left[-\lambda \left(b + \sum_{i=1}^n y_i^\alpha\right)\right], \quad (22)$$

luego

$$\lambda|\alpha, y \sim \text{Gamma}\left(a + n, b + \sum_{i=1}^n y_i^\alpha\right) \quad (23)$$

La densidad condicional para $\alpha|\lambda, y$ es:

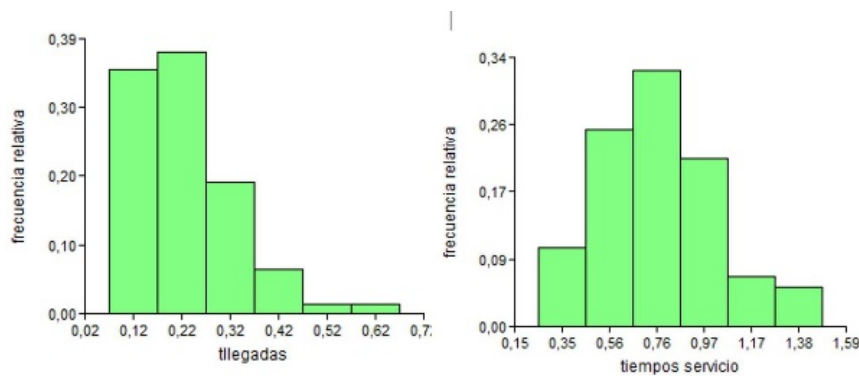
$$p(\alpha|\lambda, y) \propto \alpha^n \left(\prod_{i=1}^n y_i \right)^\alpha \exp\left(-\lambda \sum_{i=1}^n y_i^\alpha\right) p_O(\alpha). \quad (24)$$

No se conoce de ninguna opción para $p_O(\alpha)$ que haga la posterior conjunta reconocible. Pero en Christensen, Wesley, Branscum y Timothy (2011) recomiendan usar el muestreo de una distribución desconocida usando el muestreo por aceptación y rechazo, teniendo en cuenta que la full condicional es log cóncava siempre y cuando $p_O(\alpha)$ sea log cóncava.

3. Resultados.

En esta sección se presenta la aplicación de caso real en la Universidad del Magdalena en Santa Marta (Colombia) de un modelo $G/G/s$ con sus respectivas estimaciones de parámetros de distribuciones Weibull en las llegadas y servicio mediante MCMC. También se presenta la validación de los resultados mediante simulación. La Universidad del Magdalena a través de la unidad de Bienestar Universitario, reparte refrigerios a estudiantes. Se han tomado 80 datos aleatorios de tiempos de llegada de estudiantes a la cola para reclamar su refrigerio y 80 datos aleatorios de tiempo de servicio en la entrega de los refrigerios. La Figura 1 muestra los respectivos histogramas de tiempos de llegadas y de servicio donde es evidente que una distribución exponencial no es conveniente para modelar estos tiempos.

Figura 1. Histogramas de frecuencias para tiempo de llegadas y de servicio.



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 1 muestra las medidas descriptivas de la muestra aleatoria de los tiempos tomados en el sistema de repartición de refrigerios en la Universidad del Magdalena. En esta Tabla LI y LS son los límites inferior y superior al 95% respectivamente, están calculados por estimación paramétrica gracias al tamaño de la muestra haciendo uso del teorema del límite central; D.E es la desviación estándar; la varianza es la muestral (calculada con $n - 1$) y CV es el coeficiente de variación.

Tabla 1. Estadísticas básicas de la muestra aleatoria de los tiempos.

Variable	n	Media	$LI(95\%)$	$LS(95\%)$	D.E	Varianza	CV^2	Mediana
$t_{llegada}$	80	0.2313	0.2075	0.2550	0.1068	0.0114	0.2133	0.2083
$t_{servicio}$	80	0.7531	0.6947	0.8116	0.2626	0.0690	0.1216	0.7583

Fuente: Elaboración propia.

3.1. Inferencia sobre tiempos de llegadas.

Para realizar inferencias sobre el tiempo de llegada se hizo un tratamiento sobre la información a priori basado en Christensen, Wesley, Branscum y Timothy (2011) y luego se hicieron las inferencias sobre los parámetros α y λ .

3.1.1. Información a priori

La acumulada de la Weibull está dada por la ecuación (18) y la mediana ocurre cuando la probabilidad acumulada es 0.5, así que se tiene que $0.5 = e^{-\lambda y^\alpha}$ lo que lleva a que

$$y = (\ln(2)/\lambda)^{1/\alpha} \quad (25)$$

Dado que no se conoce la información de α , en el presente artículo se trabajó como información a priori $\alpha = 1$ con muy buenos resultados en el ajuste de la distribución, como se puede apreciar más adelante en la validación de la presente sección. Es de recordar que de todas maneras el proceso del muestreador de Gibbs en MCMC conducirá a valores estables de α . En el caso de los refrigerios la variable es el tiempo, así que en la ecuación (26) se cambiará y por t , en ese orden de ideas se tiene la siguiente ecuación para un tiempo t .

$$t = \ln(2) / \lambda \quad (26)$$

La ecuación (27) es una aproximación de la mediana, que será buena mientras α sea cercano a 1. Un tiempo a priori t_0 está dado entonces por $t_0 = \ln(2)/\lambda$. Para establecer un tiempo a priori t_0 se ha tomado como base lo que en [19] llaman “our best guess” que traduce algo muy similar a “nuestra mejor conjetura”. Dicha conjetura se estableció del histograma dado en la Figura 1, como 0.22 minutos, que llevándolo a la ecuación (27) se tiene que $\lambda_0 \equiv \ln(2)/t_0$ lo que conduce a que $\lambda_0 = 3.15$. Ahora bien, de acuerdo con la sección anterior y con la ecuación (24) se ha dicho de que λ sigue una distribución Gamma y que una selección a priori sería una *Gamma* $\sim (a, b)$ cuya moda es $(a - 1)/b$ que se expresa como:

$$\lambda_0 = (a - 1)/b \quad (27)$$

Resolviendo ecuación (28) se tiene:

$$a = 1 + \lambda_0 b = 1 + 3.15b \quad (28)$$

De acuerdo a lo que se ha observado se puede afirmar, como información a priori, que se tiene un 95% de seguridad de que el tiempo de llegadas t es menor a $u = 0.6$ minutos que se expresa como $Pr(t \leq u) = 0.95$ y usando ecuación (27) se tiene que:

$$0.95 = Pr\left(\frac{0.693}{\lambda} \leq u\right) \quad (29)$$

$$Pr\left(\lambda \geq \frac{0.693}{0.6}\right) = 0.95$$

$$Pr(\lambda \geq 1.155) = 0.95. \quad (30)$$

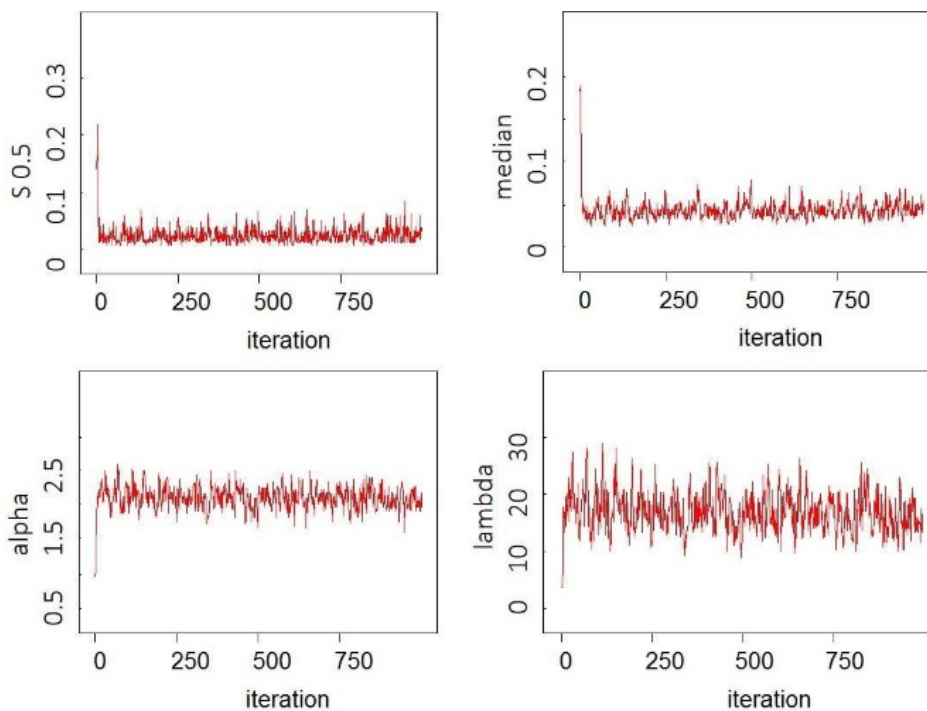
Dado que en su información a priori $\lambda \sim \text{Gamma}(a, b)$ y dado que la ecuación (29) relaciona valores a y b , entonces los valores que hacen que la ecuación (31) se cumpla son $a=2.213$ y $b=0.385$.

Con el anterior procedimiento se obtuvo la distribución a priori para la variación aleatoria λ que se usará para el muestreador de Gibbs. Como a priori para α se usó $Gamma(1, 1)$, basado en la explicación del método de aceptación y rechazo y logrando buenos resultados como se aprecia en la subsección validación de la presente sección.

3.1.2. Inferencia sobre los parámetros

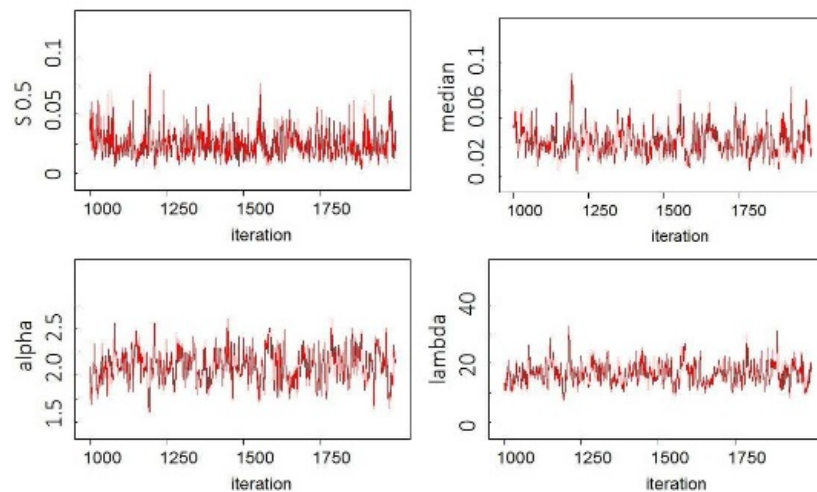
Usando el software Winbugs (Lunn, Thomas, Best & Spiegel, 2000), se hicieron inferencias sobre los parámetros α y λ además de inferir la mediana y alguna probabilidad de interés, en este caso se indagó sobre la probabilidad de que el tiempo de llegada fuera mayor a 0.5 que se denota por $S_{0.5}$ por su analogía con el análisis de supervivencia. El programa usa las a priori mencionadas en anterior subsección y realiza iteraciones según el muestreador de Gibbs para completar la cadena de Markov por el método Monte Carlo MCMC. La Figura 2 muestra la historia de las cadenas de Markov para $S_{0.5}$, mediana, α y λ haciendo 1000 iteraciones. Al parecer muestra cierta estabilidad en los parámetros. Sin embargo, se exploraron más iteraciones muestreando 2000 de ellas, lo que se puede observar en la historia de la cadena de Markov de la Figura 3. Se realizaron nuevas iteraciones buscando estabilizar aún más los parámetros, llegando a 20000 iteraciones (ver Figura 4).

Figura 2. Cadenas de Markov, 1000 iteraciones, al estimar parámetros en tiempo de llegada.



Fuente: Elaboración propia.

Figure 3. Cadenas de Markov, 2000 iteraciones, al estimar parámetros en tiempos de llegada.



Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar mediante los autocorrelogramas de la Figura 5 que la última cadena obtenida en Figura 4 se estabiliza, ya que la función de autocorrelación cae rápidamente a valores de cero, lo que da cuenta de correlaciones adyacentes.

En la Tabla 2 se presentan las estadísticas básicas de estimación dadas las 20000 iteraciones en las cadenas de Markov y dada la estabilidad observada en ellas. En la Figura 6 se presentan las gráficas de densidad de probabilidad de los parámetros estimados.

Tabla 2. Estadísticas básicas en la estimación de parámetros en tiempo de llegada.

	Media	D.E	CM_{error}	Percentil2.5	Mediana	Percentil97.5	Inicio	Muestra
S0.5	0.02406	0.01142	1.314E-4	0.00789	0.02208	0.05167	1001	20000
α	2.1	0.158	0.00244	1.795	2.098	2.419	1001	20000
λ	16.66	3.387	0.05114	10.9	16.34	24.25	1001	20000
Mediana	0.04335	0.00888	1.337E-4	0.02859	0.04243	0.0636	1001	20000

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Inferencias sobre tiempos de servicio.

Un procedimiento igual a la estimación de los tiempos de llegada se aplicó para los tiempos de servicio. Del histograma en la Figura 1 se obtuvo el “best guess” como $t_0 = 0.72$ minutos. Basados en la ecuación (27) se tiene que:

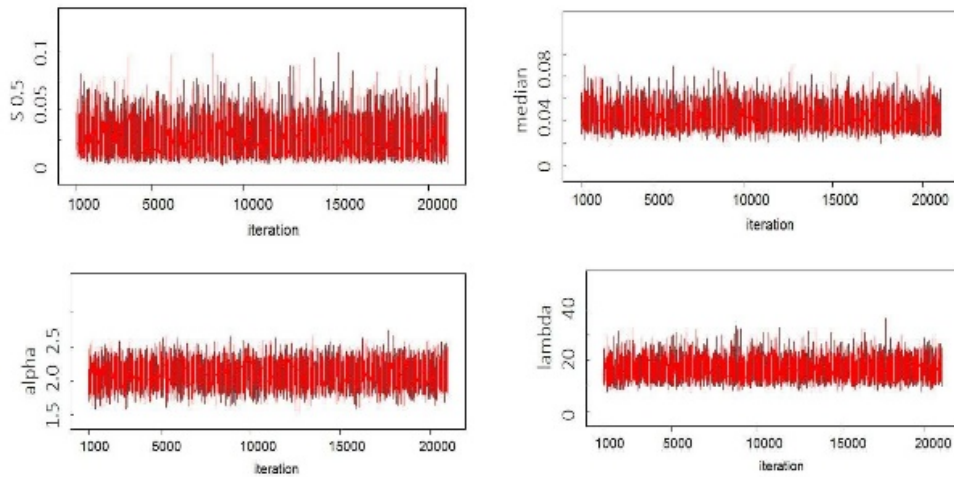
$$\lambda_0 \equiv \ln(2)/t_0$$

$$\lambda_0 = 0.912$$

La $Gamma(a, b)$ a priori tiene moda según ecuación (28) que resolviendo:

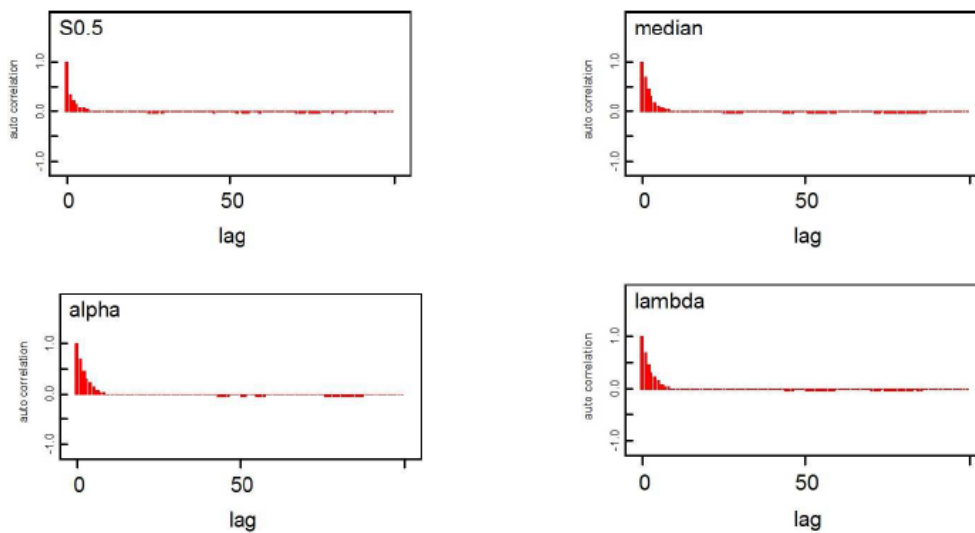
$$a = 1 + \lambda_0 b = 1 + 0.912b$$

Figura 4. Cadenas de Markov, 20000 iteraciones, al estimar parámetros en tiempo de llegada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Autocorrelogramas de las cadenas de Markov para parámetros en tiempo de llegada.



Fuente: Elaboración propia.

Se tiene un 95% de seguridad de que el tiempo de llegadas t es menor a $u = 2$ minutos que se expresa como $P r(t \leq u) = 0.95$. Ahora se tiene que aplicando ecuación (30):

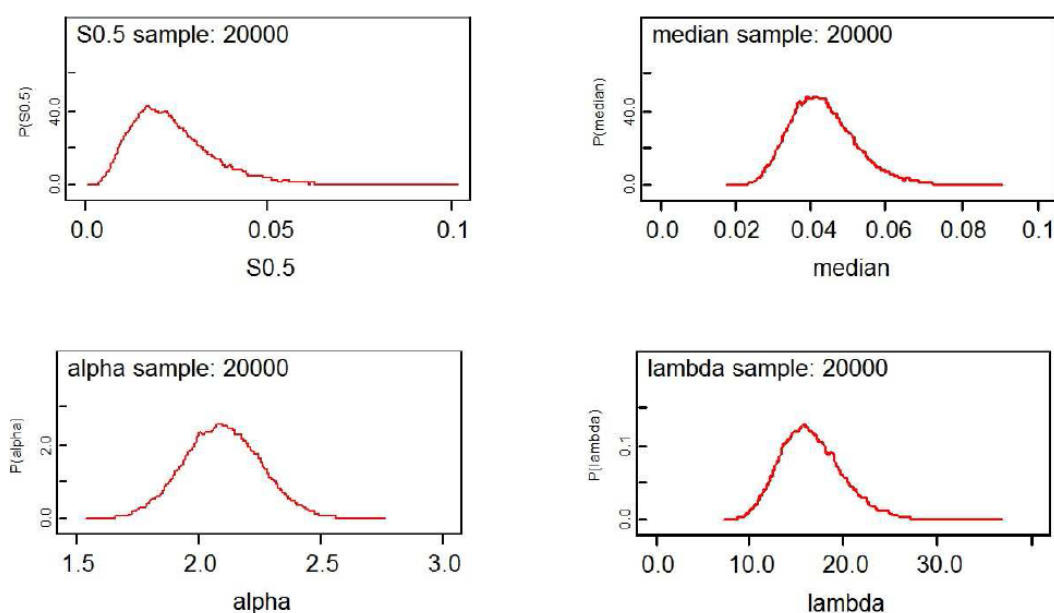
$$Pr\left(\lambda \geq \frac{0.693}{2}\right) = 0.95$$

$$Pr(\lambda \geq 0.346) = 0.95$$

Los valores que hacen que la última expresión se cumpla son $a = 2.45$ y $b = 1.59$.

Las Figuras 7 y 8 muestran cadenas de Markov con 1000 y 21000 iteraciones respectivamente.

Figura 6. Gráfica de densidad de probabilidad de los diferentes parámetros en las llegadas.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Estadísticas básicas en la estimación de parámetros tiempos de servicio.

	Media	D.E	CM_{error}	Percentil2.5	Mediana	Percentil97.5	Inicio	Muestra
S1.5	0.00399	0.00375	2.508E-5	3.608E-4	0.00288	0.014	1001	21000
α	3.064	0.2606	0.00179	2.571	3.059	3.586	1001	21000
λ	1.697	0.1886	0.001196	1.349	1.689	2.087	1001	21000
Mediana	0.4136	0.04653	2.943E-4	0.3322	0.4103	0.5142	1001	21000

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 se aprecian los autocorrelogramas de las cadenas en la estimación de parámetros para tiempos de servicio, mostrando caídas muy rápidas en la autocorrelación, lo que indica una fuerte estabilidad de la cadena MCMC dada en la Figura 8. La Figura 9 muestra las densidades de probabilidad de los parámetros estimados.

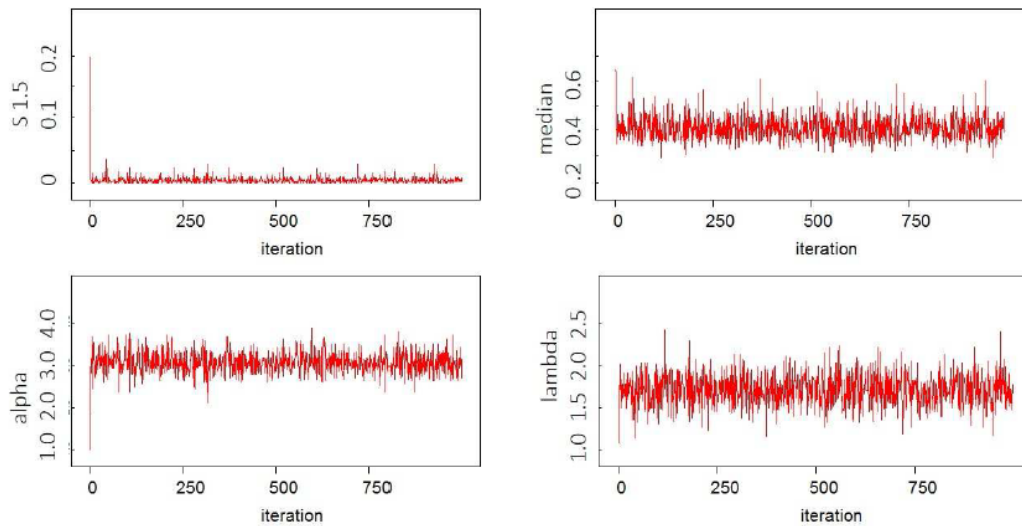
3.3. Medidas de desempeño.

El valor esperado de la distribución Weibull se puede apreciar en la ecuación (32).

$$E(y) = \Gamma\left(\frac{\alpha + 1}{\alpha}\right) / \lambda \quad (31)$$

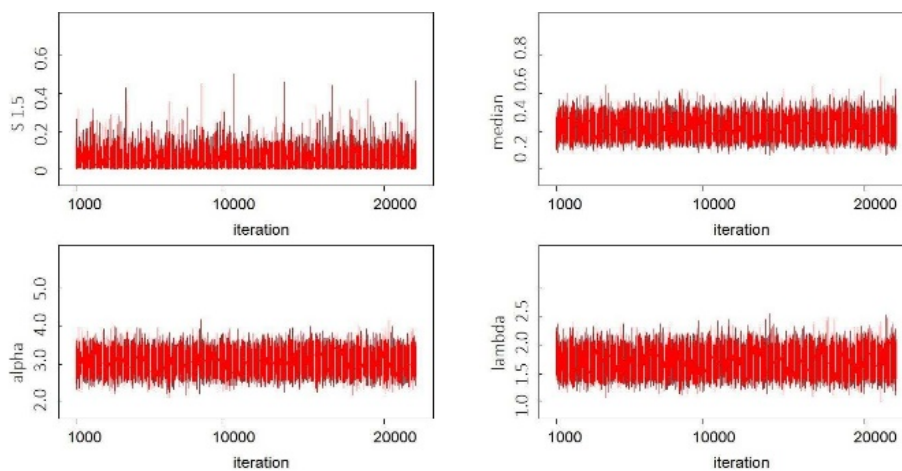
Una vez conseguidos los valores esperados del tiempo de llegada y tiempo de servicio, se usan sus inversos para establecer tasa de llegada y tasa de servicio, y así obtener la intensidad de tráfico de acuerdo con ecuación (2). Según Tablas 2 y 3, $t_{llegadas} \sim Weibull(2.1, 16.66)$ y $t_{servicio} \sim Weibull(3.064, 1.697)$. Con estos valores de los parámetros es posible calcular, valor esperado $E(t)$, varianza $Var(t)$, coeficiente cuadrado de variación $(Cv)^2$ y las tasas de llegada y servicios respectivamente medidas en personas/minuto. Estos resultados son mostrados en la Tabla 4.

Figura 7. Cadenas de Markov, 1000 iteraciones, al estimar parámetros en tiempo de servicio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Cadenas de Markov, 21000 iteraciones, al estimar parámetros en tiempo de servicio.

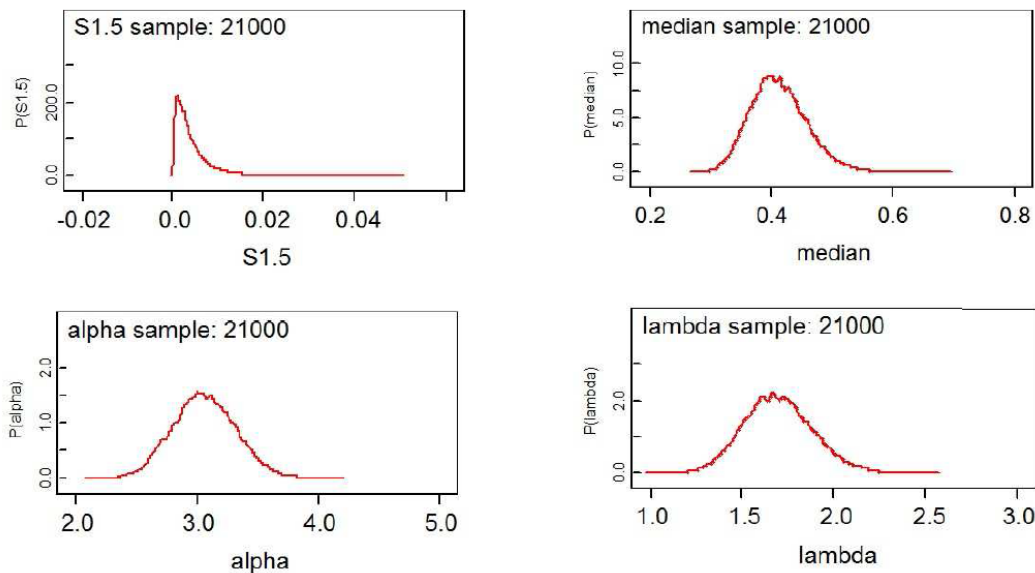


Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 4 la intensidad de tráfico $\rho = \frac{4.3098}{1.3295} = 3.241$ cuyo valor representa una amplificación de clientes en la cola y, por tanto, no hay una distribución estable. Para poder aplicar las ecuaciones de colas (8) a (13) es importante que $\rho < 1$ tal como lo establece ecuación (14). Se usó el supuesto de proyectar 4 servidores para estabilizar el sistema y poder calcular las ecuaciones de desempeño. Así como ahora $\rho = \frac{4.3098}{4 \times 1.3295} = 0.8103$ que representa un sistema estable. Con esta proyección de 4 servidores y una vez hechas las estimaciones necesarias se procede a establecer las respectivas medidas de desempeño del sistema de colas en la entrega de refrigerios de la Universidad del Magdalena para un sistema G/G/s, con G siendo una *Weibull*(α, λ) y $s = 4$.

La Tabla 5 muestra los cálculos efectuados a partir de las ecuaciones (8) a (13) y las estimaciones mostradas en las Tablas 2 y 3. Según Tabla 5, con 4 servidores, un estudiante pasaría en promedio en el sistema 0.8672 minutos y en la cola 0.1151 minutos y el tamaño de la cola crecería en promedio 3.7379 estudiantes cada minuto.

Figura 9. Gráfica de densidad de probabilidad de los diferentes parámetros en el servicio.



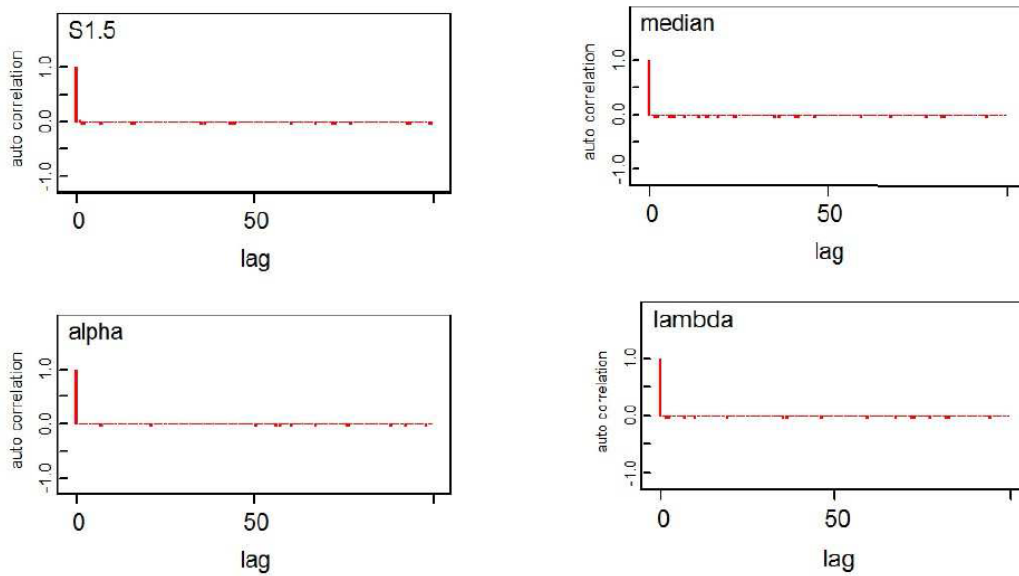
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Resultados de distribuciones de probabilidad a partir de la inferencia Bayesiana.

	α	λ	$E(t)$	$Var(t)$	$(Cv)^2$	Tasa
$t_{llegada} \sim Weibull(\alpha, \lambda)$	2.1	16.66	0.2330	0.0134	0.2502	4.3098
$t_{servicio} \sim Weibull(\alpha, \lambda)$	3.064	1.697	0.7521	0.0719	0.1271	1.3295

Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Autocorrelogramas de cadenas de Markov para parámetros en el tiempo de servicio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Medidas de desempeño sistema de refrigerios proyectando 4 servidores.

	π_0	$P(j \geq s)$	L_q	W_q	L	W
M/M/s	0.0253	0.6152	2.6297	0.6101	5.8713	1.3622
G/G/s			0.4963	0.1151	3.7379	0.8672

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Validación.

En esta parte se validarán los resultados encontrados en las estimaciones bayesianas y la aproximación del sistema $G/G/s$, ya que esta última se hizo mediante la fórmula de Allen-Cunneen.

La primera validación consiste en revisar las estadísticas básicas de la muestra con las que resultan de la estimación. Si se compara los resultados de la Tabla 1 con los de la Tabla 4 se nota un parecido importante en ellos. Además, nótese que en esta última tabla el valor esperado se encuentra dentro del intervalo de confianza calculado en la Tabla 1.

La segunda parte de la validación se realizó a través de una simulación hecha en el software Promodel. Los tiempos de llegada, que en Promodel se llaman arribos, se introdujeron con una distribución Weibull con los parámetros estimados en la Tabla 2 y el tiempo de procesamiento se introdujo con otra Weibull con las estimaciones ilustradas en Tabla 3. Se realizaron cuatro simulaciones, las primeras dos con 4 y 5 servidores y las otras dos con 1 y 2 servidores respectivamente. La razón de estas cuatro simulaciones es que con 4 y 5 servidores el sistema es estable y permite analizar las ecuaciones de desempeño, pero con 1 y 2 servidores no es posible calcular las medidas de desempeño

dadas en ecuaciones (8) a (13) (ver ecuación (14)), pero es interesante evaluar qué pasa con el caso de un servidor, pues al momento de la toma de datos esta era la realidad. En todas las simulaciones se hicieron 40 réplicas y se programó una variable que determinara el tiempo en la cola (equivalente a W_q) y el tiempo de ciclo (equivalente a W). Se espera que los valores arrojados por la simulación se parezcan a los valores de las medidas de desempeño de la Tabla 5. Se observó que la aproximación de Allen-Cunnen no es muy precisa para este caso, entonces para esta aplicación empírica se tanteó un factor de corrección en el promedio de los cuadrados de coeficientes de variación. Este factor de corrección lo denotamos por τ , y éste se multiplica por $\frac{c_a^2+c_s^2}{2}$. En la Tabla 6 se presentan los intervalos de confianza de las medidas de desempeño de una simulación en Promodel comparadas con las medidas de desempeño calculadas mediante aproximación Allen-Cunnen con la respectiva corrección propuesta en el presente artículo $\frac{c_a^2+c_s^2}{2}\tau$. En la parte izquierda de la Tabla se han calculado algunas medidas de desempeño para 4 y 5 servidores obtenidas en la simulación y los intervalos de confianza al 95%. En la parte derecha de la Tabla 6 las mismas medidas de desempeño pero calculadas a partir de fórmulas para sistema $G/G/s$, aproximación de Allen-Cunnen y corrección mediante nuestro factor τ , donde la distribución de los tiempos de llegadas y salidas son Weibull con parámetros estimados mediante estimación Bayesiana (Tablas 2 y 3).

Se puede observar en la Tabla 6 que para 4 servidores el factor de corrección τ que hace que todas sus medidas de desempeño de esta Tabla caigan en el intervalo de confianza establecido por la simulación es $\tau = 0.7$. Para el caso de 5 servidores el factor de corrección τ que hace que todas sus medidas de desempeño, de esta Tabla, caigan en el intervalo de confianza establecido por la simulación es $\tau = 0.4$. En ese orden de ideas la metodología propuesta establece que con 4 servidores, en promedio, una persona pasaría 0.8327 minutos en el sistema, 0.0806 en cola y el número de personas presentes en el sistema sería 3.589 estudiantes por minuto. Se encontró que $\tau = 0.4$ para un sistema de 5 servidores, en promedio, pasaría 0.7637 minutos en el sistema, 0.0115 en cola y el número de personas presentes en el sistema sería 3.2914 estudiantes por minuto.

Tabla 6. Comparaciones de medidas de desempeño.

	Simulación				Aproximación de estimadores Bayesianos							
	Media	E.E	LI(95%)	LS(95%)	$\tau = 1$	$\tau = 0.9$	$\tau = 0.8$	$\tau = 0.7$	$\tau = 0.6$	$\tau = 0.5$	$\tau = 0.4$	
W con $s = 4$	0.833	0.0066	0.8196	0.8463	0.8672	0.8557	0.8442	0.8327	0.8212	0.8097	0.7981	
W_q con $s = 4$	0.0813	0.0047	0.071	0.0907	0.1151	0.1036	0.0921	0.0806	0.069	0.0575	0.046	
L con $s = 4$	3.85	0.228	3.3888	4.3112	3.7379	3.6882	3.6386	3.589	3.5393	3.4897	3.4401	
W con $s = 5$	0.7597	0.0032	0.7533	0.7662	0.781	0.7781	0.7752	0.7723	0.7694	0.7695	0.7637	
W_q con $s = 5$	0.0109	0.0008	0.0092	0.0126	0.0289	0.026	0.0231	0.0202	0.0173	0.0144	0.0115	
L con $s = 5$	3.075	0.2303	2.6091	3.5309	3.3663	3.3586	3.3413	3.3289	3.3164	3.3039	3.2914	

Fuente: Elaboración propia.

Se ha hecho la simulación para el caso de un servidor, que era el caso real a la toma de datos, y se encontró que el sistema era inestable porque suponiendo tiempo infinito, la cola crecería indefinidamente. El caso real es que se atienden una cantidad de estudiantes y la cola se va evacuando al ritmo de un servidor. Pero se quiso entrar en más detalle de qué era lo que sucedía y por simulación se estableció una entrada de 200 estudiantes a la cola y se observó que en promedio un estudiante pasa 51.8 minutos haciendo cola antes de recibir su refrigerio, porque el tiempo de recibir su refrigerio en promedio es 0.7528 minutos. Se hicieron simulaciones con 1 y 2 servidores y se observó el sistema atendiendo 200, 300, 400 y 500 estudiantes, los resultados se muestran en la Tabla 7, en esta se pueden

apreciar las medidas de desempeño calculadas por simulación donde N es el número de estudiantes que entran al sistema y “ T para atender N (HR)” es el tiempo en horas que toma el sistema para atender esos N estudiantes.

Tabla7. Simulación para 1 y 2 servidores.

N	s	W	W_q	W_s	T para atender N (HR)
200	1	52.5553	51.8025	0.7528	2.51
300	1	78.9225	78.169	0.7535	3.77
400	1	104.34	103.592	0.748	5.02
500	1	130.9542	130.201	0.7532	6.28
200	2	15.1033	14.3527	0.7506	1.2
300	2	22.024	21.274	0.75	1.88
400	2	29.18	28.4302	0.7498	2.51
500	2	36.2258	35.4755	0.7503	3.13

Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones.

El propósito de este artículo fue proponer una metodología para modelar un sistema de colas $G/G/s$ donde G se distribuye como una Weibull en las llegadas y en el servicio. La metodología implica estimar los parámetros de las distribuciones por método de simulación de Estadística Bayesiana MCMC, específicamente el muestreador de Gibbs. Se ha encontrado que la aproximación de Allen-Cunneen no es del todo efectiva para las distribuciones Weibull, pero se aplica un factor de corrección que aproximó el sistema de colas adaptado a la repartición de refrigerios de la Universidad del Magdalena. Esta metodología presentada permitirá calcular medidas de desempeño de sistemas de colas cuando las llegadas y el servicio se comportan como una Weibull, incluso cuando se comportan de manera exponencial, ya que esta es un caso particular de la anterior.

Se encontraron cifras que permiten dar cuenta del desempeño actual del sistema de repartición de refrigerios en la Universidad del Magdalena, lo que apoya la toma de decisiones con mejor criterio.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad del Magdalena por la financiación del proyecto sobre teoría de líneas de espera. Los autores dan créditos a las Ingenieras Industriales de la Universidad del Magdalena Miggles Dayanna Manjarrés Ballestas y Linda Lucia Caicedo Vega por la toma de las muestras aleatorias.

Referencias

- Abate, J., Choudhury, G., & Whitt, W. (1994). Waiting-time tail probabilities in queues with long-tail service-time distributions. *Queueing Systems*, *16*, 311-338.
- Alfa, A.S., & He, Q.-M. (2017). Point of queue size change analysis of the ph/ph/k system with heterogeneous servers. *Operations Research Letters*, *45*, 581-584.
- Allen, A.O. (1990). *Probability, Statistics, and Queuing Theory with Computer Science Applications* (2 ed.). San Diego: Academic Press.
- Armero, C., & Bayarri, M. (1997). A bayesian analysis of a queueing system with unlimited service. *Journal of Statistical Planning and Inference*, *58*, 241-261. DOI:10.1016/S0378-3758(96)00086-9.
- Armero, C., & Bayarri, M. (1994). Bayesian prediction in m/m/1 queues. *Queueing Systems*, *15*, 401-417.
- Armero, C., & Conesa, D. (2000). Prediction in markovian bulk arrival queues. *Queueing Systems*, *34*, 327-350.
- Ausín, M., Lillo, R., Ruggeri, F., & Wiper, M. (1998). Heavy-tailed probability. En R. Adler, R. Feldman, & M. Taqqu, *A Practical Guide to Heavy Tails*. New York: Chapman Hall.
- Ausín, M., Lillo, R., Ruggeri, F., & Wiper, M. (2003). Bayesian modelling of hospital bed occupancy times using a mixed generalized Erlang distribution. En J. M. Bernardo, M. J. Bayarri, J. O. Berger, A. P. Dawid, D. Heckerman, A. F. Smith, & M. West, *Bayesian Statistics* (Vol. 7). Oxford: Oxford University Press.
- Ausín, M., Wiper, M. P., & Lillo, R. E. (2008). Bayesian prediction of the transient behaviour and busy period in short- and long-tailed gi/g/1 queueing systems. *Computational Statistics Data Analysis*, *52*, 1615-1635. DOI: 10.1016/j.csda.2007.05.009
- Ausín, M., Wiper, M., & Lillo, R. (2004). Bayesian estimation for the m/g/1 queue using a phase type approximation. *Journal of Statistical Planning and Inference*, *118*, 83-101. DOI:10.1016/S0378-3758(02)00398-1.
- Chaudhry, M.L., & Kim, J.J. (2016). Analytically simple and computationally efficient solution to gix/geom/1 queues involving heavy-tailed distributions. *Operations Research Letters*, *44*, 655-657. DOI: 10.1016/j.orl.2016.07.012.
- Christensen, R., Wesley, J., Branscum, A., & Timothy, E. (2011). *Bayesian Ideas and data analysis: An introduction for Scientists and Statisticians*. Boca Raton: CRC Press.
- Guerouahane, N., Aissani, D., Farhi, N., & Bouallouche-Medjkoune, L. (2017). M/g/c/c state dependent queueing model for a road traffic system of two sections in tandem. *Computers Operations Research*, *87*, 98-106. DOI:10.1016/j.cor.2017.05.017.
- Hanschke, T. (2006). Approximations for the mean queue length of the gix/g(b,b)/c queue. *Operations Research Letters*, *34*, 205-213. DOI:10.1016/j.orl.2005.01.011.

- Kraemer, W., & Langenbanch, B. (1976). Approximate formulae for the delay in the queuing system $g/g/1$. *Proceedings of the eighth international teletraffic congress* (págs. 235.1-235.8). Melbourne: Journal of Econometrics.
- Liu, Z., & Yu, S. (2016). The $m/m/c$ queueing system in a random environment. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 436, 556-567.
- Lunn, D., Thomas, A., Best, N., & Spiegelhalter, D. (2000). Winbugs a bayesian modelling framework: concepts, structure, and extensibility. *Statistical and Computing*, 10(4), 325-337. DOI:10.1023/A:1008929526011.
- Paxon, V., & Floyd, S. (1995). Wide-area traffic: the failure of poisson modeling. *IEEE Trans. Networking*, 3, 226-244.
- Wiper, M. (1998). Bayesian analysis of $er/m/1$ and $er/m/c$ queues. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 69, 65-79.
- Wiston, L. (2008). *Investigación de operaciones*. México: Cengage Learning.



Empaquetamiento e incentivos para mejoras en calidad

CORREA, ALEXANDER

Fundación Universitaria Los Libertadores (Colombia)

Correo electrónico: alexander.correa@libertadores.edu.co

RESUMEN

Este estudio presenta la competencia más allá de un solo mercado producto donde una firma multiproducto compite con rivales monoproducción mediante el uso de diferentes estrategias de empaquetamiento que impactan los incentivos de las firmas por realizar mejoras de calidad en diferentes modos. La estrategia de empaquetamiento puro puede hacer que la firma multiproducto invierta en mejoras de calidad cuando los costos asociados son comparativamente bajos y la utilidad adicional de la mejora de calidad es relativamente alta, pero desalienta a las firmas monoproducción a mejorar la calidad. En el caso de empaquetamiento mixto, este resultado inevitablemente sucede en el mercado más competitivo y probablemente se encuentra en el mercado menos competitivo cuando los mercados no son tan diferentes en intensidad competitiva. Por lo tanto, ambas estrategias de empaquetamiento afectan el excedente del consumidor cuando los dos mercados son significativamente diferentes en la intensidad de la competencia debido a la influencia negativa de las distorsiones del mercado después de interrelacionar los dos mercados.

Palabras clave: empaquetamiento, mejoras en calidad, telecomunicaciones, regulación.

Clasificación JEL: L13; L41; L51.

MSC2010: 00-02; 39-02.

Packaging and quality improvements

ABSTRACT

This study presents the competition beyond a single product market where a multi-product firm competes with monoprodut rivals through the use of different bundling strategies that impact the firms' incentives to make quality improvements in different ways. The pure bundling strategy can make the multi-product firm invest in quality improvements when the associated costs are comparatively low, and the additional utility of quality improvement is relatively high, but it discourages single-product firms from improving quality. In the case of mixed bundling, this result inevitably happens in the most competitive market, and is probably found in the less competitive market when markets are not so different in competitive intensity. Therefore, both bundling strategies affect the consumer surplus when the two markets are significantly different in the intensity of competition due to the negative influence of the market distortions after interrelating the two markets.

Keywords: packaging, quality improvements, telecommunications, regulation.

JEL classification: L13; L41; L51.

MSC2010: 00-02; 39-02.



1. Introducción.

La convergencia digital ha creado incentivos para que los operadores de telecomunicaciones expandan sus modelos de negocio y ofrezcan diferentes servicios todos bajo una misma marca. Por ejemplo, en Colombia, diferentes operadores de telecomunicaciones ofrecen paquetes triple play que incluyen TV por cable, banda ancha y telefonía fija. El operador aprovecha la lealtad de marca y ofrece descuentos atractivos a los consumidores por comprar el producto empaquetado. Los operadores multiproducto tienen una mayor probabilidad de ser dominantes ya que cuentan con más estrategias para competir que sus rivales monoproducto. Por ejemplo, cuando la competencia se da en precios, un operador multiproducto puede usar la estrategia de empaquetamiento para aumentar sus beneficios y aumentar su participación de mercado, en tanto que un operador monoproducto probablemente vea reducidos sus beneficios y consumidores. Si la estrategia de empaquetamiento es extremadamente agresiva, los operadores pequeños tienen una alta probabilidad de salir del mercado. Desde el punto de vista de la demanda, aunque algunos consumidores que compran el producto empaquetado se benefician de los descuentos, el hecho de que los precios individuales presenten distorsiones puede afectar a otros consumidores, especialmente a los usuarios monoproducto (Armstrong, 2011; Reisinger, 2006) reduciendo el excedente del consumidor agregado (Gans & King, 2006; Granier & Podesta, 2010; Reisinger, 2006; Rennhoff & Serfes, 2009). En el contexto de telecomunicaciones con el rápido crecimiento de tecnologías de última generación, el principal enfoque que se le da al tema del empaquetamiento no solo es de los precios individuales distorsionados, sino también el de los incentivos que se generan para implementar mejoras de calidad sobre los productos ofrecidos. Sin embargo, gran parte de la literatura existente solo enfatiza los efectos del empaquetamiento en un contexto de competencia en precios. Solo pocos estudios extienden las decisiones de las firmas a otros aspectos en el contexto de empaquetamiento, por ejemplo, elecciones de calidad y reducción de costos en I+D (Avenali, D'Annunzio & Reverberi, 2013; Choi, 2004; Krämer, 2009).

Desde un punto de vista más amplio, el presente estudio contribuye a la literatura existente a través de un modelo en el que los operadores en el mercado no solo compiten en precios, sino también realizan distintas decisiones de inversión sobre las características de calidad del producto (por ejemplo, una compañía de internet de banda ancha puede mejorar su estabilidad de conexión o el servicio al cliente para hacer su servicio comparativamente más atractivo que el servicio de sus competidores.).

Los operadores actuando en dos mercados duopólicos pueden inicialmente elegir sus propios niveles de mejora de calidad para posteriormente fijar precios (en este contexto, el tema de calidad no se relaciona con diferenciación vertical en calidad, donde los consumidores tienen diferentes preferencias por calidad de producto. En realidad, este modelo está basado en diferenciación horizontal donde los consumidores tienen diferentes gustos por un producto específico ofrecido por una firma en particular). La situación se modifica porque un operador monoproducto tiene ahora herramientas adicionales para responder a las estrategias agresivas del empaquetamiento del operador multiproducto. En un escenario de empaquetamiento puro, comparado con la situación donde no existe empaquetamiento, los incentivos del operador monoproducto para implementar mejoras de calidad se reducen. Entre tanto, en parte debido a su preocupación por la externalidad existente entre mercados, el operador multiproducto aumenta sus niveles de mejora de la calidad si dicho proceso es lo suficientemente costo eficiente en términos de generación de utilidad adicional. En el mercado monoproducto, el operador menos competitivo se ve obligado a reducir su precio, mientras que en el mercado más competitivo puede aumentar su precio cuando se beneficia significativamente de una reducción sustancial en la intensidad de la competencia con un número limitado de elecciones de producto que se da como consecuencia del empaquetamiento puro. Bajo empaquetamiento mixto, el operador multiproducto ofrece un descuento en el paquete en línea con los resultados estándar sobre fijación individual de precios (Armstrong, 2011; Reisinger, 2006). En el mercado más competitivo, se promueven las mejoras en la calidad de la firma multiproducto en contraste con el deterioro presentado por su contraparte monoproducto. Un resultado parecido se encuentra en mercados menos competitivos cuando los dos mercados son similares en términos de intensidad competitiva. Es posible que ambas estrategias de empaquetamiento reduzcan el excedente del consumidor cuando los dos mercados son significativamente diferentes en intensidad competitiva. En este caso, la distorsión ineficiente sobre el

consumidor predomina y el regulador debería monitorear la implementación de estrategias de empaquetamiento, especialmente cuando un mercado más competitivo está apalancado con uno menos competitivo. Sin embargo, las estrategias de empaquetamiento pueden ser un incentivo para implementar mejoras de calidad en algunas situaciones.

2. Revisión de la literatura.

La literatura existente analiza los resultados de mercado de las estrategias de empaquetamiento en diferentes situaciones de acuerdo al grado de competencia y de correlación en valor de los productos. En un marco de duopolio simétrico, la correlación de las valoraciones desempeña un papel importante. Bajo una correlación negativa, los consumidores son más homogéneos cuando ellos consideran comprar productos empaquetados en vez de productos individuales. El efecto “robo de negocios” domina el efecto ordenador del empaquetamiento. El efecto robo de negocios, *business stealing* en inglés, se refiere al efecto (negativo) sobre la demanda de los competidores cuando una firma realiza algún tipo de acción (generalmente en relación a la fijación de precios, pero podría ser cualquier elección de una variable estratégica de la empresa). Esto es opuesto a aumentar la demanda a través de consumidores que ya compran de la empresa, o atrayendo nuevos consumidores al mercado. Los beneficios de los operadores se reducen debido al dilema del prisionero que se da cuando ambos operadores eligen vender productos empaquetados y no productos individuales.

De otro lado, el resultado opuesto aplica cuando la situación es de correlación positiva de valoraciones (Reisinger, 2006). Esto puede aplicar a la situación de una fusión entre operadores monoproducto homogéneos bajo la correlación positiva de valoraciones en un modelo circular (Granier & Podesta, 2010) y eventos en los que las firmas competidoras “coluden” para ofrecer productos empaquetados que les permitan extraer la renta de los consumidores, situación que no se daría si decidieran competir en precios (Armstrong, 2011). Sin embargo, una vez dado el empaquetamiento, los precios individuales aumentan a pesar de que el producto empaquetado experimenta un descuento significativo (Armstrong, 2011; Reisinger, 2006). Adicionalmente, los operadores “persuaden” a los consumidores a través de sus estrategias a que éstos compren el producto empaquetado y no la combinación de productos individuales que eventualmente puede ser preferida por los consumidores. Debido a que puede ser usada como herramienta que los beneficios de los operadores pero que provoca ineficiencias distributivas, el empaquetamiento como estrategia puede ir en contra del bienestar del consumidor (Gans & King, 2006; Granier & Podesta, 2010; Reisinger, 2006; Rennhoff & Serfes, 2009) e incluso del bienestar social (Granier & Podesta, 2010).

Adicionalmente, en un contexto de competencia duopólica asimétrica, y debido a las estrategias de empaquetamiento, un operador multiproducto está en una mejor posición que un operador monoproducto. Nalebuff (2004) señala que la estrategia de empaquetamiento es una estrategia creíble para la empresa establecida en el mercado multiproducto para aumentar sus beneficios sin importar la decisión de entrada de una firma nueva. Este resultado está en línea con Choi (1996, 2004), donde se apoya la teoría de apalancamiento donde la empresa establecida en el mercado transfiere su poder de mercado del mercado monopolístico al mercado duopolístico. La estrategia de empaquetamiento es más razonable que la estrategia de limitar precios que obliga a la empresa establecida en el mercado a reducir sus beneficios. Gans y King (2006) encuentran que, en su modelo extendido de un operador integrado y dos operadores independientes, el bienestar social se reduce debido a la ineficiencia que se da en los productos asignados al consumidor a pesar de que no haya una estrategia de empaquetamiento por parte de los operadores independientes monoproducto. En contraste, si se permite que dos operadores independientes se fusionen, ellos lo harán, pero finalmente los dos operadores integrados no emplearán estrategias de empaquetamiento con el fin de minimizar la competencia. Como consecuencia se observará incrementos en bienestar social que lo que se daría en el caso de operadores independientes aliados compitiendo con productos empaquetados.

En la introducción de un grupo de consumidores monoproducto con el supuesto de ahorro en costos para los consumidores multiproducto que obtienen por realizar de “compras de una sola parada”, Thanassoulis (2007) concluye que bajo preferencias específicas a la firma, las firmas pueden aumentar su beneficio mediante el cobro de mayores precios individuales a este grupo de consumidores monoproducto comparado con la situación de no empaquetamiento y al mismo tiempo ofrecer un descuento en el producto empaquetado para atraer los consumidores multiproducto cuya demanda es más elástica que la de los consumidores monoproducto. Bajo preferencias específicas al producto (paquetes híbridos están disponibles), un dilema del prisionero ocurre cuando las firmas deciden vender productos empaquetados a pesar de que se presenten caídas en los beneficios. Como resultado, el excedente del consumidor bajo preferencias específicas a la firma se reduce, pero el excedente del consumidor bajo preferencias específicas al producto aumenta producto del empaquetamiento.

En el modelo extendido de diferentes grados de diferenciación de producto en dos mercados, Thanassoulis (2011) encuentra que, bajo convergencia parcial, la firma fusionada puede aumentar sus beneficios, aunque no ofrezca un descuento sobre el producto empaquetado. Los precios individuales del mercado más competitivo aumentan, pero los de los mercados menos competitivos se reducen debido a la estrategia de empaquetamiento que impacta de manera adversa a los consumidores monoproducto. A los consumidores multiproducto se les cobra un precio mayor, pero el excedente del consumidor de este grupo de consumidores es ambiguo de acuerdo al grado de competencia de los mercados. Bajo convergencia total, las dos firmas fusionadas bilateralmente deciden vender paquetes por lo que los productos empaquetados son ahora menos diferenciados debido a una reducción de los costos de degustación. Como resultado de una mayor competencia, ambas firmas fusionadas deciden ofrecer descuentos sobre el paquete. Comparado al escenario donde no existe convergencia, los precios individuales permanecen inalterados, pero los consumidores multiproducto disfrutan de descuentos competitivos sobre el producto empaquetado. En general, el excedente agregado del consumidor aumenta bajo un escenario de convergencia total. La firma fusionada en el escenario de convergencia total tiene menores beneficios que las firmas unilaterales fusionadas en el escenario de convergencia parcial. En contraste al resultado de Granier y Podesta (2010) y Reisinger (2006) en juegos de dos etapas donde las firmas pueden decidir sobre si ofrecen un descuento por paquetes, la primera fusión está en una ventaja distinta pero sus rivales deciden permanecer independientes para poder minimizar la competencia.

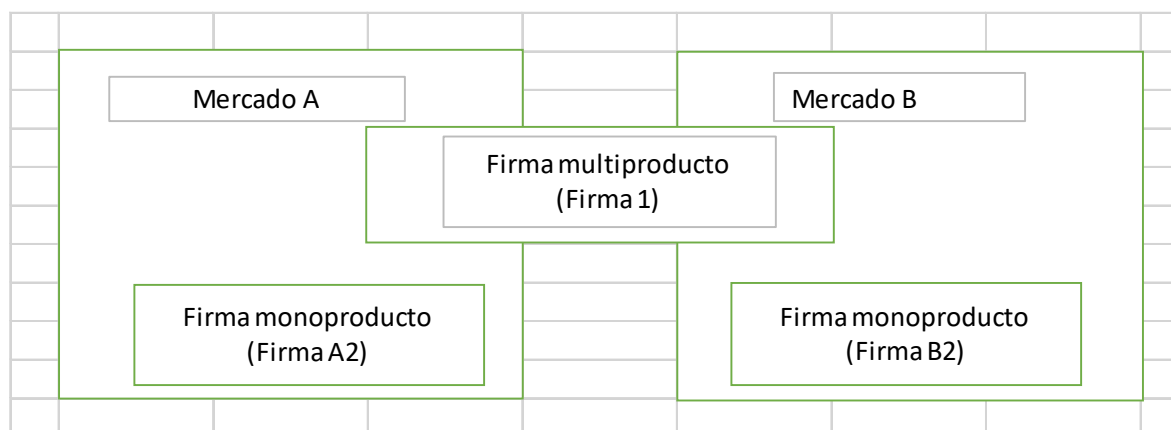
El empaquetamiento también influye en los incentivos de la firma para invertir en investigación y desarrollo. Las firmas multiproducto con estrategias de empaquetamiento invierten más en I+D en reducción de costos e innovación mientras que sus rivales monoproducto estratégicamente reducen sus inversiones (Choi, 2004; Heeb, 2003). En un escenario más amplio de diferenciación vertical, las firmas ofrecen diferentes niveles de calidad para llegar a diferentes grupos de consumidores (Tirole, 1988; Wauthy, 1996). Bajo un escenario de empaquetamiento, una firma multiproducto puede transferir su poder de mercado de un mercado a otro mercado duopolista mediante la estrategia de empaquetamiento puro. Esta firma se convierte en dominante y vende a los consumidores de alta calidad. Sus beneficios son más altos que de los rivales monoproducto que tratan de evitar la competencia atendiendo a los consumidores de baja calidad (Avenali, D’Annunzio & Reverberi, 2013; Krämer, 2009). Desde una perspectiva más amplia en inversión en calidad, el empaquetamiento puede tener efectos benéficos sobre el bienestar social en ciertas circunstancias (Avenali, D’Annunzio & Reverberi, 2013). En el mundo de negocios, las firmas atraen a consumidores mediante ofertas de diferentes tipos cuando la competencia se intensifica. Es necesario analizar la pregunta de los efectos que tienen diferentes estrategias de empaquetamiento sobre el bienestar en escenarios de fijación de precios para poder determinar si el regulador es capaz de hacer una valoración exhaustiva y cuidadosa de las estrategias de empaquetamiento y sus efectos sobre el bienestar.

Este estudio está organizado como sigue. El modelo de dos mercados duopolistas es detallado en la sección 2. El análisis de los resultados de mercado después de empaquetamiento se encuentra en la sección 3. Finalmente, la sección 4 contiene las conclusiones y algunas recomendaciones para los reguladores.

3. Modelo.

Existen una firma multiproducto y dos firmas monoproducción en dos mercados duopólicos. En el mercado A, la firma multiproducto compite con una firma monoproducción. En el mercado B, compite con la otra firma monoproducción.

Figura 1. Los dos mercados duopolísticos.



Fuente: Elaboración propia.

En cada mercado existen dos productos diferenciados horizontalmente por cada par de firmas competidoras (la diferenciación se da en productos no en firmas). La firma 1 tiene presencia en ambos mercados. Como se aprecia en la Figura 1, la firma 1 ofrece el producto A1 y el producto B1 para competir con las firmas A2 y B2 en los mercados A y B respectivamente. Los productos A y B pueden ser consumidos de manera independientemente (este modelo se enfoca en servicios de telecomunicaciones tales como TV por cable e internet de banda ancha. A diferencia de bienes informáticos, por ejemplo, computadores y software, estos servicios pueden ser consumidos separadamente.). Bajo un supuesto de demanda unitaria, cada consumidor puede comprar solo una unidad del producto A y una unidad del producto B (este supuesto puede ser aplicado a muchos servicios de telecomunicaciones. Por ejemplo, una familia normalmente se suscribe de manera mensual a un único proveedor de servicios para que le proporcione un paquete de telecomunicaciones tal como internet, cable, telefonía fija o móvil.). La firma 1 puede implementar estrategias de empaquetamiento para atraer consumidores en ambos mercados.

Firmas

La entrada al mercado ya ha ocurrido por parte de las firmas y los productos ofrecidos satisfacen los requerimientos mínimos de calidad impuestos por el regulador (los reguladores de telecomunicaciones monitorean permanentemente la calidad de los servicios de telecomunicaciones). De esta manera, los costos fijos de productos estándar son hundidos y se asume que son cero. Por simplicidad, se asume que el costo marginal constante del producto estándar es cero e igual para todas las firmas. Los servicios de telecomunicaciones incurren en costos fijos significativos en infraestructura, en tanto que los costos marginales son relativamente bajos. Adicionalmente, el costo marginal generalmente se calcula en términos constantes. Básicamente, las firmas compiten en precios. P_{ki} es el precio unitario del producto ki ; $k \in \{A, B\}$ e $i \in \{1, 2\}$.

Adicional a la competencia en precios, el modelo permite que las firmas diferencien sus productos a través de mejoras en la calidad de los mismos. Este modelo endogeniza las mejoras de calidad (éste no es un tema de diferenciación vertical en calidad). Es decir, cada consumidor percibe las

mejoras de calidad y recibe una utilidad adicional como resultado de la calidad mejorada del producto. β_{ki} es un nivel de mejora de calidad que una firma agrega a su producto estándar ki ; $k \in \{A, B\}$ e $i \in \{1, 2\}$. Este modelo está enfocado solo en $\beta_{ki} > 0$. Reducir la calidad desde el mínimo estándar no es práctico, especialmente en mercados que son monitoreados de manera cercana por los reguladores. Las firmas incurren en costos adicionales de inversión asociados con el nivel de mejora de calidad que ellas elijan. $I_k(\beta_{ki})$ es la función de costo de inversión en mejoras de calidad al nivel β_{ki} en el mercado k . La función de costos de inversión es convexa en el nivel de mejoras de calidad.

$$I_k(\beta_{ki}) = b_k \beta_{ki}^2$$

b_k es constante y positivo. Adicional a los costos de inversión, las mejoras en calidad de una firma pueden llevar a cambios en su costo marginal de producción. Se asume que las firmas tienen costos marginales de producción constantes (cm). Debido a costos marginales de producción de cero en el producto estándar, el costo marginal positivo es una consecuencia directa de la mejora en calidad, i.e. $cm = 0 + C_k(\beta_{ki}) = C_k(\beta_{ki})$. Se asume que $C_k(\beta_{ki})$ es una función lineal del costo marginal adicional de la mejora en el nivel de calidad β_{ki} del producto ki :

$$C_k(\beta_{ki}) = c_k \beta_{ki}$$

c_k es constante y positiva. Por ejemplo, una empresa de banda ancha puede agregar un servicio de wifi gratuito en lugares públicos para sus consumidores que ya tienen el servicio de banda ancha en casa. La compañía de banda ancha tiene que invertir en costos adicionales de inversión para proveer el servicio público de wifi e incurrir en costos marginales más altos. Asimismo, si una firma elige una mejora alta para su producto, cada unidad vendida tiene costos marginales de producción altos debido a los costos marginales positivos implicados por la mejora de calidad. Por simplicidad, la función de costo de inversión y la relación entre mejoras en la calidad y los costos marginales de producción son idénticos entre firmas en el mismo mercado. Las firmas pueden tener diferentes funciones de costos de mejoras de calidad porque tienen diferentes tecnologías, experiencias y conocimiento tácito (know how). Adicionalmente, para atraer consumidores, las firmas posiblemente usan diferentes métodos para aumentar el valor de sus productos. Sin embargo, en una primera etapa de este estudio, se asume que el proceso de mejora de calidad es de conocimiento común por lo que las firmas tienen las mismas funciones de costos de mejoras de calidad.

Consumidores

Cada consumidor compra tanto una unidad de producto A como una unidad de producto B (demanda unitaria). Algunos estudios endogenizan los usuarios livianos que compran tanto el producto A como el producto B. En este estudio, solo los usuarios pesados que compran ambos productos están enfocados porque ellos desempeñan un papel crucial en la fijación del empaquetamiento de productos.

Basándose en el modelo de Hotelling, los consumidores están uniformemente distribuidos en un cuadrado unitario $[0, 1]$. La combinación pura de $[A1B1]$ y $[A2, B2]$ está localizada en $(0, 0)$ y $(1, 1)$ respectivamente. En tanto que la combinación híbrida de $[A1, B2]$ y $[A2, B1]$ está localizada en $(0, 1)$ y $(1, 0)$ respectivamente. El número de consumidores se normaliza a 1.

Un consumidor tiene una preferencia dada por un producto en particular dependiendo de la distancia entre su ubicación y la ubicación del producto. Un consumidor incurre en una desutilidad cuando el producto que ha escogido no es exactamente su producto ideal, que debería estar en la misma ubicación donde está el consumidor. t_k es el costo de degustación que se refiere a la desutilidad por distancia en el mercado k . El costo de degustación es equivalente al costo de transporte en el modelo de Hotelling, que inversamente representa el grado de sustituibilidad entre dos productos rivales en el mercado. Se asume que el mercado A es más competitivo que el mercado B. $t_A = \theta t$; $t_B = t$; $\theta \in (0, 1)$. Cuando el costo de degustación se reduce, los dos productos diferenciados en el mercado son más sustituibles. Así que, el mercado es más competitivo en el aspecto de sustituibilidad. V_k es la utilidad bruta del producto estándar k , que es idéntica entre consumidores. V_k es lo suficientemente alta

para garantizar que cada consumidor participa en el mercado y la demanda es atendida por las firmas. Cuando una firma elige la mejora de calidad del producto k_i al nivel β_{ki} , los consumidores perciben dicha mejora de calidad y reciben una utilidad adicional $v_k(\beta_{ki})$ del producto ki .

$$v_k(\beta_{ki}) = \alpha_k \beta_{ki}$$

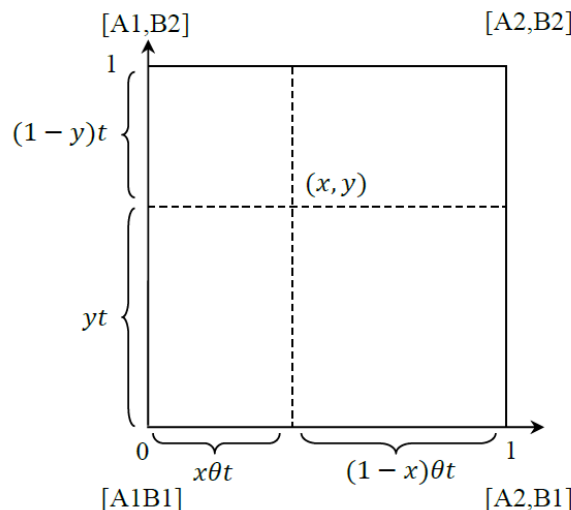
α_k es una constante positiva. Se asume que $\alpha_k > c_k$. Con este supuesto, un nivel positivo de mejora de calidad existe.

Como ya se explicó, los consumidores compran tanto el producto A como el producto B. En el modelo inicial, se asume que consumir una combinación de producto A y del producto B resulta en una utilidad bruta aditiva, $V_A + V_B$. Sin embargo, debido al soporte técnico, diferentes tipos de servicios de telecomunicaciones son parcialmente (de manera imperfecta) sustituibles desde el punto de vista de los consumidores. De esta manera, la utilidad bruta de consumir una combinación de producto puede ser subaditiva (Armstrong, 2011; Venkatesh & Kamakura, 2003). Por ejemplo, aunque los servicios móviles son obviamente distintos de comunicaciones vía internet, la tecnología permite que los usuarios de internet se comuniquen a través de software tal como Skype o chat como WhatsApp. En ese sentido, los servicios móviles y el internet de banda ancha pueden ser parcialmente sustituibles especialmente en un ambiente de convergencia digital. No obstante, por simplicidad, este estudio asume utilidad bruta aditiva de la combinación de los productos.

En este modelo, aunque un consumidor decida comprar ambos productos de la firma 1, no existen economías de alcance en el consumo conjunto de los productos. Por lo tanto, los beneficios en ahorros por pagar una sola factura o realizar compras de “una sola parada” triviales y omitidos por simplicidad.

Un consumidor, que está ubicado en (x, y) en un cuadrado unitario $[0,1]^2$, enfrenta las siguientes cuatro elecciones como se ilustra en la Figura 2.

Figura 2. Consumidores en el modelo de dos mercados con diferenciación de producto horizontal.



Fuente: Elaboración propia.

(I) [A1B1] de firma 1

Su utilidad neta de consumir producto A1 y B1 es

$$V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A1} + \alpha_B \beta_{B1} - x\theta_t - yt - P_{A1B1} \text{ (I)}$$

(II) [A1B2] de firmas separadas

Su utilidad neta de consumir producto A1 y B2 es

$$V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A1} + \alpha_B \beta_{B2} - x\theta_t - (1 - y)t - P_{A1} - P_{B2} \quad (\text{II})$$

(III) [A2B1] de firmas separadas

Su utilidad neta de consumir producto A2 y B1 es

$$V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B1} - (1 - x)\theta_t - yt - P_{A2} - P_{B1} \quad (\text{III})$$

(IV) [A2B2] de firmas separadas

Su utilidad neta de consumir productos A2 y B2 es

$$V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B2} - (1 - x)\theta_t - (1 - y)t - P_{A2} - P_{B2} \quad (\text{IV})$$

Se asume que la utilidad bruta de una combinación de producto es aditiva ($V_A + V_B$). P_{A1B1} es el precio total de la combinación [A1B1]. La firma 1 ofrece P_{A1B1} de acuerdo a su estrategia de empaquetamiento.

- En el caso sin empaquetamiento, $P_{A1B1} = P_{A1} + P_{B1}$
- En el caso de empaquetamiento puro, $P_{A1B1} = \tilde{P}$ (el precio de un paquete puro [A1B1])
- En el caso de empaquetamiento mixto, $P_{A1B1} = P_{A1} + P_{B1} - \delta$, donde δ es el descuento por adquirir el producto empaquetado.

Como puede ser visto en la Figura 2, el consumidor ubicado en (x, y) compara su utilidad neta de las elecciones disponibles de (I)-(IV) y finalmente elige la combinación de producto que resulta en la utilidad neta más alta. En este modelo, la firma multiproducto tiene tres diferentes estrategias de empaquetamiento.

(1) Sin empaquetamiento.

La firma 1 ofrece los productos separadamente a los precios P_{A1} y P_{B1} . Todas las cuatro elecciones (I) – (IV) están disponibles. Así, las participaciones de mercado están determinadas por el consumidor marginal en cada uno de los mercados. \hat{x} y \hat{y} denotan las ubicaciones de los consumidores marginales en los mercados A y B respectivamente. Los consumidores marginales en los mercados A y B resuelven las siguientes condiciones, correspondientemente:

$$V_A + \alpha_A \beta_{A1} - \hat{x}\theta_t - P_{A1} = V_A + \alpha_A \beta_{A2} - (1 - \hat{x})\theta_t - P_{A2}$$

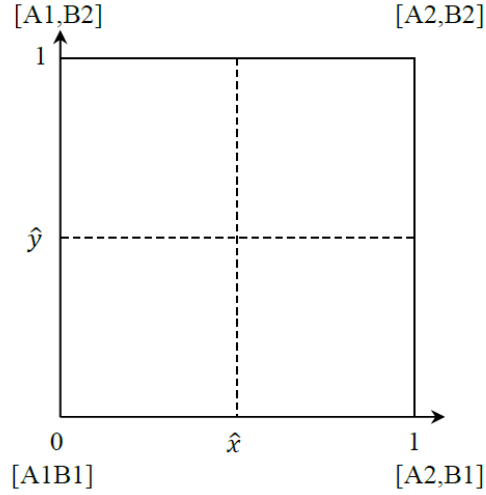
$$\hat{x} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\theta_t} (P_{A2} - P_{A1} + \alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) \quad (1)$$

$$V_B + \alpha_B \beta_{B1} - \hat{y}t - P_{B1} = V_B + \alpha_B \beta_{B2} - (1 - \hat{y})t - P_{B2}$$

$$\hat{y} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2t} (P_{B2} - P_{B1} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \quad (2)$$

Las participaciones de mercado se muestran en la Figura 3.

Figura 3. Participaciones de mercado sin empaquetamiento.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al supuesto de demanda unitaria, la demanda agregada para cada producto se deriva de la participación de mercado.

Funciones de beneficios

Las funciones de beneficios suman el ingreso menos los costos de inversión de las mejoras de calidad.

Firma 1

$$\pi_1(P_{A1}, P_{B1}, \beta_{A1}, \beta_{B1}) = \hat{x}[P_{A1} - c_A\beta_{A1}] + \hat{y}[P_{B1} - c_B\beta_{B1}] - b_A\beta_{A1}^2 - b_B\beta_{B1}^2 \quad (3)$$

Firma 2

$$\pi_{A2}(P_{A2}, \beta_{A2}) = (1 - \hat{x})[P_{A2} - c_A\beta_{A2}] - b_A\beta_{A2}^2 \quad (4)$$

Firma B2

$$\pi_{B2}(P_{B2}, \beta_{B2}) = (1 - \hat{y})[P_{B2} - c_B\beta_{B2}] - b_B\beta_{B2}^2 \quad (5)$$

Excedente del consumidor

Los consumidores evalúan los productos A y B de manera independiente.

$$\begin{aligned} CS = & \int_0^{\hat{x}} [V_A + \alpha_A\beta_{A1} - x\theta t - P_{A1}]dx + \int_{\hat{x}}^1 [V_A + \alpha_A\beta_{A2} - (1-x)\theta t - P_{A2}]dx \\ & + \int_0^{\hat{y}} [V_B + \alpha_B\beta_{B1} - yt - P_{B1}]dy \\ & + \int_{\hat{y}}^1 [V_B + \alpha_B\beta_{B2} - (1-y)t - P_{B2}]dy \end{aligned} \quad (6)$$

donde

\hat{x} es la participación de firma 1 en mercado A.

\hat{y} es la participación de firma 1 en mercado B.

(2) Estrategia de empaquetamiento puro.

La firma 1 vende un producto empaquetado que contiene el producto A y el producto B al precio \tilde{P} . Los consumidores tienen solo dos elecciones, (I) y (IV). Los consumidores que son indiferentes entre [A1B1] y [A2, B2] enfrentan la siguiente condición:

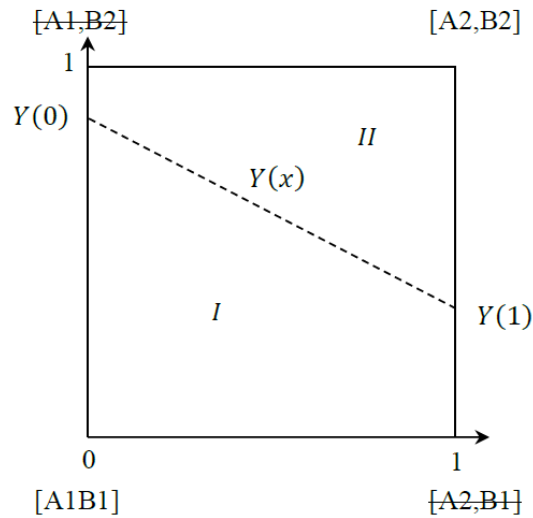
$$\begin{aligned} V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A1} + \alpha_B \beta_{B1} - x\theta t - yt - \tilde{P} \\ = V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B2} - (1-x)\theta t - (1-y)t - P_{A2} - P_{B2} \end{aligned}$$

Reordenando se tiene que:

$$Y(x) = y = \frac{1+\theta}{2} - \theta x + \left(\frac{1}{2t}\right) [P_{A2} + P_{B2} - \tilde{P} + \alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}]$$

Es posible escribir y como una función de x lo que se denota como $Y(x)$ y está representada por la línea punteada en la Figura 4. Los consumidores marginales están ubicados en esta línea. A un x dado, el consumidor marginal que es indiferente entre el producto [A1B1] y [A2, B2] está ubicado en $(x, Y(x))$. Los consumidores en el área I compran el paquete [A1B1]. El resto en área II compran [A2, B2]. Debido al supuesto de demanda unitaria, la demanda por el producto A1 y B1 se deriva del área I y la demanda por el producto A2 y B2 se deriva del área II.

Figura 4. Participaciones de mercado con la estrategia de empaquetamiento puro.



Fuente: Elaboración propia.

Funciones de beneficios

Las funciones de beneficios suman el ingreso menos los costos de inversión en mejoras de calidad. Esta sección enfatiza un rango de θ que hace la estrategia de empaquetamiento puro creíble. En este análisis del caso de empaquetamiento puro, θ no debería ser extremadamente alto para garantizar que los beneficios de interrelacionar los mercados no son triviales.

Firma 1

$$\pi_1(\tilde{P}, \beta_{A1}, \beta_{B1}) = \frac{1}{2} [Y(0) + Y(1)] [\tilde{P} - c_A \beta_{A1} - c_B \beta_{B1}] - b_A \beta_{A1}^2 - b_B \beta_{B1}^2 \quad (7)$$

Firma A2

$$\pi_{A2}(P_{A2}, \beta_{A2}) = \left\{ 1 - \frac{1}{2}[Y(0) + Y(1)] \right\} [P_{A2} - c_A \beta_{A2}] - b_A \beta_{A2}^2 \quad (8)$$

Firma B2

$$\pi_{B2}(P_{B2}, \beta_{B2}) = \left\{ 1 - \frac{1}{2}[Y(0) + Y(1)] \right\} [P_{B2} - c_B \beta_{B2}] - b_{B2} \beta_{B2}^2 \quad (9)$$

Excedente del consumidor

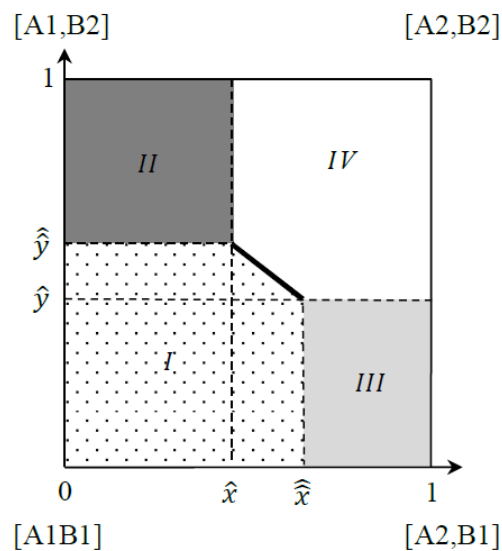
$$CS = \int_0^1 \int_0^{Y(x)} [V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A1} + \alpha_B \beta_{B1} - x\theta t - yt - \tilde{P}] dy dx + \int_0^1 \int_{Y(x)}^1 [V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B2} - (1-x)\theta t - (1-y)t - P_{A2} - P_{B2}] dy dx \quad (10)$$

donde \tilde{P} es el precio del paquete puro [A1B1]; $P_{A1B1} = \tilde{P}$.

(3) Estrategia de empaquetamiento mixto.

La firma 1 ofrece los productos separadamente a los precios P_{A1} y P_{B1} . Adicionalmente, la firma 1 también ofrece un descuento de δ sobre el paquete [A1B1]. Los consumidores siguen teniendo a su disposición las cuatro elecciones, (I)-(IV). En la Figura 5, a un nivel dado de precios individuales y niveles de mejoras de calidad, \hat{x} y \hat{y} son las ubicaciones de los consumidores marginales en mercado A y mercado B respectivamente si el descuento del producto empaquetado es cero. Cuando la firma 1 ofrece el descuento sobre el producto empaquetado, su participación de mercado en ambos mercados aumenta en función de δ . Este modelo está diseñado en un marco de dos mercados, similar a los de Gans y King (2006) y Matutes y Regibeau (1992).

Figura 5. Participaciones de mercado con la estrategia de empaquetamiento mixto.



Fuente: Elaboración propia.

$$\hat{x} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\theta t} (P_{A2} - P_{A1} + \alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) \quad (11)$$

$$\hat{y} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2t} (P_{B2} - P_{B1} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \quad (12)$$

$$\hat{\hat{x}} = \hat{x} + \frac{\delta}{2\theta t} \quad (13)$$

$$\hat{\hat{y}} = \hat{y} + \frac{\delta}{2t} \quad (14)$$

Los consumidores ubicados en el área I compran el paquete [A1B1] a la firma 1 a un precio descontado. Consumidores en las áreas II, III y IV compran los productos [A1, B2], [A2, B1] y [A2, B2] de firmas separadas respectivamente.

Funciones de beneficios

Las funciones de beneficios suman el ingreso menos los costos de inversión de las mejoras de calidad.

Firma 1

$$\pi_1(P_{A1}, P_{B1}, \delta, \beta_{A1}, \beta_{B1}) = D_{A1}[P_{A1} - c_A \beta_{A1}] + D_{B1}[P_{B1} - c_B \beta_{B1}] - D_{A1B1} \delta - b_A \beta_{A1}^2 - b_B \beta_{A2}^2 \quad (15)$$

Firma A2

$$\pi_{A2}(P_{A2}, \beta_{A2}) = D_{A2}[P_{A2} - c_A \beta_{A2}] - b_A \beta_{A2}^2 \quad (16)$$

Firma B2

$$\pi_{B2}(P_{B2}, \beta_{B2}) = D_{B2}[P_{B2} - c_B \beta_{B2}] - b_B \beta_{B2}^2 \quad (17)$$

D_{A1} es la demanda por el producto A1 de los consumidores que comprar el producto empaquetado [A1B1] o la combinación [A1, B2]. Así, D_{A1} es igual al total del área I y área II.

$$D_{A1} = \hat{x} + \frac{\delta}{2\theta t} \hat{y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{2\theta t} \right) \left(\frac{\delta}{2t} \right)$$

D_{B1} es la demanda por el producto B1 de los consumidores que compran el producto empaquetado [A1B1] o la combinación [A2, B1]. Así, D_{B1} es igual al total de las áreas I y III.

$$D_{B1} = \hat{y} + \frac{\delta}{2t} \hat{x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{2\theta t} \right) \left(\frac{\delta}{2t} \right)$$

$$D_{A1B1} = \hat{x} \hat{y} + \hat{x} \left(\frac{\delta}{2t} \right) + \hat{y} \left(\frac{\delta}{2\theta t} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{2\theta t} \right) \left(\frac{\delta}{2t} \right)$$

D_{A2} es la demanda por el producto A2 de los consumidores que comprar la combinación [A2, B1] o [A2, B2]. Así que, D_{A2} es igual a la suma del total de las áreas III y IV.

$$D_{A2} = 1 - \left\{ \hat{x} + \frac{\delta}{2\theta t} \hat{y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{2\theta t} \right) \left(\frac{\delta}{2t} \right) \right\}$$

D_{B2} es la demanda por el producto B2 de los consumidores que compran la combinación [A1, B2] o [A2, B2]. Así que, D_{B2} es igual al total de las áreas II y IV.

$$D_{B2} = 1 - \left\{ \hat{y} + \frac{\delta}{2t} \hat{x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{2\theta t} \right) \left(\frac{\delta}{2t} \right) \right\}$$

Excedente del consumidor

El excedente del consumidor después del empaquetamiento mixto es la suma del excedente del consumidor de las cuatro áreas. $Z(x)$ denota una función de x representada por la línea gruesa en Figura 5, $x \in [\hat{x}, \hat{x}]$, $Z(x) \in [\hat{y}, \hat{y}]$. $Z(x) = \hat{y} + \theta \hat{x} + \frac{\delta}{2t} - \theta x$

$$\begin{aligned} CS = & \int_0^{\hat{x}} \int_0^{\hat{y}} [V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A1} + \alpha_B \beta_{B1} - x\theta t - yt - P_{A1} - P_{B1} - \delta] dy dx + \int_{\hat{x}}^{\hat{x}} \int_0^{Z(x)} [V_A + \\ & V_B + \alpha_A \beta_{A1} + \alpha_B \beta_{B1} - x\theta t - yt - P_{A1} - P_{B1} - \delta] dy dx + \int_0^{\hat{x}} \int_{\hat{y}}^1 [V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A1} + \alpha_B \beta_{B2} - \\ & x\theta t - (1-y)t - P_{A1} - P_{B2}] dy dx + \int_{\hat{x}}^1 \int_0^{\hat{y}} [V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B1} - (1-x)\theta t - yt - P_{A2} - \\ & P_{B1}] dy dx + \int_{\hat{x}}^{\hat{x}} \int_{Z(x)}^1 [V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B2} - (1-x)\theta t - (1-y)t - P_{A2} - P_{B2}] dy dx + \\ & \int_{\hat{x}}^1 \int_{\hat{y}}^1 [V_A + V_B + \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B2} - (1-x)\theta t - (1-y)t - P_{A2} - P_{B2}] dy dx \end{aligned} \quad (18)$$

Tiempo del juego

Este modelo se reduce a un juego de tres etapas que se resuelve con inducción hacia atrás.

Etapa 1. La firma 1 decide si implementa las estrategias de empaquetamiento (empaquetamiento puro y empaquetamiento mixto) en vez de vender los productos A1 y B1 separadamente (sin empaquetamiento). Todas las firmas ya han entrado al mercado y, por lo tanto, el tema de entrada al mercado es omitido.

Etapa 2. Las firmas simultáneamente eligen sus niveles de mejoras de calidad.

Etapa 3. Las firmas fijan de manera simultánea los precios.

4. Análisis.

El resultado de la estrategia sin empaquetamiento se considera como el punto de referencia bajo el que se comparan los resultados de empaquetamiento puro y empaquetamiento mixto.

4.1. Sin empaquetamiento.

En la ausencia de empaquetamiento, la firma 1 compite con la firma A2 y la firma B2 en mercado A y mercado B separadamente. Los resultados de equilibrio se muestran a continuación.

▪ Resultados de equilibrio del mercado

Cuando no se permite que la firma 1 empaquete, los mercados son independientes los unos de los otros. Los consumidores toman sus elecciones en cada mercado de manera independiente.

Etapa 3. La firma soluciona el siguiente problema de maximización de beneficios:

$$\max_{P_{A1}, P_{B1}} \pi_1$$

Diferenciando la función de beneficios (3) con respecto a los precios asociados da como resultado:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial P_{A1}} = \left\{ \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2\theta t} \right) [P_{A2} - P_{A1} + \alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}] \right\} - \frac{1}{2\theta t} (P_{A1} - c_A \beta_{A1}) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial P_{B1}} = \left\{ \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2t} \right) [P_{B2} - P_{B1} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}] \right\} - \frac{1}{2t} (P_{B1} - c_B \beta_{B1}) = 0 \quad (20)$$

Análogamente, los problemas de las firmas monoproducción se muestran a continuación:

$$\max_{P_{k2}} \pi_{k2}$$

$k \in \{A, B\}$. Diferenciando las funciones de beneficios (4) y (5) con respecto a los precios asociados resulta:

$$\frac{\partial \pi_{A2}}{\partial P_{A2}} = \left\{ \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2\theta t} \right) [P_{A2} - P_{A1} + \alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}] \right\} - \frac{1}{2\theta t} (P_{A2} - c_A \beta_{A2}) = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial \pi_{B2}}{\partial P_{B2}} = \left\{ \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2t} \right) [P_{B2} - P_{B1} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}] \right\} - \frac{1}{2t} (P_{B2} - c_B \beta_{B2}) = 0 \quad (22)$$

Resolviendo (19) – (22) resultan las funciones de precios en la etapa 3 a un nivel dado de mejoras de calidad.

$$P_{A1}^*(\beta_{A1}, \beta_{A2}) = \theta t + \frac{2}{3} c_A \beta_{A1} + \frac{1}{3} c_A \beta_{A2} + \frac{1}{3} (\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) \quad (23)$$

$$P_{A2}^*(\beta_{A1}, \beta_{A2}) = \theta t + \frac{1}{3} c_A \beta_{A1} + \frac{2}{3} c_A \beta_{A2} - \frac{1}{3} (\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) \quad (24)$$

$$P_{B1}^*(\beta_{B1}, \beta_{B2}) = t + \frac{2}{3} c_B \beta_{B1} + \frac{1}{3} c_B \beta_{B2} + \frac{1}{3} (\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \quad (25)$$

$$P_{B2}^*(\beta_{B1}, \beta_{B2}) = t + \frac{1}{3} c_B \beta_{B1} + \frac{2}{3} c_B \beta_{B2} - \frac{1}{3} (\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \quad (26)$$

Después de sustituir (23) – (26) en (3) – (5), las funciones de beneficios de las firmas en forma reducida se muestran a continuación.

$$\begin{aligned} \pi_1(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = & \left[\frac{1}{2} - \frac{c_A \beta_{A1}}{6\theta t} + \frac{c_A \beta_{A2}}{6\theta t} + \frac{\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}}{6\theta t} \right] \left[\theta t - \frac{1}{3} c_A \beta_{A1} + \frac{1}{3} c_A \beta_{A2} + \right. \\ & \left. \frac{1}{3} (\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) \right] + \left[\frac{1}{2} - \frac{c_B \beta_{B1}}{6t} + \frac{c_B \beta_{B2}}{6t} + \frac{\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}}{6t} \right] \left[t - \frac{1}{3} c_B \beta_{B1} + \frac{1}{3} c_B \beta_{B2} + \right. \\ & \left. \frac{1}{3} (\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \right] - b_A \beta_{A1}^2 - b_B \beta_{B1}^2 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \pi_{A2}(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = & \left[\frac{1}{2} + \frac{c_A \beta_{A1}}{6\theta t} + \frac{c_A \beta_{A2}}{6\theta t} + \frac{\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}}{6\theta t} \right] \left[\theta t + \frac{1}{3} c_A \beta_{A1} - \frac{1}{3} c_A \beta_{A2} - \right. \\ & \left. \frac{1}{3} (\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) \right] - b_A \beta_{A2}^2 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \pi_{B2}(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = & \left[\frac{1}{2} + \frac{c_B \beta_{B1}}{6t} + \frac{c_B \beta_{B2}}{6t} - \frac{\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}}{6t} \right] \left[t + \frac{1}{3} c_B \beta_{B1} - \frac{1}{3} c_B \beta_{B2} - \right. \\ & \left. \frac{1}{3} (\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \right] - b_B \beta_{B2}^2 \end{aligned} \quad (29)$$

Etapa 2. La firma multiproducción y las firmas monoproducción maximizan sus propios beneficios como se muestra a continuación.

$$\max_{\beta_{A1}, \beta_{B1}} \pi_1$$

$$\max_{\beta_{k2}} \pi_{k2}$$

Es posible diferenciar (27) – (29) con respecto a los niveles de mejora de calidad (β_{ki}); $k \in \{A, B\}, i \in \{1, 2\}$. Después de solucionar las derivadas, los niveles de equilibrio de las mejoras de calidad se muestran a continuación.

$$\beta_{A1}^* = \beta_{A2}^* = \frac{\alpha_A - c_A}{6b_A} \quad (30)$$

$$\beta_{B1}^* = \beta_{B2}^* = \frac{\alpha_B - c_B}{6b_B} \quad (31)$$

Sustituyendo (30) y (31) en las funciones de precios (23) – (26) da como resultado los precios de equilibrio que se muestran a continuación.

$$P_{A1}^* = P_{A2}^* = \theta t + \frac{c_A(\alpha_A - c_A)}{6b_A} \quad (32)$$

$$P_{B1}^* = P_{B2}^* = t + \frac{c_B(\alpha_B - c_B)}{6b_B} \quad (33)$$

Proposición 1

Cuando no se permite el empaquetamiento, las firmas eligen precios y niveles de mejoras de calidad simétricos. Por lo tanto, las firmas tienen participaciones de mercado y beneficios iguales en cada mercado.

El resultado es consistente con el modelo estándar de Hotelling; las firmas eligen precios y niveles de mejoras de calidad simétricos en cada mercado porque la firma 1 compite con sus rivales en cada mercado separadamente. Los precios de equilibrio son determinados por los costos de degustación, los costos de mejora de calidad y la utilidad adicional de la mejora de calidad dentro del mismo mercado. Como una consecuencia del resultado simétrico en cada mercado separado, la firma multiproducto y los rivales monoproducción tienen participaciones de mercado y beneficios iguales en cada mercado.

Observación 1

Los costos de degustación tienen efectos positivos sobre los precios de equilibrio, pero no tienen efecto sobre los niveles de equilibrio de las mejoras de calidad.

Prueba

De (30)-(33):

$$\frac{\partial P_{A1}^*}{\partial t} = \frac{\partial P_{A2}^*}{\partial t} = \theta > 0; \quad \frac{\partial P_{B1}^*}{\partial t} = \frac{\partial P_{B2}^*}{\partial t} = 1 > 0;$$

$$\frac{\partial \beta_{A1}^*}{\partial t} = \frac{\partial \beta_{A2}^*}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial \beta_{B1}^*}{\partial t} = \frac{\partial \beta_{B2}^*}{\partial t} = 0.$$

En cada mercado, las firmas eligen sus niveles de mejoras de calidad dependiendo únicamente de los costos relevantes y la utilidad adicional de las mejoras de calidad, pero independiente de los costos de degustación. En general, las firmas fijan precios para cubrir los costos marginales adicionales de las mejoras de calidad. En adición, ellas pueden aumentar los precios de acuerdo a los aumentos en los costos de degustación porque la sustituibilidad entre productos rivales decrece. Si la estructura de costos y utilidad adicional de las mejoras en calidad en los dos mercados son idénticas, el precio en el mercado menos competitivo es de hecho más alto.

Excedente del consumidor sin empaquetamiento

Después de sustituir los resultados de equilibrio (30) – (33) en (6), el excedente del consumidor en el caso sin empaquetamiento es:

$$CS = V_A + V_B + \frac{(\alpha_A - c_A)^2}{6b_A} + \frac{(\alpha_B - c_B)^2}{6b_B} - \frac{5\theta t}{4} - \frac{5}{4}t \quad (34)$$

▪ Análisis de estática comparativa

En el caso sin empaquetamiento, el equilibrio de los niveles de mejora en calidad (β_{ki}) y precios (P_{ki}) están determinados por los costos asociados y utilidad adicional en el mercado k .

Mejoras en calidad

De acuerdo a (30) – (31), el equilibrio de las mejoras de calidad es afectado por los costos y la adición de utilidad en la siguiente manera:

$$1) \quad \frac{\partial \beta_{ki}^*}{\partial b_k} = -\frac{(\alpha_k - c_k)}{6b_k^2} < 0$$

Cuando los costos de inversión aumentan, es menos rentable para las firmas competir agresivamente en realizar mejoras de calidad. Por lo tanto, los niveles de equilibrio de las mejoras de calidad se reducen.

$$2) \quad \frac{\partial \beta_{ki}^*}{\partial c_k} = -\frac{1}{6b_k} < 0$$

De igual modo, si los costos marginales adicionales se incrementan, las firmas tienen menos incentivos para invertir en mejoras en calidad.

$$3) \quad \frac{\partial \beta_{ki}^*}{\partial a_k} = \frac{1}{6b_k} > 0$$

Precio

Considerando (32) – (33), los precios de equilibrio son claramente afectados por los costos y la utilidad adicional como se muestra a continuación.

$$1) \quad \frac{\partial \beta_{ki}^*}{\partial b_k} = -\frac{c_k(\alpha_k - c_k)}{6b_k^2} < 0$$

Los precios se reducen con los costos de inversión. Cuando los costos de inversión se reducen, las firmas compiten aumentando los niveles de equilibrio de las mejoras de calidad para después aumentar los precios y poder así cubrir los costos incurridos por mejorar la calidad.

$$2) \quad \frac{\partial P_{ki}^*}{\partial c_k} = \frac{(\alpha_k - 2c_k)}{6b_k}$$

El efecto del costo marginal adicional sobre los precios es ambiguo. Los precios pueden caer con el costo marginal adicional si este costo es comparativamente alto ($c_k > \frac{\alpha_k}{2}$). Bajo este supuesto, cuando los costos se incrementan, los niveles de mejoras en calidad se reducen y los costos marginales caen notablemente y, como consecuencia, también lo hacen los precios. De otro lado, cuando el costo es relativamente bajo ($c_k < \frac{\alpha_k}{2}$), los precios pueden aumentar en función de los costos. Por ejemplo, cuando el costo por unidad de calidad se reduce, las firmas deciden aumentar sus niveles de mejoras en

calidad. Sin embargo, el costo por unidad de calidad es tan bajo que los costos marginales adicionales se reducen. En conjunto, los precios caen.

$$3) \frac{\partial P_{ki}^*}{\partial \alpha_k} = \frac{c_k}{6b_k} > 0$$

Los precios aumentan con la utilidad adicional de las mejoras en calidad. Esto es porque este factor precisamente determina los niveles de equilibrio de las mejoras en calidad que las firmas tienen en cuenta en su decisión de precios.

4.2. La estrategia de empaquetamiento puro.

Cuando se permite el empaquetamiento puro, la firma 1 implementa esta estrategia que impacta los resultados del mercado como se presenta a continuación.

- **Resultados de equilibrio del mercado**

Etapa 3. La firma 1 solo vende su producto como un producto empaquetado, por lo tanto, los consumidores tienen solo dos elecciones, paquete [A1B1] y la combinación [A2, B2]. En esta etapa, la firma 1 soluciona el siguiente problema.

$$\max_{\tilde{p}} \pi_1$$

De (7), la condición de primer orden es:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial \tilde{p}} = -\frac{1}{2t}(\tilde{p} - c_A\beta_{A1} - c_B\beta_{B1}) + \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2t}\right)[P_{A2} + P_{B2} - \tilde{p} + \alpha_A\beta_{A1} - \alpha_A\beta_{A2} + \alpha_B\beta_{B1} - \alpha_B\beta_{B2}] = 0 \quad (35)$$

Análogamente, los problemas de las firmas monoproducto son:

$$\max_{p_{k2}} \pi_{k2}$$

donde $k \in \{A, B\}$. De (8) y (9), las condiciones de primer orden son como se presentan a continuación:

$$\frac{\partial \pi_{A2}}{\partial P_{A2}} = -\frac{1}{2t}(P_{A2} - c_A\beta_{A2}) + \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2t}\right)[P_{A2} + P_{B2} - \tilde{p} + \alpha_A\beta_{A1} - \alpha_A\beta_{A2} + \alpha_B\beta_{B1} - \alpha_B\beta_{B2}] = 0 \quad (36)$$

$$\frac{\partial \pi_{B2}}{\partial P_{B2}} = -\frac{1}{2t}(P_{B2} - c_B\beta_{B2}) + \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{2t}\right)[P_{A2} + P_{B2} - \tilde{p} + \alpha_A\beta_{A1} - \alpha_A\beta_{A2} + \alpha_B\beta_{B1} - \alpha_B\beta_{B2}] = 0 \quad (37)$$

A cualquier combinación de mejoras en los niveles de calidad, los precios de equilibrio son:

$$\tilde{p}^*(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \frac{5}{4}t + \frac{3}{4}c_A\beta_{A1} + \frac{1}{4}c_A\beta_{A2} + \frac{3}{4}c_B\beta_{B1} + \frac{1}{4}c_B\beta_{B2} + \frac{1}{4}[\alpha_A\beta_{A1} - \alpha_A\beta_{A2} + \alpha_B\beta_{B1} - \alpha_B\beta_{B2}] \quad (38)$$

$$P_{A2}^*(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \frac{3}{4}t + \frac{1}{4}c_A\beta_{A1} + \frac{3}{4}c_A\beta_{A2} + \frac{1}{4}c_B\beta_{B1} - \frac{1}{4}c_B\beta_{B2} - \frac{1}{4}[\alpha_A\beta_{A1} - \alpha_A\beta_{A2} + \alpha_B\beta_{B1} - \alpha_B\beta_{B2}] \quad (39)$$

$$P_{B2}^*(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \frac{3}{4}t + \frac{1}{4}c_A\beta_{A1} - \frac{1}{4}c_A\beta_{A2} + \frac{1}{4}c_B\beta_{B1} + \frac{3}{4}c_B\beta_{B2} - \frac{1}{4}[\alpha_A\beta_{A1} - \alpha_A\beta_{A2} + \alpha_B\beta_{B1} - \alpha_B\beta_{B2}] \quad (40)$$

Sustituyendo (38) – (40) en (7) – (9), se obtiene lo siguiente:

$$\pi_1(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \left\{ \left[\frac{5}{8} + \frac{1}{2t} \left(\frac{1}{4} c_A \beta_{A2} + \frac{1}{4} c_B \beta_{B2} - \frac{1}{4} c_A \beta_{A1} - \frac{1}{4} c_B \beta_{B1} + \frac{1}{4} [\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B2}] \right) \right] * \left[\frac{5}{4} t - \frac{1}{4} c_A \beta_{A1} + \frac{1}{4} c_A \beta_{A2} - \frac{1}{4} c_B \beta_{B1} + \frac{1}{4} c_B \beta_{B2} + \frac{1}{4} [\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}] \right] \right\} - b_A \beta_{A1}^2 - b_B \beta_{B1}^2 \quad (41)$$

$$\pi_{A2}(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \left\{ \left[\frac{3}{8} - \frac{1}{2t} \left(\frac{1}{4} c_A \beta_{A2} + \frac{1}{4} c_B \beta_{B2} - \frac{1}{4} c_A \beta_{A1} - \frac{1}{4} c_B \beta_{B1} + \frac{1}{4} [\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}] \right) \right] * \left[\frac{3}{4} t + \frac{1}{4} c_A \beta_{A1} - \frac{1}{4} c_A \beta_{A2} + \frac{1}{4} c_B \beta_{B1} - \frac{1}{4} c_B \beta_{B2} - \frac{1}{4} [\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}] \right] \right\} - b_A \beta_{A2}^2 \quad (42)$$

$$\pi_{B2}(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \left\{ \left[\frac{3}{8} - \frac{1}{2t} \left(\frac{1}{4} c_A \beta_{A2} + \frac{1}{4} c_B \beta_{B2} - \frac{1}{4} c_A \beta_{A1} - \frac{1}{4} c_B \beta_{B1} + \frac{1}{4} [\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}] \right) \right] * \left[\frac{3}{4} t + \frac{1}{4} c_A \beta_{A1} - \frac{1}{4} c_A \beta_{A2} + \frac{1}{4} c_B \beta_{B1} - \frac{1}{4} c_B \beta_{B2} - \frac{1}{4} [\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}] \right] \right\} - b_B \beta_{B2}^2 \quad (43)$$

Es posible diferenciar (41) – (43) con respecto a los niveles asociados de las mejoras en calidad (β_{ki}); $k \in \{A, B\}$, $i \in \{1, 2\}$. Los resultados que se presentan a continuación satisfacen las condiciones de primer orden.

$$\beta_{A1}^* = \frac{(\alpha_A - c_A)[20tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2]}{8b_A[16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2]} \quad (44)$$

$$\beta_{A2}^* = \frac{(\alpha_A - c_A)[12tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2]}{8b_A[16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2]} \quad (45)$$

$$\beta_{B1}^* = \frac{(\alpha_B - c_B)[20tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2]}{8b_B[16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2]} \quad (46)$$

$$\beta_{B2}^* = \frac{(\alpha_B - c_B)[12tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2]}{8b_B[16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2]} \quad (47)$$

Sustituyendo (44) – (47) en (38) – (40) se obtienen los precios de equilibrio del juego como se presenta a continuación:

$$\tilde{P}^* = \frac{5}{4} t + \left(\frac{1}{16} \right) \left[- \left(\frac{(\alpha_A - c_A)^2}{b_A} + \frac{(\alpha_B - c_B)^2}{b_B} \right) + \left(\frac{20tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2}{16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2} \right) \left(\frac{\alpha_A^2 - c_A^2}{b_A} + \frac{\alpha_B^2 - c_B^2}{b_B} \right) \right] \quad (48)$$

$$P_{A2}^* = \frac{3}{4} t + \left(\frac{1}{16} \right) \left[\frac{3c_A(\alpha_A - c_A)}{b_A} - \frac{c_A(\alpha_A - c_A)}{b_A} \left(\frac{20tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2}{16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2} \right) - \frac{4\alpha_A(\alpha_A - c_A)tb_B + 4(\alpha_B - c_B)^2tb_A}{16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2} \right] \quad (49)$$

$$P_{B2}^* = \frac{3}{4} t + \left(\frac{1}{16} \right) \left[\frac{3c_B(\alpha_B - c_B)}{b_B} - \frac{c_B(\alpha_B - c_B)}{b_B} \left(\frac{20tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2}{16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2} \right) - \frac{4\alpha_B(\alpha_B - c_B)tb_A + 4(\alpha_A - c_A)^2tb_B}{16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2} \right] \quad (50)$$

Proposición 2

- (i) Cuando la firma multiproducto emplea la estrategia de empaquetamiento puro, ésta elige un nivel más alto de mejoras en calidad que las firmas monoproducción, i.e. $\beta_{A1}^* > \beta_{A2}^*$ y $\beta_{B1}^* > \beta_{B2}^*$.
- (ii) La firma multiproducto fija el precio del paquete por debajo del precio total de la combinación de producto de las firmas monoproducción cuando las mejoras en calidad involucran costos relativamente altos, pero resulta en menor utilidad adicional.

$$\tilde{P}^* < (\geq) P_{A2}^* + P_{B2}^* \quad \text{iff} \quad b_B(\alpha_A - c_A)^2 + b_A(\alpha_B - c_B)^2 + b_B c_A(\alpha_A - c_A) + b_A c_B(\alpha_B - c_B) < (\geq) 4t b_A b_B$$

Una vez escogido el empaquetamiento puro, los consumidores tienen solo dos elecciones de productos, el paquete [A1B1] y la combinación [A2, B2]. La diferenciación entre estas dos elecciones está basada en el costo de degustación de los mercados menos competitivos. Los costos y la utilidad adicional de las mejoras en calidad en un mercado tienen algún tipo de efecto sobre los precios de equilibrio y los niveles de mejoras en calidad en el otro mercado. La firma multiproducto ciertamente elige niveles más altos de mejoras en calidad que sus rivales monoproducción. Esto es por incorporar la externalidad entre los dos mercados dentro de su problema de maximización de beneficios, pero las firmas monoproducción todavía maximizan sus propios beneficios de manera separada (sin cooperación). Choi (2004) y Krämer (2009) también reportaron resultados similares en su marco de empaquetamiento puro donde la firma multiproducto ata su producto de monopolio con su producto competitivo. Aunque en el presente estudio la firma multiproducto enfrenta competencia duopolista en ambos mercados, todavía emplea empaquetamiento puro para conseguir dominancia a través de su calidad superior.

La comparación de precios es ambigua. El precio del producto empaquetado de la firma multiproducto es más bajo que el precio de la combinación de producto de la firma monoproducción cuando los costos de mejoras en calidad, comparado con la utilidad adicional, son extremadamente altos. En este caso, los procesos de mejoras de calidad involucran costos altos de inversión y/o resultan en aumentos sustanciales de los costos marginales de producción, así que la firma multiproducto le da mayor énfasis al precio en comparación con la calidad debido a la ineficiencia en los costos de mejoras en calidad. Ésta ofrece niveles de mejoras en calidad más altos, y agresivamente fija precios más bajos que sus rivales para poder expandir su base de consumidores. En este modelo, los consumidores evalúan la elección de dos productos con respecto a la información perfecta sobre calidad y precio. Los consumidores pueden percibir el menor precio del paquete como un descuento indirecto. Esto es similar al resultado de Nalebuff (2004), donde no se les permite a las firmas modificar la calidad del producto en un contexto de empaquetamiento puro. Sin embargo, cuando los costos de mejora en calidad, comparados con los de la utilidad adicional, no son tan altos, la firma multiproducto se concentra en su inversión en mejoras de calidad y respectivamente fija el precio del paquete a un valor más alto que las firmas multiproducto.

Observación 2

Después del empaquetamiento puro, la competencia más intensa que se da en el mercado más competitivo (θ) ya no afecta los niveles de equilibrio de las mejoras en calidad y los precios.

Prueba

De acuerdo a (44) – (50):

$$\frac{\partial \beta_{ki}^*}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial \tilde{P}^*}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial P_{A2}^*}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial P_{B2}^*}{\partial \theta} = 0; k \in \{A, B\}, i \in \{1, 2\}$$

Después de empaquetamiento puro, solo [A1B1] y [A2, B2] quedan disponibles para el consumo. Desde el punto de vista de los consumidores, ellos pueden elegir entre [A1B1] o [A2, B2], y los

productos en el mercado más competitivo se vuelven más diferenciados después de ser empaquetados con aquellos del mercado menos competitivo. Por lo tanto, los consumidores evalúan los dos productos disponibles principalmente basados en los costos de degustación del mercado menos competitivo (t).

Proposición 3

Después del empaquetamiento, la firma multiproducto tiene mayores beneficios con una participación del mercado más alta que la firma monoproducción, i.e. $\pi_1^ > \pi_{A2}^* + \pi_{B2}^*$ y $MS_1 > \frac{1}{2} > MS_2$.*

Después de internalizar la externalidad entre los dos mercados interrelacionados, la firma multiproducto encuentra rentable ofrecer niveles de mejoras de calidad más altos para atraer un mayor número de consumidores y dominar el mercado a través de una participación de mercado más alta, lo que le genera mayores beneficios en comparación a los de sus rivales monoproducción.

Excedente del consumidor con empaquetamiento puro

El excedente del consumidor después del empaquetamiento puro es:

$$CS = V_A + V_B - \frac{\theta^2}{6} - \frac{t}{2} + tY^0(1 - Y^0) - \theta t(1 - Y^0) + \alpha_A \beta_{A2}^* + \alpha_B \beta_{B2}^* - (P_{A2}^* + P_{B2}^*) + \left(\frac{\theta}{2} - Y^0 \right) [\tilde{P}^* - (P_{A2}^* + P_{B2}^*) - \alpha_A \beta_{A1}^* + \alpha_A \beta_{A2}^* - \alpha_B \beta_{B1}^* + \alpha_B \beta_{B2}^*] \quad (51)$$

$$\text{donde } Y^0 = Y(0) = \left(\frac{1+\theta}{2} \right) + \frac{2tb_A b_B}{16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2}$$

▪ La estrategia de empaquetamiento puro vs. la estrategia sin empaquetamiento

En la etapa 1, para enfatizar el efecto del empaquetamiento puro, los resultados de mercado de empaquetamiento puro son comparados con la situación de referencia, es decir, la situación sin empaquetamiento.

$$\text{Denotando } \Omega = \frac{20tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2}{16tb_A b_B - b_B(\alpha_A - c_A)^2 - b_A(\alpha_B - c_B)^2}, \mathbb{A} = \alpha_A - c_A > 0, \mathbb{B} = \alpha_B - c_B > 0$$

Proposición 4a

Cuando la estrategia de empaquetamiento puro es implementada en vez de la estrategia sin empaquetamiento, los resultados de la firma multiproducto cambian como se presentan a continuación.

- (i) *En ambos mercados, la firma multiproducto reduce sus niveles de mejoras de calidad cuando las mejoras en calidad involucran costos relativamente altos, pero resulta en utilidad adicional comparativamente baja:*

$$\beta_{A1}^* \text{ Puro} < \beta_{A1}^* \text{ No}, \quad \beta_{B1}^* \text{ Puro} < \beta_{B1}^* \text{ No} \text{ iff } b_B \mathbb{A}^2 + b_A \mathbb{B}^2 < 4tb_A b_B$$

De manera opuesta, la firma multiproducto aumenta los niveles cuando el proceso de mejora en calidad es lo suficientemente eficiente en términos de costo y utilidad adicional:

$$\beta_{A1}^* \text{ Puro} > \beta_{A1}^* \text{ No}, \quad \beta_{B1}^* \text{ Puro} > \beta_{B1}^* \text{ No} \text{ iff } 4tb_A b_B < b_B \mathbb{A}^2 + b_A \mathbb{B}^2 < 12tb_A b_B$$

- (ii) *La firma multiproducto aumenta el precio del paquete cuando los dos mercados interrelacionados son significativamente diferentes en términos de intensidad competitiva:*

$$\begin{aligned} \bar{P}_{Puro}^* &> (\leq) P_{A1No}^* + P_{B1No}^* \text{ iff } \theta \\ &< (\geq) \frac{1}{4} + \frac{1}{48tb_Ab_B} \{(3\Omega - 3)[b_B\alpha_A\mathbb{A} + b_A\alpha_B\mathbb{B}] + (3\Omega - 5)[b_Bc_A\mathbb{A} + b_Ac_B\mathbb{B}]\} \end{aligned}$$

(iii) La participación de mercado de la firma multiproducto aumenta en ambos mercados, i.e. $MS_{1Puro} > MS_{A1No} = MS_{B1No}$.

(iv) Los beneficios de la firma multiproducto aumentan, i.e. $\pi_{1Puro}^* > \pi_{1No}^*$. La estrategia de empaquetamiento puro domina la estrategia sin empaquetamiento para la firma multiproducto en muchas situaciones.

En esta sección se asume que θ no es extremadamente alta para lograr que la estrategia sea todavía creíble en el análisis de empaquetamiento puro.

Haciendo referencia a la estrategia sin empaquetamiento, la estrategia de empaquetamiento puro puede aumentar los beneficios de la firma multiproducto de diferentes formas. Consecuentemente, en la etapa 1 del juego, la firma 1 preferirá la estrategia de empaquetamiento puro a la estrategia sin empaquetamiento. Cuando los dos mercados están interrelacionados, las elecciones de producto son limitadas. La firma 1 toma esta oportunidad para reconsiderar sobre las mejoras en calidad y la fijación de precios teniendo en cuenta la externalidad dentro de su problema de maximización de beneficios. La firma 1 gastará menos en mejoras de calidad para ahorrar costos si el costo de inversión y el costo marginal adicional de las mejoras en calidad son muy altos en relación a una utilidad adicional significativamente baja. Puede que no sea rentable atraer consumidores mediante altas inversiones en mejoras en calidad con una tecnología ineficiente. Esto es porque los mercados parecen menos competitivos cuando solo dos opciones de las combinaciones de producto permanecen disponibles después del empaquetamiento puro. De otro modo, debido al efecto significativo de la externalidad, la estrategia de empaquetamiento puro puede estimular la inversión de la firma multiproducto si las mejoras de calidad no involucran altos costos de inversión y costos marginales adicionales pero la utilidad adicional es relativamente sustancial. Este estudio señala que los incentivos de la firma multiproducto para invertir en calidad dependen de la eficiencia de la aproximación de mejoras en calidad en términos de costos y utilidad adicional. Esto contrasta con el artículo de Choi (2004) que argumenta que la firma multiproducto ciertamente aumenta su inversión en reducción de costos después del empaquetamiento puro.

Los efectos del empaquetamiento puro sobre los precios son ambiguos. Dos efectos de empaquetamiento puro ocurren. Primero, el empaquetamiento puro reduce el número de elecciones de producto y reduce la fuerte competencia en el mercado A, así las firmas pueden cobrar precios más altos. Segundo, en respuesta al empaquetamiento puro, las firmas pueden cambiar sus niveles de mejoras en calidad, lo que directamente afecta los costos marginales y finalmente sus precios. Cuando los costos de degustación de los dos mercados son significativamente diferentes (θ es lo suficientemente bajo), el precio del paquete [A1B1] es más alto cuando se compara con la situación sin empaquetamiento. Cuando el mercado más competitivo está interrelacionado con el mercado menos competitivo, la reducción en la intensidad competitiva después del empaquetamiento puro beneficia a la firma multiproducto de manera tan significativa que ésta puede aumentar el precio de su producto empaquetado. De otro modo, esta disminuirá su precio del paquete en el proceso de maximización de beneficios, lo cual internaliza la externalidad después del empaquetamiento puro. Con calidad más atractiva y precios razonables, la firma multiproducto puede aumentar su participación de mercado.

Proposición 4b

Cuando la firma multiproducto implementa la estrategia de empaquetamiento puro en vez de la estrategia sin empaquetamiento, las firmas monoproducción son afectadas como se muestra a continuación.

- (i) Las firmas monoproducción reducen sus niveles de mejoras en calidad en ambos mercados, i.e. $\beta_{A2Puro}^* < \beta_{A2No}^*$ y $\beta_{B2Puro}^* < \beta_{B2No}^*$
- (ii) La firma monoproducción en el mercado menos competitivo reduce su precio, i.e. $P_{B2Puro}^* < P_{B2No}^*$. Ambiguamente, la firma monoproducción en el mercado más competitivo aumenta su precio cuando los dos mercados interrelacionados son significativamente diferentes en intensidad competitiva:

$$P_{A2Puro}^* > (\leq) P_{A2No}^* \text{ iff}$$

$$\theta < (\geq) \frac{3}{4} - \frac{(3\Omega - 1)c_A \mathbb{A}(16tb_A b_B - b_B \mathbb{A}^2 - b_A \mathbb{B}^2) + 12\alpha_A \mathbb{A} t b_A b_B + 12\mathbb{B}^2 t b_A^2}{48tb_A(16tb_A b_B - b_B \mathbb{A}^2 - b_A \mathbb{B}^2)}$$

- (iii) Las participaciones de mercado de las firmas monoproducción caen en ambos mercados, i.e. $MS_{A2Puro} < MS_{A2No}$ y $MS_{B2Puro} < MS_{B2No}$.
- (iv) En el mercado más competitivo, los beneficios de la firma monoproducción aumentan cuando los dos mercados interrelacionados son significativamente diferentes en intensidad competitiva:

$$\pi_{A2Puro}^* > (\leq) \pi_{A2No}^* \text{ iff}$$

$$\theta < (\geq) \left\{ \frac{9}{16} + \frac{\mathbb{A}^2}{18tb_A} \left[1 - \frac{1}{2} \left[\frac{(12tb_A b_B - b_B \mathbb{A}^2 - b_A \mathbb{B}^2)}{(16tb_A b_B - b_B \mathbb{A}^2 - b_A \mathbb{B}^2)} \right]^2 \right] - \frac{6}{16} \left[\frac{b_B \mathbb{A}^2 + b_A \mathbb{B}^2}{(16tb_A b_B - b_B \mathbb{A}^2 - b_A \mathbb{B}^2)} \right] + \frac{1}{16} \left[\frac{b_B \mathbb{A}^2 + b_A \mathbb{B}^2}{(16tb_A b_B - b_B \mathbb{A}^2 - b_A \mathbb{B}^2)} \right]^2 \right\}$$

En el mercado menos competitivo, los beneficios de la firma monoproducción se reducen, i.e. $\pi_{B2Puro}^* < \pi_{B2No}^*$

Cuando la firma multiproducción implementa el empaquetamiento puro, las firmas monoproducción deciden ahorrar en costos y reaccionan reduciendo sus niveles de mejoras de calidad, que terminan siendo más bajos que los de la firma 1. Esto es porque estas firmas de manera independiente consideran sus propios problemas de maximización de beneficios sin preocuparse por la externalidad. Este hallazgo confirma el resultado de Choi (2004) y Krämer (2009) que el empaquetamiento puro reduce el incentivo de los rivales de las firmas monoproducción para invertir, incluso en el entorno duopolístico con mayor intensidad competitiva.

De acuerdo a la proposición 2 y proposición 4a (i), con empaquetamiento puro, la firma 1 fortalece su posición en el mercado y lo demuestra invirtiendo más agresivamente en mejoras en calidad. La firma monoproducción en el mercado menos competitivo se ve adversamente afectada por la estrategia agresiva de empaquetamiento. Como un resultado, la firma B2 responde reduciendo el precio para maximizar sus beneficios en esta situación difícil. Finalmente, esta firma pierde su participación de mercado y beneficios. Sin embargo, los resultados de la firma monoproducción en el mercado más competitivo cambian de manera ambigua. Cuando los costos de degustación de los dos mercados son muy diferentes (θ es muy bajo), la firma A2 se beneficia indirectamente del empaquetamiento puro de la firma 1. Cuando el mercado más competitivo está interrelacionado al mercado menos competitivo, la sustituibilidad entre elecciones de producto se reduce significativamente debido a las elecciones limitadas de producto que ahora enfrentan los consumidores. Por esta razón, la firma A2 puede aumentar su precio y sus beneficios crecen a pesar de que la participación de mercado se reduce. Por otro lado, interrelacionar los mercados lleva solo a una caída pequeña en el grado de competencia del mercado A, y consecuentemente la firma A2 tiene que reducir el precio debido a una reducción en su nivel de

mejoras en calidad. En este caso, la firma A2, similar a la firma B2, gana una participación pequeña de mercado y disminuye sus beneficios comparado con la situación sin empaquetamiento.

Proposición 4c

Comparado al caso sin empaquetamiento, el efecto de la estrategia de empaquetamiento puro sobre el excedente del consumidor es ambiguo. El excedente del consumidor se reduce cuando los dos mercados interrelacionados son significativamente diferentes en intensidad competitiva:

$$CS_{Puro} < (\geq) CS_{No} \text{ if}$$

$$\theta(\theta + 9) < (\geq) 9 - 9\Omega + 3\Omega^2 - \frac{1}{t} \left[\frac{A^2}{b_A} + \frac{B^2}{b_B} \right] \left[-2 + \frac{15}{8}\Omega - \frac{3}{8}\Omega^2 + \frac{(3\Omega - 6)tb_A b_B}{16tb_A b_B - b_B A^2 - b_A B^2} \right]$$

Un cambio en el excedente del consumidor es ambiguo. El empaquetamiento puro reduce el excedente del consumidor cuando los costos de degustación de los dos mercados son significativamente diferentes (θ es bajo). Las elecciones limitadas de producto generan distorsiones en las asignaciones de consumidores, lo que produce una desutilidad para el consumidor debido a la indisponibilidad de combinaciones de producto ideales para el consumidor. En adición, debido a una reducción en la intensidad competitiva producto del empaquetamiento puro, se genera una distorsión en precios, especialmente en el mercado más competitivo. Las distorsiones de precio y la asignación de consumidores afectan de manera adversa el bienestar del consumidor. Esto domina los beneficios de la decisión de la firma 1 sobre niveles de mejoras en calidad y el precio del producto empaquetado debido a la externalidad de la firma 1. De otro lado, el excedente del consumidor puede aumentar cuando los costos de degustación de los dos mercados no son significativamente diferentes (θ es lo suficientemente alto). Interrelacionar los dos mercados no lleva a distorsiones severas. Por lo tanto, el beneficio de la externalidad compensa la desutilidad y el efecto negativo de la distorsión en precios.

4.3. La estrategia de empaquetamiento mixto.

En adición al producto empaquetado, la firma 1 también ofrece sus productos separadamente de acuerdo con la estrategia de empaquetamiento mixto, que tiene efectos sobre los resultados del mercado tal y como se presenta a continuación.

- **Resultados del equilibrio de mercado**

Etapa 3. La firma multiproducto soluciona el siguiente problema.

$$\max_{P_{A1}, P_{B1}, \delta} \pi_1$$

Diferenciando (15) con respecto a los precios asociados y el descuento del paquete (δ) produce las siguientes condiciones de primer orden:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial P_{A1}} = -\frac{1}{2\theta t} (P_{A1} - c_A \beta_{A1}) - \frac{\delta}{4\theta t^2} (P_{B1} - c_B \beta_{B1}) + \hat{x} + \frac{\delta \hat{y}}{\theta t} + \frac{3\delta^2}{8\theta t^2} = 0 \quad (52)$$

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial P_{B1}} = -\frac{\delta}{4\theta t^2} (P_{A1} - c_A \beta_{A1}) - \frac{1}{2t} (P_{B1} - c_B \beta_{B1}) + \hat{y} + \frac{\delta \hat{x}}{t} + \frac{3\delta^2}{8\theta t^2} = 0 \quad (53)$$

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial \delta} = \left\{ \left(\frac{\hat{y}}{2\theta t} + \frac{\delta}{4\theta t^2} \right) (P_{A1} - c_A \beta_{A1}) \left(\frac{\hat{x}}{2t} + \frac{\delta}{4\theta t^2} \right) (P_{B1} - c_B \beta_{B1}) - \hat{x} \hat{y} - \frac{\delta \hat{x}}{t} - \frac{\delta \hat{y}}{\theta t} - \frac{3\delta^2}{8\theta t^2} \right\} = 0 \quad (54)$$

De manera análoga, el problema de maximización para las firmas monoproducción es:

$$\max_{\beta_{k2}} \pi_{k2}$$

$k \in \{A, B\}$. Las condiciones de primer obtenidas de diferenciar (16), (17) con respecto a los precios asociados se muestran a continuación.

$$\frac{\partial \pi_{A2}}{\partial P_{A2}} = -\frac{1}{2\theta t} (P_{A2} - c_A \beta_{A2}) + 1 - \hat{x} - \frac{\delta \hat{y}}{2\theta t} - \frac{\delta^2}{8\theta t^2} = 0 \quad (55)$$

$$\frac{\partial \pi_{B2}}{\partial P_{B2}} = -\frac{1}{2t} (P_{B2} - c_B \beta_{B2}) + 1 - \hat{y} - \frac{\delta \hat{x}}{2t} - \frac{\delta^2}{8\theta t^2} = 0 \quad (56)$$

donde

$$\hat{x} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\theta t} (P_{A2} - P_{A1} + \alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2})$$

$$\hat{y} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2t} (P_{B2} - P_{B1} + \alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2})$$

La función del descuento (δ) de equilibrio por parte de la firma 1 no puede ser explícitamente expresada en forma cerrada. Sin embargo, después de considerar (54) en el vecindario de $\delta = 0$, se encuentra que:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial \delta} \Big|_{\delta=0} = \left(\frac{\hat{y}}{2\theta t} \right) (P_{A1} - c_A \beta_{A1}) + \left(\frac{\hat{x}}{2t} \right) (P_{B1} - c_B \beta_{B1}) - \hat{x} \hat{y}$$

Si $\delta = 0$, la competencia por empaquetamiento mixto se convierte al caso sin empaquetamiento en el cual las firmas eligen niveles de mejoras en calidad simétricos y precios en equilibrio.

Por lo tanto,

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial \delta} \Big|_{\delta=0} = \frac{1}{4} > 0 \quad (57)$$

Como un resultado, si el empaquetamiento mixto es permitido, la firma 1 tiene un incentivo para ofrecer un descuento sobre el producto empaquetado para poder aumentar sus beneficios. Así, en equilibrio $\delta^* > 0$.

Debido al hecho que en el descuento del paquete en equilibrio no puede ser expresado en forma cerrada, se pueden escribir los precios de equilibrio como una función de los niveles de mejoras en calidad y el descuento del paquete en equilibrio (δ^*). Después de solucionar (52) – (56), los precios de equilibrio a cualquier nivel dado de niveles de mejoras en calidad se pueden expresar tal y como se presenta a continuación.

$$P_{A1}^*(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \left(\frac{144\theta t^2}{144\theta^2 t^4 - 76\theta t^2 \delta^{*2} + \delta^{*4}} \right) \left[\theta \left(\theta t^3 - \frac{\delta^{*2} t}{3} \right) + \frac{\delta^* \theta t^2}{6} + \frac{\delta^{*5}}{288\theta t} - \frac{2}{9} \delta^{*3} + \left(\frac{960\theta^2 t^4 - 40\theta t^2 \delta^{*2} + \delta^{*4}}{144\theta t^2} \right) c_A \beta_{A1} + \left(\frac{40\theta t^2 - 3\delta^{*2}}{12} \right) c_A \beta_{A2} - \theta \left(\frac{2\delta\theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) c_B \beta_{B1} + \theta \left(\frac{2\delta\theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) c_B \beta_{B2} + \left(\frac{4\theta t^2 - 3\delta^{*2}}{12} \right) (\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) + \theta \left(\frac{2\delta\theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) (\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \right] \quad (58)$$

$$P_{B1}^*(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \left(\frac{144\theta t^2}{144\theta^2 t^4 - 76\theta t^2 \delta^{*2} + \delta^{*4}} \right) \left[\left(\theta t^3 - \frac{\delta^{*2} t}{3} \right) + \frac{\delta^* \theta t^2}{6} + \frac{\delta^{*5}}{288\theta t} - \frac{2}{9} \delta^{*3} - \right. \\ \left. \left(\frac{2\delta^* \theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) c_A \beta_{A1} + \left(\frac{2\delta^* \theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) c_A \beta_{A2} + \left(\frac{96\theta^2 t^4 - 40\theta t^2 \delta^{*2} + \delta^{*4}}{144\theta t^2} \right) c_B \beta_{B1} + \left(\frac{4\theta t^2 - 3\delta^{*2}}{12} \right) c_B \beta_{B2} + \right. \\ \left. \left(\frac{2\delta\theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) (\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) + \left(\frac{4\theta t^2 - 3\delta^{*2}}{12} \right) (\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \right] \quad (59)$$

$$P_{A2}^*(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \frac{\delta^*}{6t} \left(\frac{144\theta t^2}{144\theta^2 t^4 - 76\theta t^2 \delta^{*2} + \delta^{*4}} \right) \left[\left(\theta t^3 - \frac{\delta^{*2} t}{3} \right) + \frac{\delta^* \theta t^2}{6} + \frac{\delta^{*5}}{288\theta t} - \frac{2}{9} \delta^{*3} - \right. \\ \left. \left(\frac{2\delta^* \theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) c_A \beta_{A1} + \left(\frac{2\delta^* \theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) c_A \beta_{A2} + \left(\frac{96\theta^2 t^4 - 40\theta t^2 \delta^{*2} + \delta^{*4}}{144\theta t^2} \right) c_B \beta_{B1} + \left(\frac{4\theta t^2 - 3\delta^{*2}}{12} \right) c_B \beta_{B2} + \right. \\ \left. \left(\frac{2\delta\theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) (\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) + \left(\frac{4\theta t^2 - 3\delta^{*2}}{12} \right) (\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \right] + \theta t + \frac{\delta^{*2}}{12t} + \frac{1}{3} c_A \beta_{A1} + \frac{2}{3} c_A \beta_{A2} + \\ \frac{\delta^*}{6t} c_B \beta_{B1} - \frac{1}{3} (\alpha_A \beta_{A1} - \alpha_A \beta_{A2}) \quad (60)$$

$$P_{B2}^*(\beta_{A1}, \beta_{A2}, \beta_{B1}, \beta_{B2}) = \frac{\delta^*}{6\theta t} \left(\frac{144\theta t^2}{144\theta^2 t^4 - 76\theta t^2 \delta^{*2} + \delta^{*4}} \right) \left[\theta \left(\theta t^3 - \frac{\delta^{*2} t}{3} \right) + \frac{\delta^* \theta t^2}{6} + \frac{\delta^{*5}}{288\theta t} - \frac{2}{9} \delta^{*3} + \right. \\ \left. \left(\frac{96\theta^2 t^4 - 40\theta t^2 \delta^{*2} + \delta^{*4}}{144\theta t^2} \right) c_B \beta_{A1} + \left(\frac{4\theta t^2 - 3\delta^{*2}}{12} \right) c_B \beta_{A2} - \theta \left(\frac{2\delta\theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) c_B \beta_{B1} + \left(\frac{4\theta t^2 - 3\delta^{*2}}{12} \right) (\alpha_A \beta_{A1} - \right. \\ \left. \alpha_A \beta_{A2}) + \theta \left(\frac{2\delta\theta t^2 + \delta^{*3}}{36\theta t} \right) (\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \right] + t + \frac{\delta^{*2}}{12\theta t} + \frac{\delta^*}{6\theta t} c_A \beta_{A1} + \frac{1}{3} c_B \beta_{B1} + \frac{2}{3} c_B \beta_{B2} - \\ \frac{1}{3} (\alpha_B \beta_{B1} - \alpha_B \beta_{B2}) \quad (61)$$

Etapa 2. Las firmas eligen los niveles de mejoras en calidad simultáneamente. El problema de la firma multiproducto y de las firmas monoproducho son como siguen.

$$\max_{\beta_{A1}, \beta_{B1}} \pi_1$$

$$\max_{\beta_{k2}} \pi_{k2}$$

Es posible diferenciar las funciones de beneficios en forma reducida con respecto a los niveles asociados de mejoras en calidad (β_{ki}): $k \in \{A, B\}, i \in \{1, 2\}$. Adicionalmente, se puede sustituir (55) y (56) dentro de las derivadas para obtener:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial \beta_{A1}} = \left[1 - \frac{1}{2\theta t} (P_{A2} - c_A \beta_{A2}) \right] \left(\frac{\partial P_{A2}}{\partial \beta_{A1}} + \alpha_A - c_A \right) + \left[1 - \frac{1}{2t} (P_{B2} - c_B \beta_{B2}) \right] \frac{\partial P_{B2}}{\partial \beta_{A1}} - 2b_A \beta_{A1} = 0 \quad (62)$$

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial \beta_{B1}} = \left[1 - \frac{1}{2\theta t} (P_{A2} - c_A \beta_{A2}) \right] \frac{\partial P_{A2}}{\partial \beta_{B1}} + \left[1 - \frac{1}{2t} (P_{B2} - c_B \beta_{B2}) \right] \left(\frac{\partial P_{B2}}{\partial \beta_{B1}} + \alpha_B - c_B \right) - 2b_B \beta_{B1} = 0 \quad (63)$$

$$\frac{\partial \pi_{A2}}{\partial \beta_{A2}} = \frac{1}{2\theta t} (P_{A2} - c_A \beta_{A2}) \left[\frac{\partial P_{A1}}{\partial \beta_{A2}} + \alpha_A - c_A - \frac{\delta}{2t} \frac{\partial P_{B2}}{\partial \beta_{A2}} - \left(\hat{y} + \frac{\delta}{2t} \right) \frac{\partial \delta}{\partial \beta_{A2}} \right] - 2b_A \beta_{A2} = 0 \quad (64)$$

$$\frac{\partial \pi_{B2}}{\partial \beta_{B2}} = \frac{1}{2t} (P_{B2} - c_B \beta_{B2}) \left[\frac{\partial P_{B1}}{\partial \beta_{B2}} + \alpha_B - c_B - \frac{\delta}{2\theta t} \frac{\partial P_{A2}}{\partial \beta_{B2}} + \frac{\delta}{2\theta t} \frac{\partial P_{A1}}{\partial \beta_{B2}} - \left(\hat{x} + \frac{\delta}{2\theta t} \right) \frac{\partial \delta}{\partial \beta_{B2}} \right] - 2b_B \beta_{B2} = 0 \quad (65)$$

Proposición 5

- (i) La firma multiproducto ofrece un descuento sobre el paquete ($\delta^* > 0$) con la estrategia de empaquetamiento mixto y fija precios individuales más altos que los fijados por los rivales monoproducho, i.e. $P_{A1}^* > P_{A2}^*$ y $P_{B1}^* > P_{B2}^*$.

- (ii) *En el mercado más competitivo, los niveles de mejora en calidad de la firma multiproducto son más altos que los de su contraparte monoproducción.*

El resultado de mejoras en calidad en el mercado menos competitiva es ambiguo de acuerdo a θ . Sin embargo, si los dos mercados son idénticos en estructura de costos y utilidad adicional de mejoras en calidad y los costos de degustación no son tan diferentes (θ es lo suficientemente alto), el resultado es similar a los del mercado más competitivo.

El caso sin empaquetamiento puede ser visto como el caso de empaquetamiento mixto con $\delta = 0$. La firma multiproducto ofrece un descuento sobre el paquete (δ^*). Aunque los precios de la firma multiproducto son más altos que los precios de sus rivales, sus productos son todavía atractivos porque puede ofrecer un descuento como una herramienta de discriminación de precios bajo la estrategia de empaquetamiento mixto. La firma multiproducto recompensa a los consumidores al comprar sus paquetes con un descuento. Adicionalmente, en el mercado más competitivo, realiza mayores inversiones en mejoras en calidad para atraer más consumidores, especialmente esos que no compran su paquete, pero compran o el producto A1 o el producto B1. Las firmas monoproducción no pueden discriminar consumidores mediante un descuento sobre el paquete. En respuesta a los precios descontados de la firma multiproducto, las firmas monoproducción (sin cooperación) tienen que atraer consumidores fijando menores precios, lo que afecta todos los consumidores en el mismo modo. Esta reacción se encuentra comúnmente como complementos estratégicos en un juego de precios. Así que, en el mercado más competitivo, la firma monoproducción ciertamente reduce sus niveles de mejoras en calidad para ahorrar costos. Estos resultados de mejoras en calidad también se encuentran en el mercado menos competitivo si los costos de degustación de los dos mercados no son tan diferentes (θ es lo suficientemente alto). Aunque la firma multiproducto renuncia a algunos beneficios debido al descuento del paquete, puede después de todo estimular sus beneficios. Esto es parcialmente debido a sus precios individuales más altos que los de las firmas monoproducción.

La discriminación de calidad no es práctica en esta configuración. La firma multiproducto ofrece los mismos niveles de mejoras en calidad a todos los consumidores. Suponiendo que los costos de degustación de los dos mercados no son tan diferentes (θ es lo suficientemente alto), la firma multiproducto decide fijar niveles de mejoras en calidad que las firmas monoproducción para poder atraer los consumidores que confrontan sus precios individuales más altos. Similarmente, con la estrategia de empaquetamiento puro, como se estableció en proposición 2, la firma multiproducto también elige invertir en mejoras en calidad de manera más intensa que sus rivales monoproducción.

Proposición 6

- (i) *Después del empaquetamiento mixto, la firma multiproducto tiene beneficios más altos que las firmas monoproducción, i.e. $\pi_1^* > \pi_{A2}^* + \pi_{B2}^*$.*
- (ii) *Las participaciones de equilibrio de mercado son ambiguas.*

En el mercado más competitivo es posible que la firma multiproducto tenga participaciones de mercado mayores que la firma monoproducción.

El resultado en el mercado menos competitivo es ambiguo de acuerdo a θ . Sin embargo, si los dos mercados son idénticos en estructura de costos y utilidad adicional de las mejoras en calidad y los costos de degustación en los dos mercados no son tan diferentes (θ es lo suficientemente alto), el resultado es similar al que se presenta en el mercado más competitivo.

La firma multiproducto puede persuadir algunos consumidores para que se cambien a su producto por medio de estrategias de empaquetamiento mixto. Comparado al mercado menos competitivo, es más probable que la firma multiproducto quite algo de participación de mercado a su competidor monoproducción y se vuelva dominante en el mercado más competitivo con costos de degustación menores. El resultado en el mercado menos competitivo es ambiguo. Sin embargo, si los dos mercados

son idénticos en estructura de costos y la utilidad adicional en mejoras en calidad y los costos de degustación en los dos mercados no son tan diferentes (θ es lo suficientemente alto), es posible encontrar esta participación de mercado en el mercado menos competitivo. Adicionalmente, es cierto que la suma de los beneficios de las firmas monoproducción es menor que los beneficios de la firma multiproducción. La estrategia de empaquetamiento mixto pone a las firmas monoproducción en desventaja.

En adición a la estrategia de empaquetamiento, la firma multiproducción puede obtener participaciones de mercado más altas que sus rivales después de adoptar la estrategia de empaquetamiento mixto. Tanto el empaquetamiento puro como el empaquetamiento mixto puede incrementar los beneficios de la firma multiproducción y obtener beneficios más altos que los de sus rivales.

▪ **La estrategia de empaquetamiento puro vs. la estrategia sin empaquetamiento**

Los efectos de la estrategia de empaquetamiento sobre los resultados del mercado son discutidos en forma de una comparación entre los resultados de empaquetamiento mixto y la referencia sin empaquetamiento.

Proposición 7a

Después de la implementación de la estrategia de empaquetamiento mixto y no la sin empaquetamiento, los beneficios de la firma multiproducción aumentan mientras que los beneficios de las firmas monoproducción se reducen en ambos mercados, $\pi_{1Mixto}^ > \pi_{1No}^*$, $\pi_{A2Mixto}^* > \pi_{A2No}^*$ y $\pi_{B2Mixto}^* > \pi_{B2No}^*$. La estrategia de empaquetamiento puro domina la estrategia de no empaquetamiento para la firma multiproducción.*

En la etapa 1 del juego, la firma multiproducción tiene incentivos para emplear la estrategia de empaquetamiento mixto en vez de la sin empaquetamiento porque puede aumentar el beneficio después del empaquetamiento mixto. El descuento sobre el paquete puede ser visto como una herramienta para que la firma multiproducción persuada a los consumidores que originalmente comprarán otras combinaciones de producto para que elijan su paquete [A1B1].

Proposición 7b

Cuando la firma multiproducción emplea la estrategia de empaquetamiento mixto en vez de la estrategia sin empaquetamiento, los precios y las mejoras en calidad cambian como se presenta a continuación.

- (i) *La firma multiproducción aumenta sus precios individuales, mientras que las firmas monoproducción reducen sus precios en ambos mercados, i.e. $P_{A1Mixto}^* > P_{A1No}^*$, $P_{B1Mixto}^* > P_{B1No}^*$, $P_{A2Mixto}^* < P_{A2No}^*$ y $P_{B2Mixto}^* > P_{B2No}^*$.*
- (ii) *En el mercado más competitivo, la firma multiproducción aumenta sus niveles de mejoras en calidad, pero la firma monoproducción reduce sus niveles de mejoras en calidad, i.e. $\beta_{A1Mixto}^* > \beta_{A1No}^*$ y $\beta_{A2Mixto}^* < \beta_{A2No}^*$.*

Un cambio en las mejoras de calidad en el mercado menos competitivo es ambiguo. Sin embargo, si los dos mercados son idénticos en estructura de costos y utilidad adicional de las mejoras de calidad y los costos de degustación de los dos mercados no son tan diferentes (θ es lo suficientemente alto), la firma multiproducción aumenta sus niveles de mejoras de calidad, pero la firma monoproducción reduce sus niveles de mejoras de calidad en el mercado menos competitivo.

De manera similar a Avenali, D’Annunzio y Reverbi (2013), este estudio encuentra que la firma multiproducción aumenta sus precios individuales de manera estratégica, pero su paquete es sin embargo atractivo debido al descuento en sí mismo. La reacción de las firmas monoproducción es reducir sus precios. Los consumidores que intentan comprar otras combinaciones de producto diferentes al paquete

[A1B1] percibirán que los precios individuales de la firma multiproducto son más altos que los de las firmas monoproducción. Consecuentemente, en el mercado más competitivo, la firma multiproducto encuentra rentable aumentar la inversión en mejoras de la calidad para atraer algunos de esos consumidores. Mientras tanto, la firma monoproducción reduce sus niveles calidad para reducir costos asociados y poder ofrecer precios menores. Éste es un hallazgo muy importante que también es descrito por Avenali, D'Annunzio y Reverberi (2013). Aunque en el presente estudio no se considera el poder de mercado de la firma multiproducto, el empaquetamiento mixto disminuye los incentivos de las firmas a invertir en el contexto de una competencia más intensa. Sin embargo, el resultado en el mercado menos competitivo es ambiguo. Dado que los dos mercados son idénticos en estructura de costos y utilidad adicional de mejoras de calidad y los dos mercados no son tan diferentes en intensidad competitiva (θ es lo suficientemente alto), el resultado de las mejoras de calidad es similar a la contraparte del mercado más competitivo.

Proposición 7c

Después de la implementación de la estrategia de empaquetamiento mixto en vez de la estrategia de no empaquetamiento, un cambio en la participación de mercado es ambiguo.

En el mercado más competitivo, es más probable que la firma multiproducto pueda aumentar su participación de mercado, mientras que la participación de mercado de las firmas monoproducción se reduce.

El resultado en el mercado menos competitivo también es ambiguo. Sin embargo, si los dos mercados son idénticos en su estructura de costos y en su utilidad adicional de mejoras de calidad y los costos de degustación no son tan diferentes en los dos mercados (θ es lo suficientemente alto), el resultado es similar a los obtenidos en el mercado más competitivo.

Una comparación de participaciones de mercado es ambigua. Si los mercados son idénticos en sus estructuras de costos y utilidad adicional de mejoras de calidad y los dos mercados no son tan diferentes en términos de intensidad competitiva, la estrategia de empaquetamiento mixto no solo afecta los beneficios de las firmas monoproducción, sino también reduce sus participaciones de mercado.

En resumen, la firma multiproducto toma ventaja de un rango amplio de líneas de producto por medio de empaquetamiento mixto para poder obtener más beneficios. Esta puede ofrecer un descuento sobre el paquete como una herramienta adicional de discriminación de precios. Entre tanto, las firmas monoproducción (sin cooperación) no pueden implementar esta discriminación de precios y lo mejor que pueden hacer es aplicar un esquema de precios similar a todos los consumidores.

Proposición 7d

Después de la implementación de la estrategia de empaquetamiento mixto en vez de la estrategia sin empaquetamiento, un cambio en el excedente del consumidor es ambiguo.

Sin embargo, si los dos mercados son idénticos en estructura de costos y utilidad adicional de mejoras en calidad y los costos de degustación de los dos mercados son suficientemente diferentes (θ es lo suficientemente bajo), el empaquetamiento mixto reduce el bienestar del consumidor.

En el caso extremo analizado por Avenali, D'Annunzio y Reverberi (2013) donde la firma multiproducto ata su componente monopolístico con su componente competitivo, la estrategia de empaquetamiento mixto afecta el excedente del consumidor. Sin embargo, el presente estudio relaja el supuesto sobre intensidad competitiva y encuentra que el efecto del empaquetamiento mixto sobre el excedente del consumidor es ambiguo. La estrategia de empaquetamiento mixto, similar a la estrategia de empaquetamiento puro, afecta de manera más probable el bienestar del consumidor cuando los dos mercados unidos son significativamente diferentes en intensidad competitiva.

Corolario 1

Suponiendo que ambos mercados son idénticos en costos de degustación, estructura de costos y utilidad adicional de mejoras de calidad, el excedente del consumidor se reduce después del empaquetamiento mixto.

De acuerdo a la proposición 7d, suponiendo que los dos mercados son significativamente diferentes en los costos de degustación (θ es lo suficientemente bajo), los mercados son de manera notable distorsionados después de que el mercado menos competitivo es unido con el mercado más competitivo. Aunque el empaquetamiento mixto puede estimular a las firmas a ofrecer niveles más altos de mejoras de calidad de los productos A1 y B2 en este caso, los cambios en mejoras de calidad de los otros productos tienen un considerable efecto negativo sobre el excedente del consumidor. Como un resultado, el excedente termina reduciéndose. Adicionalmente, suponiendo que los dos mercados no son tan diferentes en costos de degustación (θ es lo suficientemente alto), las mejoras de calidad de la firma multiproducto se incrementan levemente mientras que las de las firmas monoproducción se reducen sustancialmente en comparación con el caso simétrico sin empaquetamiento. El efecto de la estrategia de empaquetamiento mixto sobre el excedente del consumidor es ambiguo en este caso. Sin embargo, una caída sustancial en los niveles de mejoras de calidad de las firmas monoproducción es más significativo en comparación con el incremento leve en los niveles de la firma multiproducto. Así que, es probable que el excedente del consumidor se reduzca después del empaquetamiento mixto. El efecto del empaquetamiento mixto sobre el excedente del consumidor es ambiguo de acuerdo a θ . El resultado es ilustrado en los tres casos de θ (θ es bajo, θ es moderado, y θ es alto). Sin embargo, este estudio enfoca su análisis de bienestar del consumidor en el caso de un θ bajo. Esto atrae la atención de los reguladores y está relacionado de manera cercana con la teoría del apalancamiento en el contexto de empaquetamiento.

Como se estableció en el corolario 1, si los dos mercados son idénticos en costos de degustación, estructura de costos y utilidad adicional de las mejoras de calidad, i.e. $\theta = 1$, $b_A = b_B$, $c_A = c_B$, $\alpha_A = \alpha_B$, el resultado de equilibrio en el mercado A es idéntico al del mercado B. Se encuentra que el deterioro de los niveles de calidad de las firmas monoproducción tiene efectos más significativos sobre el excedente del consumidor que la calidad de la firma multiproducto. En este marco de parámetros idénticos, el empaquetamiento mixto reduce el excedente del consumidor.

5. Conclusiones e implicaciones de política.

Este estudio examina los efectos del empaquetamiento puro y la estrategia de empaquetamiento mixto sobre los resultados del mercado y el excedente del consumidor. En este modelo, una firma multiproducto y dos rivales monoproducción compiten en dos mercados duopólicos, que tienen diferentes grados de competencia (diferentes costos de degustación). Las firmas ajustan sus niveles de mejoras de calidad y después fijan sus precios para atraer consumidores. Sin empaquetamiento, las firmas compiten la una con la otra en cada mercado separadamente. Esto lleva a un equilibrio simétrico en cada mercado. Sin embargo, ambas estrategias de empaquetamiento dominan la estrategia sin empaquetamiento porque la firma multiproducto puede aumentar beneficios después de empaquetar, en tanto que las firmas monoproducción pierden beneficios en muchas situaciones.

Con empaquetamiento puro, la firma multiproducto considera la externalidad entre los dos mercados interrelacionados, en tanto que sus rivales monoproducción (sin cooperación) la ignoran. Como resultado, la firma multiproducto puede ofrecer niveles más altos de mejoras de calidad que sus rivales. El precio del paquete de la firma multiproducto es más bajo (más alto) que el precio total del producto combinado de las firmas monoproducción si el proceso de mejora de calidad es ineficiente (suficientemente eficiente) en términos de costo y utilidad adicional.

Sin embargo, comparado con el escenario sin empaquetamiento, el empaquetamiento puro reduce los incentivos de la firma monoproducción a invertir en calidad en ambos mercados, pero la decisión de las firmas monoproducción sobre mejoras en calidad es ambigua. Si el proceso de mejoras de calidad es ineficiente (eficiente) en términos de costo y utilidad adicional, la firma multiproducción reduce (aumenta) sus niveles de mejoras en calidad. La comparación de precios también es ambigua. El precio del paquete de la firma multiproducción y el precio de la firma monoproducción en el mercado más competitivo son más altos que en los escenarios sin empaquetamiento si los grados de competencia de los dos mercados son tan diferentes que estas firmas se benefician de una reducción en la intensidad competitiva después del empaquetamiento puro. Entre tanto, la firma monoproducción en el mercado menos competitivo reduce su precio porque su rival multiproducción es más agresivo con la estrategia de empaquetamiento puro. La participación de mercado de la firma multiproducción aumenta. La firma monoproducción en el mercado menos competitivo experimenta reducción de sus beneficios. A pesar de una reducción en la participación de mercado, la firma monoproducción en el mercado más competitivo puede experimentar un aumento en beneficios si el beneficio de atar el mercado más competitivo con el menos competitivo prevalece.

El empaquetamiento mixto es una estrategia discriminadora de precios. Comparado con el escenario sin empaquetamiento, la firma multiproducción aumenta sus precios individuales en ambos mercados a pesar de su descuento sobre el paquete. Entre tanto, las firmas monoproducción reducen sus precios. En el mercado más competitivo, la firma multiproducción aumenta sus niveles de mejoras de calidad para poder atraer más consumidores a los que se les cobran precios individuales altos. La firma monoproducción reduce sus niveles de calidad en correspondencia a sus menores precios. En el mercado menos competitivo, un cambio en los niveles de calidad es ambiguo. Las participaciones de mercado de la firma multiproducción se pueden aumentar en ambos mercados cuando los dos mercados no son tan diferentes en intensidad competitiva. En adición al empaquetamiento puro, la firma multiproducción también puede implementar la estrategia de empaquetamiento mixto para lograr dominancia bajo estas circunstancias.

Comparado al escenario sin empaquetamiento, la estrategia de empaquetamiento puro reduce el excedente del consumidor cuando los dos mercados son significativamente diferentes en intensidad competitiva. En este caso, los efectos negativos de la competencia menos intensa con un limitado número de elecciones de producto sobrepasan los beneficios de la externalidad de la firma multiproducción. De manera similar, el efecto de la estrategia del empaquetamiento mixto sobre el excedente del consumidor es ambiguo. El bienestar del consumidor disminuye si los grados de competencia de los dos mercados son significativamente diferentes. Una reducción en las mejoras de calidad de las firmas monoproducción puede ser más sustancial que un aumento en los niveles de mejoras de calidad de la firma multiproducción. En este caso, la estrategia de empaquetamiento tiene, de manera más probable, un efecto negativo sobre el excedente del consumidor. Similar al empaquetamiento puro, el empaquetamiento mixto tiende a ser empleado para el propósito de aumentar la diferenciación de producto en el mercado más competitivo, además que promueve la competencia en precio y mejoras en calidad, especialmente cuando un mercado más competitivo es unido con un mercado menos competitivo.

El empaquetamiento parece inaceptable cuando el bienestar de un consumidor es la principal preocupación en muchas situaciones. Sin embargo, el regulador sectorial debería tener en cuenta algunos efectos positivos del empaquetamiento. Por ejemplo, el empaquetamiento puro puede promover las mejoras en calidad de la firma multiproducción cuando dichas mejoras no involucran costos relativamente altos. Por lo tanto, en áreas remotas con baja demanda y costos de inversión altos como en el sector de telecomunicaciones, el empaquetamiento puro no es una aproximación apropiada para estimular las mejoras en calidad. El empaquetamiento puro no debería ser permitido en esta situación para poder prevenir prácticas predatorias por la firma multiproducción y así proteger el bienestar del consumidor. De manera opuesta, en mercados más competitivos, el empaquetamiento mixto puede al menos estimular las mejoras en calidad por la firma multiproducción, que de manera probable está sirviendo a la mayoría de los consumidores. La estrategia de empaquetamiento puede allanar el camino para mayores estándares de calidad del producto en el futuro. En adición, los efectos del

empaquetamiento puro sobre el bienestar del consumidor son todavía ambiguos, así que es posible que el excedente del consumidor pueda aumentar bajo algunas condiciones. Una prohibición de empaquetamiento mixto en esta situación es una intervención miope. Los rivales monoproducción pueden elevar una queja en contra del empaquetamiento en un intento de parar la reducción en sus beneficios. Sin embargo, no es necesario para el regulador intervenir cuando todos los mercados interrelacionados son altamente competitivos.

Investigación adicional puede extenderse a un grupo de consumidores, que intentan consumir ya sea el producto A o el producto B. Adicionalmente, los temas de diferenciación vertical en calidad y segmentación del mercado son también interesantes en el contexto de empaquetamiento.

Referencias

- Armstrong, M. (2011). *Bundling revisited: substitute products and inter-firm discounts*. Economics Series Working Papers 574, University of Oxford.
- Avenali, A., D'Annunzio, A., & Reverberi, P. (2013). Bundling, competition and quality investment: a welfare analysis. *Review of Industrial Organization*, 43(3), 221-241.
- Choi, J.P. (1996). Preemptive R&D, rent dissipation, and the "Leverage Theory". *Quarterly Journal of Economics*, 111(4), 1153-1181.
- Choi, J.P. (2004). Tying and innovation: A dynamic analysis of tying arrangements. *Economic Journal*, 114(492), 83-101.
- Gans, J.S., & King, S.P. (2006). Paying for loyalty: product bundling in oligopoly. *Journal of Industrial Economics*, 54(1), 43-64.
- Granier, L., & Podesta, M. (2010). Bundling and mergers in energy markets. *Energy Economics*, 32(6), 1316-1324.
- Heeb, R. (2003). Innovation and vertical integration in complementary markets. *Journal of Economics and Management Strategy*, 12(3), 387-417.
- Krämer, J. (2009). Bundling vertically differentiated communications services to leverage market power. *Journal of policy, regulation and strategy for telecom-munications*, 11(3), 64-74.
- Matutes, C., & Regibeau, P. (1992). Compatibility and bundling of complementary goods in a duopoly. *Journal of Industrial Economics*, 40(1), 37-54.
- Nalebuff, B. (2004). Bundling as an entry barrier. *Quarterly Journal of Economics*, 119(1), 159-187.
- Reisinger, M. (2006). *Product bundling and the correlation of valuations in duopoly*. Discussion papers in economics, University of Munich.
- Rennhoff, A.D., & Serfes, K. (2009). The role of upstream-downstream competition on bundling decisions: should regulators force firms to unbundle? *Journal of Economics & Management Strategy*, 18(2), 547-588.
- Thanassoulis, J. (2007). Competitive mixed bundling and consumer surplus. *Journal of Economics & Management Strategy*, 16(2), 437-467.

- Thanassoulis, J. (2011). Is multimedia convergence to be welcomed? *Journal of Industrial Economics*, 59(2), 225-253.
- Tirole, J. (1988). *The theory of industrial organization*. MIT press.
- Venkatesh, R., & Kamakura, W. (2003). Optimal bundling and pricing under a monopoly: Contrasting complements and substitutes from independently valued products. *Journal of Business*, 76(2), 211-231.
- Wauthy, X. (1996). Quality choice in models of vertical differentiation. *Journal of Industrial Economics*, 44(3), 345-353.



Integración de los enfoques de arquitectura empresarial y multicriterio para evaluar el grado de madurez en una organización

MARTÍNEZ DELGADO, EDITH

Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (Cuba)

Correo electrónico: edithmd@ind.cujae.edu.cu

GARZA RÍOS, ROSARIO

Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (Cuba)

Correo electrónico: rosariog@ind.cujae.edu.cu

LÓPEZ ACEVEDO, JUAN MANUEL

Universidad Agraria de la Habana, Mayabeque (Cuba)

Correo electrónico: taboada@unah.edu.cu

SANTOS FERNÁNDEZ, SUSANA

Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (Cuba)

Correo electrónico: ssantos@udiao.cujae.edu.cu

RESUMEN

La necesidad de alinear las estrategias de la organización con las nuevas tecnologías de la información y comunicaciones ha sido impuesta por el desarrollo alcanzado por las mismas, siendo la Arquitectura Empresarial (AE) uno de los enfoques que posibilita realizar dicha alienación. Para implementar un proyecto de AE, se necesita partir de un diagnóstico que determine el estado actual de la organización para desarrollar, mantener y aplicar este enfoque, a través de un proceso continuo. Para ello se puede utilizar un modelo de madurez, que da la pauta para desarrollar estrategias de mejoras y alcanzar los objetivos previstos. El presente trabajo tiene como objetivo diseñar una tecnología que permita evaluar el grado de madurez de una organización. La propuesta parte de la aplicación de una lista de chequeo que recoge los aspectos fundamentales de las capas que conforman la Arquitectura Empresarial. Las preferencias de los cuadros y trabajadores involucrados son consideradas utilizando un enfoque Multicriterio, en particular, una función Scoring. Como resultado, se obtienen los niveles de madurez de las organizaciones consideradas y las aplicaciones permitieron detectar que las capas de mayores insuficiencias son las de negocio e información.

Palabras clave: madurez empresarial, multicriterio, arquitectura empresarial, scoring, evaluación.

Clasificación JEL: C69.

MSC2010: 90B50.

Artículo recibido el 8 de enero de 2019 y aceptado el 26 de junio de 2019.

Integrating of the enterprise architecture and multicriteria approaches to evaluate the degree of maturity in an organization

ABSTRACT

The need to align the strategies of the organization with the new information technologies had been imposed by the development of these last. One of the approaches that makes it possible such alienation is the Enterprise Architecture Approach (AE). To implement an AE project, it is necessary to start with a diagnosis that determines the current state of the organization to develop, apply and maintain this approach, through a continuous process. For this purpose, a maturity model can be used, which allows to draw up development strategies to achieve the planned objectives and identify improvement areas.

The present work has as objective to design a technology that allows evaluating the degree of maturity of an organization. The proposal starts from the application of a checklist that includes the fundamental aspects of the layers that make up the Enterprise Architecture. The preferences of the leaders and workers involved are considered using a Multicriteria approach, in particular, a weighted sum function (Scoring). As a result, the levels of maturity of the organizations considered are obtained, besides the applications allowed to detect that the layers of greater insufficiencies are those of business and information.

Keywords: business maturity, multicriteria, business architecture, scoring, evaluation

JEL classification: C69.

MSC2010: 90B50.



1. Introducción.

El desempeño de una organización depende de la capacidad que tenga la misma para asumir los retos que se imponen en el entorno empresarial, es por eso que las organizaciones se involucran en un proceso de mejora continua y se trazan estrategias para alcanzar, a través de diversos caminos, los objetivos deseados, pero sin un esquema de trabajo que ofrezca un punto de partida y de desarrollo, sin dudas estos objetivos se vuelven prácticamente inalcanzables para la organización.

Por otra parte, el desarrollo de las nuevas tecnologías de la información ha impuesto la necesidad de alinear las estrategias de la organización con las mismas, siendo la Arquitectura Empresarial (AE), uno de los enfoques que consigue una mejor alineación negocio-tecnología de la información.

El concepto de Arquitectura Empresarial emerge como una disciplina que integra aspectos relacionados al negocio y a las Tecnologías de Información (TI), transformándose en el pilar en las organizaciones en la actualidad, que requieren flexibilidad y agilidad en aras de fortalecer ventajas competitivas y comparativas, teniendo como eje la alineación entre las metas estratégicas, objetivos organizacionales, políticas y procesos de negocio (Iglesias & Nieto, 2015).

Para implementar un proyecto de AE, se necesita partir de un diagnóstico que determine el estado actual de la organización para desarrollar, mantener y aplicar este enfoque a través de un proceso continuo. Para ello, resulta útil emplear un modelo de madurez, que guíe el proceso de mejora y trace las estrategias correspondientes.

Antes de tratar sobre los modelos de madurez y la Arquitectura empresarial se deben entender dichos conceptos y otros relativos a los mismos.

Según la Real Academia Española un modelo se define como *“arquetipo o punto de referencia para imitarlo o reproducirlo”*; madurez o madurar, hace referencia a *“adquirir pleno desarrollo”* y el nivel, se puede entender como *“la medida de una cantidad con referencia a una escala determinada”*, arquitectura y empresa.

Arquitectura Empresarial es el proceso de traducir la visión y estrategia del negocio en un cambio efectivo para la organización mediante la creación, comunicación y mejora de los modelos y principios claves que describen el estado futuro de la organización y permiten la evolución de la misma.

La madurez de una entidad se puede entender como una *“condición perfecta”* que contribuye al pleno desarrollo de una organización; si alguna no ha alcanzado esta condición deberá establecer estrategias que le permitan obtener el grado de madurez deseado.

Los modelos de madurez permiten evaluar el estado de desarrollo de una organización o proceso de negocio, trazar estrategias de mejoras para alcanzar los objetivos previstos e identificar las áreas donde la organización debe enfocarse para mejorar. Los mismos fueron concebidos inicialmente para la industria del software y en la actualidad el área de aplicación es muy diversa. Algunos modelos de madurez aplicados con diversos objetivos se pueden encontrar en distintos trabajos (Montaño et al., 2012; Portella et al., 2016; Amaya & Felipe, 2008; Mettler, 2009; Gómez, 2017; Ávila, 2018).

Según autores como Suárez, Villar e Infante (2017), Lakhrouit y Baïna (2013), Azim et al. (2014), Malleuve et al. (2015), diversos son los modelos de madurez que se han diseñado y que permiten evaluar el estado actual de una organización con respecto a la AE. Entre los más utilizados se encuentran: Modelo de madurez de Arquitectura empresarial denotado por EAMM de sus siglas en inglés (*Enterprise Architecture of Maturity Model*), Modelo de madurez en el marco de referencia de la Arquitectura empresarial, EAMMF (*Enterprise Architecture of Maturity Model Framework*), Modelo de madurez de capacidad de la arquitectura, ACMM (*Architecture Capability Maturity Model*), Marco de evaluación de la Arquitectura empresarial, EAAF (*Enterprise Architecture Assessment Framework*), Modelo extendido de madurez de la Arquitectura empresarial, E2AMM (*Extended Enterprise*

Architecture Maturity Model), Modelo de madurez de alineación estratégica, SAMM (*Strategic Alignment Maturity Model*), Marco de Arquitectura empresarial de evaluación de madurez, MAEAF (*Maturity Assessment Enterprise Architecture Framework*). Todos estos modelos establecen de forma general, cinco o seis niveles de madurez que van desde un nivel 0, donde se define que no existe la AE hasta un nivel 5 ó 6 de AE optimizada (según la cantidad de niveles establecidos en el modelo), así mismo éstos comparten seis criterios para realizar la evaluación de la Arquitectura empresarial.

Entre los beneficios intangibles o no de la AE están los siguientes: facilita la visión y principios comunes entre el negocio y las TIC, mejora las comunicaciones dentro y fuera de la organización, contribuye a la información confiable y de alta calidad para una mejor toma de decisiones, reduce los costos, riesgos y tiempos de desarrollo e implementación de soluciones y mejora la eficiencia operacional del negocio.

En Suárez et al. (2016) se presenta una tecnología que permite realizar un diagnóstico con un enfoque de AE, basada en las cuatro capas de ésta, el marco de trabajo TOGAF y los modelos de madurez de la AE. Dicha tecnología parte de la realización de una lista de chequeo evaluada por el especialista encargado de diagnosticar la organización (investigador externo). Sin embargo, es criterio de los autores del actual trabajo que la aplicación de la tecnología referida anteriormente presenta limitaciones en cuanto a los aspectos que se expresan a continuación:

- El análisis que se realiza siguiendo la lista de chequeo, solamente considera el criterio de los investigadores externos, sin tener en cuenta la opinión de los trabajadores y cuadros de la organización, que son conocedores del negocio que se está evaluando y que además tienen como meta lograr la mejora de la entidad.
- Aunque no se plantea de forma explícita, hace uso de la media aritmética como medida de evaluación de los distintos aspectos en cada capa.
- Como resultado de la aplicación de la tecnología no se obtiene una evaluación que integre los resultados obtenidos en todas las capas consideradas en el diagnóstico, por lo que no visibiliza cuál es el estado general de desarrollo de la organización, es decir, se desconoce en qué nivel se encuentra el negocio en su totalidad.

A pesar de la creciente utilización de la AE y los modelos de madurez, en Cuba aún es incipiente su aplicación, debido a que a las empresas les ha resultado difícil priorizar las áreas en las que debe mejorar. Esto está dado fundamentalmente por la gran cantidad de información que se genera y por la inexperiencia de los directivos en estos temas. Esto denota la necesidad de emplear como guía modelos simples, pero a la vez que cumplan con el objetivo de su aplicación en el proceso de mejora de las organizaciones con el empleo de las tecnologías de la información y comunicaciones.

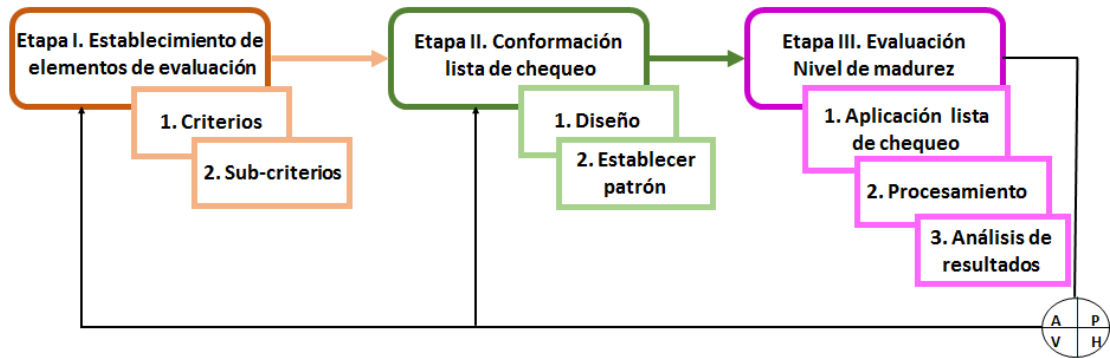
Por lo que en el presente trabajo se muestra la tecnología diseñada, que permite evaluar el grado de madurez de una organización, integrando los enfoques de AE y multicriterio. La misma salva las limitaciones antes expresadas y puede facilitar su uso, así como la estandarización de los resultados. Dicha tecnología es de carácter genérico aunque, debe ser interés de la organización donde se aplique, lograr la alineación entre sus procesos de negocio y las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

2. Tecnología propuesta para la evaluación del nivel de madurez.

En esta sección se expone la tecnología propuesta para obtener el nivel de madurez alcanzado por la organización, que parte de realizar un diagnóstico de su situación. Dicha tecnología integra los niveles propuestos en los modelos de madurez de la AE (Cruz & Briceño, 2014, 2015; Röglinger et al., 2011; Pérez, Pérez & Rodríguez, 2014; Durango et al., 2015) con un enfoque multicriterio-multiexperto que permite determinar en qué nivel se encuentra la organización con respecto a la AE, con vistas a diseñar el sistema de información de gobierno.

En la Figura 1 se representan las etapas y pasos que conforman la tecnología propuesta.

Figura 1. Tecnología propuesta para evaluar la madurez relativa a la AE.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar la tecnología incluye tres etapas que van llevando paulatinamente a la obtención del nivel de madurez de una organización. Forma parte de la misma el ciclo Deming, para asegurar que exista una retroalimentación y aprendizaje del proceso en correspondencia con un enfoque de mejora continua. La retroalimentación referida tendrá lugar hacia la primera o segunda etapa, en dependencia de los resultados de las fases del ciclo Deming. Otro aspecto que resulta ser clave para el éxito de la tecnología, aunque no está visible en el esquema que la representa, es la capacitación de los expertos. La misma está presente en todo momento, aunque cobra una mayor importancia en la etapa III.

A continuación, se realiza una breve descripción de los pasos diseñados para cada una de las etapas.

Etapa I: Establecimiento de elementos de evaluación.

En esta etapa se realizan sendos pasos en los que se definen los criterios y sub-criterios que se utilizan para obtener la evaluación del modelo de madurez, a través de los niveles de la Arquitectura empresarial.

Según Aragonés (1997), las características que definen a las alternativas se llaman atributos; cuando a éstos se les añade un mínimo de información sobre las preferencias del decisor, se convierten en criterios. Es por ello, que el término criterio significa un pre-orden que recoge las preferencias del decisor respecto al conjunto de elección.

1. Selección de los criterios.

En este paso será necesario determinar a través de qué criterios se desea valorar el nivel de madurez de arquitectura empresarial de una organización; por tal motivo los autores del presente trabajo proponen utilizar como criterios aquellas capas de la AE que resulten de mayor interés para la investigación.

Entre las características más importantes que deben poseer los criterios están el ser medibles, claros y concretos. Existe una clara delimitación entre cada una de las capas consideradas como

criterios; sin embargo, no hay una total claridad en los aspectos que deben incluirse para su evaluación, de ahí la necesidad que se pase a un desglose de éstos.

2. Selección de los sub-criterios.

En este paso es necesario definir como sub-criterios un conjunto de elementos que permitan medir los criterios o capas seleccionadas en el paso anterior.

Tanto para la determinación de los criterios como de los sub-criterios, se puede realizar un trabajo grupal empleando cualquier técnica desarrollada con este fin, siendo de relativa facilidad, la Tormenta de Ideas vinculadas al Método Delphi.

Etapas 2. Conformación de la lista de chequeo.

Como su nombre lo indica, esta etapa se encuentra relacionada con una lista de chequeo, e incluye el diseño o adaptación de aquellos elementos que se incluyen en la misma y que serán objeto de evaluación, así como la definición del patrón de evaluación de cada uno de estos elementos.

1. Diseño.

La lista de chequeo en su diseño o adaptación, recoge los aspectos o preguntas que constituyen los sub-criterios de cada capa (o criterio) definidos en la primera etapa de la tecnología. En el caso que se realice el diseño de la misma se debe considerar su validación. Para ello pueden emplearse diversas técnicas que resultan de utilidad para probar la validez y fiabilidad de la herramienta diseñada (Garrote & Rojas, 2015; Bohorquez & Hernández, 2013; Corral, 2009).

2. Patrón de evaluación.

Como parte del establecimiento del patrón de evaluación es necesaria la definición de los niveles a través de los que se medirán cada criterio y sub-criterio. Esto permite comprender el significado de los niveles y así evaluar consecuentemente cada aspecto considerado en la lista de chequeo.

En la literatura especializada se presentan, para evaluar el grado de madurez, múltiples versiones que utilizan diferente cantidad de niveles de evaluación (Pérez & Rodríguez, 2014; Luftman et al., 2017). Esto queda a criterio de los investigadores de las futuras aplicaciones.

Etapas 3. Evaluación del nivel de madurez.

En esta etapa se incluyen tres pasos que son: la aplicación de la lista de chequeo, su procesamiento y el análisis de los resultados. A continuación, se hace una breve descripción de los pasos referidos.

1. Aplicación de la lista de chequeo.

Este paso persigue obtener la evaluación de cada sub-criterio de la organización de interés. Para ello se aplica la lista a cada uno de los expertos que conformen cada grupo definido. Éstos deben ser seleccionados una vez que se confirme su nivel de experto. Para ello pueden utilizarse diversos métodos tales como: Método de la efectividad de su actividad profesional, Método de la auto-evaluación y Método del Coeficiente de Competencia K (Cuesta & Isaac, 2008).

2. Procesamiento de la lista de chequeo.

A partir de la información recogida con la aplicación de la lista de chequeo se deben realizar las siguientes actividades:

- Unificación del valor de cada capa.

- Ponderación de cada capa.
- Obtención del nivel de madurez.

En las actividades Unificación del valor de cada capa y Ponderación de cada capa, se puede emplear cualquier método de consenso. Entre éstos se encuentran los basados en la moda, la mediana y la media geométrica (Martínez et al., 2019).

Para la actividad Obtención del nivel de madurez se propone en el presente trabajo emplear un enfoque multiexperto-multiatributo. Se recomienda, utilizar el método Suma Ponderada conocido como Scoring (Maher & Maysam, 2016), aunque pudiera aplicarse otro correspondiente al enfoque multicriterio en espacios discretos (De Prada et al., 2018; Guerrero et al., 2014; Domínguez et al., 2011).

Se sugiere al menos un nivel 3 de madurez de la organización para un mayor éxito en la aplicación del proyecto de AE.

3. Análisis de resultados.

Una vez determinado el valor del nivel de madurez se procede a la realización del análisis de los resultados. Dicho análisis incluye la comparación de los valores obtenidos, ya sea por capa o criterio, por pregunta o sub-criterio y global. Para tener una mayor visualización y facilidad de análisis se sugiere que se empleen diferentes gráficos (pastel, radial, entre otros) y diagramas, que permitan conocer el estado de cada elemento que conforma cada capa.

Como resultado del análisis se detecta qué capas han sido evaluadas de manera más favorable, las que constituyen fortalezas en el desarrollo del proyecto de AE. Sin embargo, también resulta de interés, conocer qué capas han sido evaluadas de forma desfavorable y qué preguntas están incidiendo significativamente en este resultado. Esto sienta las bases para los aspectos que constituirán objeto de mejora en la organización.

3. Aplicación de la tecnología propuesta.

La aplicación de la tecnología propuesta se realiza en dos entidades de la Administración Central del Estado con el objetivo de determinar en qué situación se encuentran las mismas para el desarrollo del e-gobierno, y por seguridad, ética y discreción se omiten sus identidades. A continuación, se exponen simultáneamente los resultados más relevantes obtenidos con la aplicación realizada de la tecnología propuesta, en ambas organizaciones. Para ello se hace uso de gráficos y tablas que permitirán al lector realizar una mejor interpretación de los resultados.

Aplicación de la etapa I. Establecimiento de elementos de evaluación.

1. Selección de los criterios.

Atendiendo al marco de referencia de TOGAF y los modelos de madurez de la AE (Cruz & Briceño, 2015; Garza et al., 2018), las capas de la arquitectura empresarial que quedan seleccionadas en el presente trabajo son: Capa de negocios, Capa de datos e información, Capa de aplicación y la Capa de Tecnologías.

2. Selección de los sub-criterios.

Como se plantea anteriormente los criterios utilizados para obtener el nivel de madurez son las cuatro capas de la AE que resultan de interés y quedan seleccionadas en el paso anterior. De forma consecuente, como sub-criterios se seleccionan aquellos aspectos que permiten evaluar el contenido de cada una de las capas seleccionadas. En la Figura 2 se muestra el árbol jerárquico de los criterios y sub-

critérios para dicha aplicación, mientras que de forma explícita se presentan en la Tabla 1; los mismos se constituyen en preguntas posteriormente para conformar la lista de chequeo.

Figura 2. Árbol jerárquico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Aspectos a considerar para evaluar el grado de madurez en una organización.

Nº.	Aspectos a evaluar	Nº.	Aspectos a evaluar
1	Existencia de un Departamento o Grupo de Sistema de Información	2	Documentación del sistema de información de la organización
3	Definición de la estrategia de Informatización de la organización	4	Definición de la misión de la organización
5	Definición de la visión de la organización	6	Despliegue a todos los niveles de las funciones de la organización
7	Definición de los objetivos estratégicos de la organización y del dominio de todos los trabajadores	8	Identificación y documentación de los procesos de negocios de la organización
9	Conocimiento por parte de los trabajadores de su estructura organizativa	10	Utilización de los indicadores de los procesos para gestionar la organización
11	Compromiso de la alta dirección con la gestión del sistema de información	12	Consideración de la calidad de la información que recibe de fuentes externas
13	Establecimiento de los canales de comunicación electrónicos para difundir y compartir la información relevante	14	Conocimiento del manejo por parte de la organización de los flujos de información
15	Conocimiento de cuál es la información necesaria para la toma de decisiones	16	Utilización de alguna tecnología para el almacenamiento de la información que generan sus actividades
17	Implementación de estrategias para garantizar la seguridad de la información	18	Existencia de aplicaciones que soportan los procesos de la organización.
19	Capacitación de los trabajadores en el uso de las aplicaciones que manejan	20	Disponibilidad de una página web con diseño, información de interés, acceso y actualización, adecuados
21	Integración de las aplicaciones informáticas existentes a través de una plataforma de desarrollo de software	22	Modernización del estado técnico de la infraestructura tecnológica a través de inversiones controladas y adaptadas a modificaciones en el negocio
23	Posibilidad de la infraestructura tecnológica existente para soportar las aplicaciones de la organización	24	Aprovechamiento de la infraestructura tecnológica de la organización para la realización de sus actividades

25	Disponibilidad de infraestructura de comunicación y redes	26	Utilización de las Tecnologías de información para el cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización
27	Consideración de la Seguridad Informática		

Fuente: Elaboración propia.

Debe aclararse que los sub-criterios de la capa de negocio abarcan desde la pregunta 1 a la 11; los de la capa de aplicación van desde la pregunta 12 a la 17; de la pregunta 18 a la 21 conforman la capa de información y de la pregunta 22 a la 27, la de la capa de tecnología; todas recogidas en la Tabla 1.

Aplicación de la etapa II. Conformación de la lista de chequeo.

1. Diseño.

En cuanto al contenido de la lista, en este trabajo se propone emplear el sistema de aspectos propuestos por Suárez et al. (2016). Los mismos suman un total de veinte y siete elementos, desagregados éstos en: once que responden a la capa de negocio, seis a la capa de datos e información, cuatro a la capa de aplicación y seis a la capa tecnológica. No resulta prudente presentar dicha lista pero en la Tabla 1 se muestran los aspectos que son objeto de evaluación.

En esta aplicación no se realiza el diseño de la lista de chequeo, sino que se hace uso de la lista antes referida como válida, que constituye una entrada a la propuesta que se emplea en esta investigación, por lo que no procede su validación.

2. Patrón de evaluación.

En esta investigación se proponen cinco niveles para que cada elemento pueda ser evaluado. Éstos van desde la situación más desfavorable (nivel 1) hasta la más favorable (nivel 5). También se requiere contar con un patrón de evaluación, para comprender el significado de los niveles y así evaluar consecuentemente cada aspecto considerado en la lista de chequeo. En la Tabla 2 se muestran los niveles y significados (breve descripción del patrón de evaluación).

Tabla 2. Niveles de evaluación.

Niveles	Significado
1	No existencia del elemento
2	Conocimiento por parte de la entidad de la necesidad de aplicarlo
3	Se encuentra aplicado pero al más bajo nivel
4	Existencia y conocimiento de los trabajadores del elemento y se encuentra gestionado
5	Mejora continua

Fuente: Elaboración propia, modificada de Suárez & Jiménez (2016).

Aplicación de la etapa III. Evaluación del nivel de madurez.

Una vez que la lista de chequeo ha quedado conformada se pasa a su aplicación.

1. Aplicación de la lista.

En esta investigación se aplica la lista de chequeo a tres grupos de expertos que incluyen a investigadores externos, cuadros y trabajadores, para tener la visión y criterios de estos grupos de trabajadores. Cada experto de cada grupo realiza la evaluación de cada sub-criterio. Para la selección

de los expertos internos (cuadros y trabajadores) se hizo uso del Método de la efectividad de su actividad profesional.

El llenado de la lista de chequeo por los investigadores externos se apoya en: entrevistas, estudio de estados de opinión, observación, revisión documental, indicaciones, entre otros, que regulan el trabajo de la organización.

Es importante que en la aplicación de la lista de chequeo se logre un intercambio con miembros de la organización de modo que les permita entender el patrón de evaluación de cada aspecto evaluado. Por esto, el llenado por parte de los especialistas internos a la organización (cuadros y trabajadores), exige una capacitación preliminar por parte de investigadores externos que les permita la comprensión de cada aspecto o pregunta que conforma la lista; de esta forma se logra una valoración más fiel a la realidad.

2. Procesamiento.

➤ Unificación del valor

El procesamiento parte de la unificación del valor de cada capa, con el fin de integrar todas las valoraciones obtenidas y llegar a una evaluación global del estado de madurez de la organización. Para ello debe ser utilizado algún estadígrafo, tales como el rating, la moda, la mediana y la media geométrica. En particular, en las aplicaciones que se presentan en este trabajo se hace uso de la mediana. Este método se aplica tanto para lograr una evaluación por pregunta de la lista, considerando a los múltiples expertos, como para obtener la evaluación de cada capa teniendo en cuenta todas las preguntas de cada una.

➤ Ponderación de las capas

Además, en esta investigación no todas las capas tienen la misma importancia, por lo que se pasa a realizar una ponderación de éstas. Aunque la escala a emplear en este proceso de ponderación de los criterios puede ser cualquiera, en este caso se sugiere la propuesta realizada por Aragonés (1997), la que incluye los valores: 10, 7, 5, 3 y 1. En la Tabla 3 se muestra el significado de cada elemento de la escala a emplear.

Tabla 3. Escala para la ponderación de las capas.

Escala	1	3	5	7	10
Significado	No importante	Poco importante	Indiferente	Es importante	Es muy importante

Fuente: Elaboración propia, modificada de Aragonés (1997).

La ponderación obtenida para cada capa, emplea la escala referida anteriormente (Tabla 3) y el método de la asignación simple de los pesos con el consenso total de los expertos. Estos valores posteriormente fueron normalizados y tanto los valores de los primeros como de estos últimos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Pesos por capa normalizados.

Capa	Peso	Peso normalizado
Negocio	10	0,37
Aplicación	7	0,26
Información	5	0,18
Tecnología	5	0,18

Fuente: Elaboración propia.

➤ Obtención del nivel de madurez

Finalmente, para la obtención del nivel de madurez de la organización pueden aplicarse diversos métodos como se plantea en la descripción teórica de la tecnología que se propone. En estas aplicaciones es seleccionado el Método Suma ponderada (Scoring), que a pesar de sus limitaciones ha demostrado ser un método eficaz para obtener las evaluaciones de una alternativa.

La expresión que permite determinar la suma ponderada está dada en la ecuación (1):

$$EM = \sum_{i=1}^r w_j \cdot ec_{ij} \quad (1)$$

donde:

EM: evaluación obtenida considerando la opinión de cada grupo de expertos

W_j: importancia o peso de la capa *i*

EC_{ij}: evaluación de la capa *i* obtenida de la etapa anterior considerando la opinión de cada grupo de expertos.

r: número de capas

Además, se necesitan definir los intervalos (patrón de evaluación) de *EM* que corresponden a cada nivel de madurez. Dichos intervalos se obtienen de la aplicación de técnicas de trabajo en grupo o técnicas de experto para hacer corresponder la opinión de los involucrados en la investigación, debiéndose recoger en forma tabular dichos resultados. Los valores extremos de la escala resultan de evaluar la expresión (1) en las valoraciones peores y mejores respectivamente, así como lograr intervalos uniformes entre éstos. En la Tabla 5 se muestra la escala propuesta.

Tabla 5. Escala propuesta (patrón de evaluación).

Intervalos de EM	Nivel de Madurez
$0,99 \leq EM \leq 1,782$	Nivel 1
$1,783 \leq EM \leq 2,575$	Nivel 2
$2,576 \leq EM \leq 3,368$	Nivel 3
$3,369 \leq EM \leq 4,161$	Nivel 4
$4,162 \leq EM \leq 4,954$	Nivel 5

Fuente: Elaboración propia.

Haciendo uso del Método especificado según aparece en la expresión (1) y la escala propuesta en la Tabla 5, se obtuvo la evaluación general del nivel de madurez para cada una de las entidades analizadas, que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Nivel de madurez por entidad.

Entidad	EM	Nivel de madurez
1	2,420	2
2	2,385	2

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en los resultados recogidos en la Tabla 6, ambas entidades se encuentran en el nivel 2 de madurez, lo que significa que las entidades tienen conocimiento de la necesidad de aplicar la Arquitectura Empresarial con el fin de lograr la alineación del negocio con las tecnologías de la información, pero resulta insuficiente lo logrado en cuanto a su aplicación y gestión.

3. Análisis de los resultados.

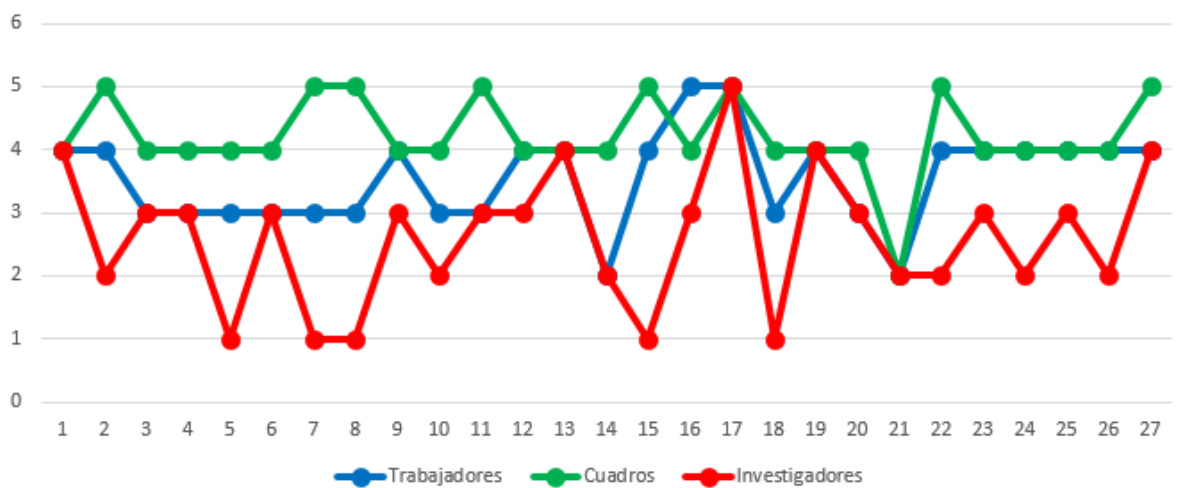
Una vez determinado el valor del nivel de madurez se procede a la realización del análisis de los resultados, por distintos criterios con ayuda de salidas gráficas.

A continuación, se brinda el comportamiento de las evaluaciones dadas a los sub-criterios o preguntas de la lista de chequeo por grupo de expertos. Tanto en una figura como en la otra, las etiquetas de las variables representan lo que sigue:

- En el eje de la abscisa: Sub-criterio o preguntas de la 1 a la 27 (Tabla 1).
- En el eje de la ordenada: Niveles de evaluación del 1 al 5 (Tabla 2).

En la Figura 3 se muestra el comportamiento de las evaluaciones dadas a las preguntas de la lista de chequeo por trabajadores, cuadros e investigadores de la entidad 1.

Figura 3. Resultados del procesamiento de la lista de chequeo por grupos de expertos en la entidad 1.



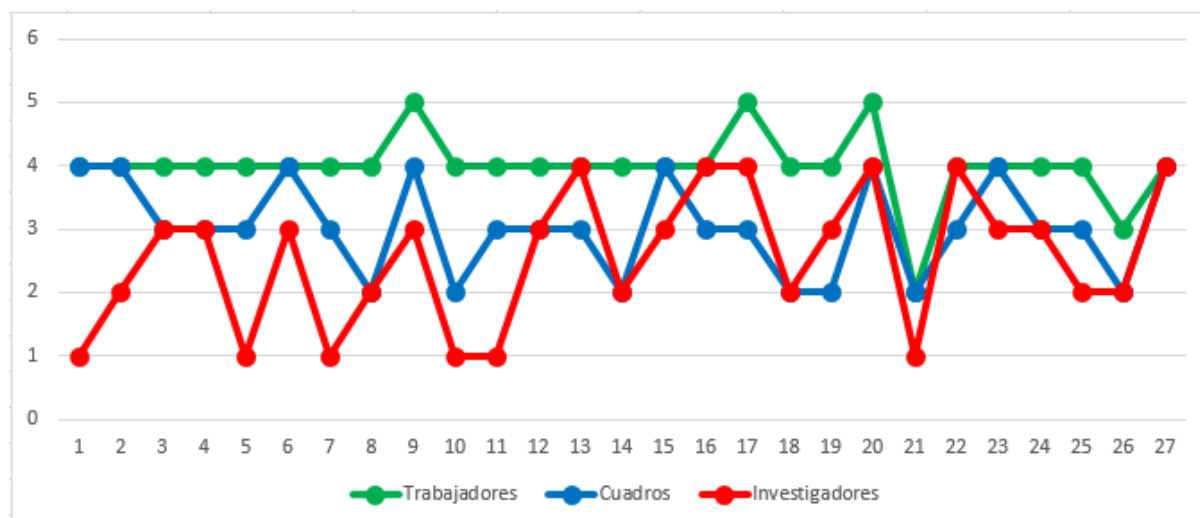
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 3, los cuadros sobrealoran cómo se encuentra la entidad en la totalidad de las preguntas de la lista de chequeo, otorgándole mayor puntuación que los trabajadores e investigadores, siendo estos últimos los que otorgan una evaluación más baja. Solamente en las preguntas

1, 13, 17, 19, 21 coinciden los tres grupos en su valoración. Se destaca además la coincidencia entre las valoraciones dadas por los trabajadores e investigadores, que coinciden en el 44%.

De manera similar, este análisis se efectúa para la entidad 2 y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.

Figura 4. Resultados del procesamiento de la lista de chequeo por grupos de expertos en la entidad 2.



Fuente: Elaboración propia.

En este caso, se mantiene que las evaluaciones más bajas corresponden a las realizadas por los investigadores (67%), coincidiendo éstas con las dadas por los cuadros en el 2,5%. Sin embargo, se puede apreciar que la sobrevaloración en la evaluación de la entidad con relación a las preguntas de la lista de chequeo está por parte de los trabajadores.

Otro análisis se basó en la cantidad de preguntas evaluadas en los diferentes niveles, independientemente de la capa a la que pertenezca y al grupo de expertos evaluadores, de esta forma se llega a conocer la situación de cada entidad. En las Figuras 5 y 6 se muestran respectivamente, los resultados de las entidades 1 y 2.

Según el diagrama de sectores realizado para cada entidad se puede apreciar que los porcentajes mayores de preguntas se ubican, tanto en una entidad como la otra, en los niveles 2 o 3 constituyendo más del 65%, mientras que aproximadamente el 20% de las preguntas se ubican en el nivel 4, no siendo éste un resultado favorable. En lo que respecta al porcentaje restante, se diferencian cualitativamente, estando en la entidad 1 el 14 % en el nivel 5 y en la entidad 2 se ubica el 10% en el nivel 1. Los aspectos donde coinciden evaluaciones más bajas otorgadas por los investigadores corresponden a dos elementos de la planeación estratégica, como son los referidos a la definición de la visión de la organización y de los objetivos estratégicos de la organización y dominio de todos los trabajadores.

Figura 5. Proporción de preguntas por niveles en la entidad 1.

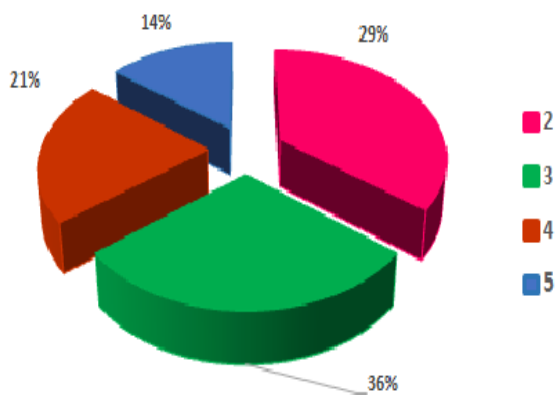
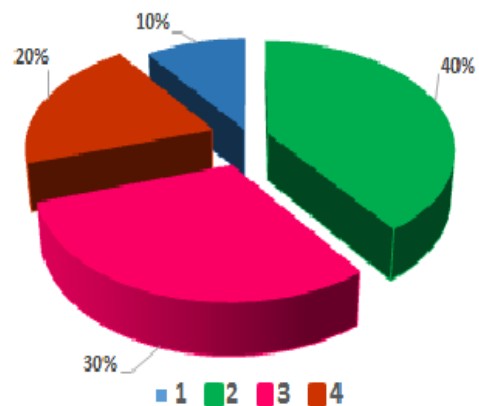


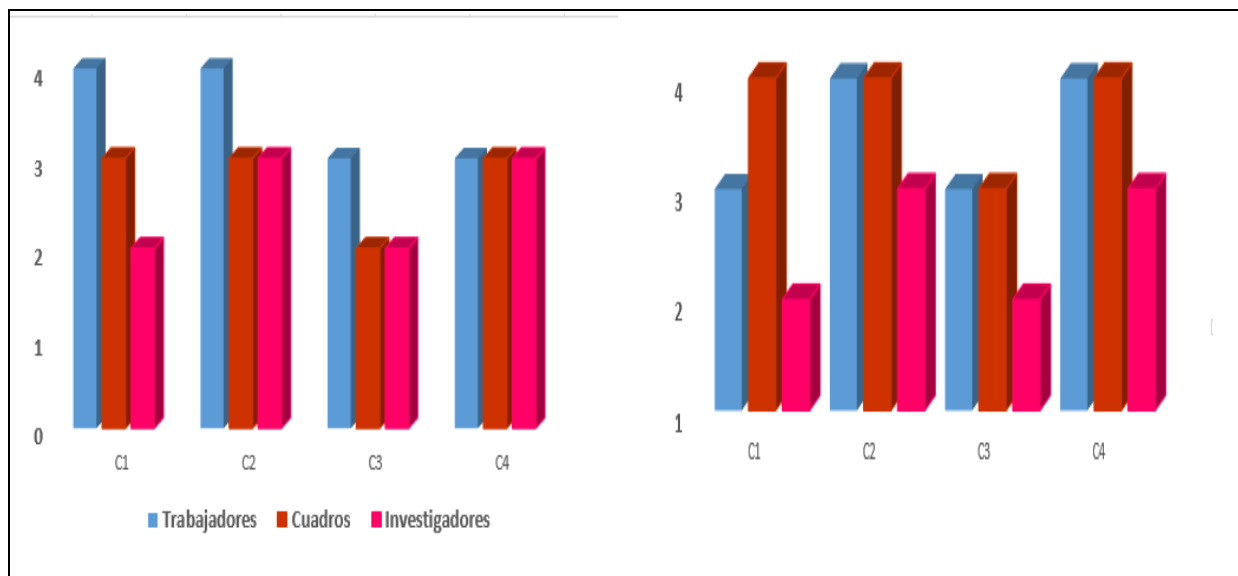
Figura 6. Proporción de preguntas por niveles en la entidad 2.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7 se muestra cómo quedan evaluadas las capas de acuerdo a cada grupo de expertos, es decir, trabajadores, cuadros e investigadores en las entidades 1 y 2 respectivamente. Las valoraciones más favorables las ofrecen en ambas entidades evaluadores internos a la organización.

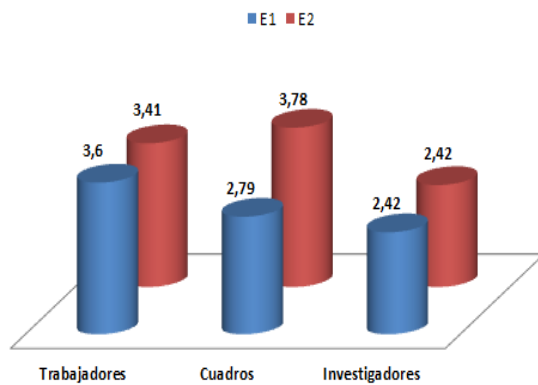
Figura 7. Evaluación de las capas por grupo de expertos en cada entidad.



Fuente: Elaboración propia.

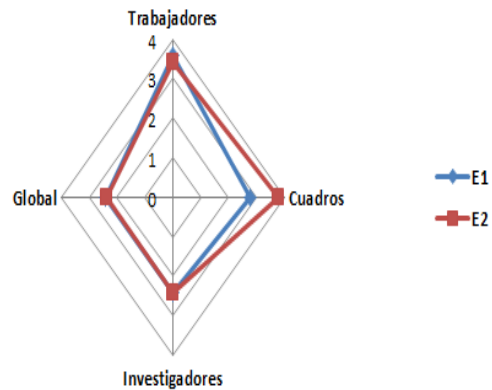
En la Figura 8 se muestran las evaluaciones globales numéricas dadas por cada grupo de expertos en las entidades consideradas, mientras que en la Figura 9 se concentran todas las evaluaciones mostrando los niveles equivalentes a los valores alcanzados.

Figura 8. Valoraciones globales por grupos de expertos y entidades.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Niveles alcanzados en las entidades.



Fuente: Elaboración propia.

Las figuras anteriores muestran de forma resumida las evaluaciones por grupo de experto en cada entidad: la Figura 8 representa el valor de la función suma ponderada (EM) que integra las distintas capas y la Figura 9 ofrece el nivel de madurez alcanzado que corresponde al valor de suma ponderada (recogida en la Figura 8) y atendiendo al intervalo al que pertenece el valor de EM de la escala brindada en la Tabla 5. Debe notarse que, aunque existan diferencias entre algunos valores de EM por grupo de expertos, pueden pertenecer al mismo nivel de madurez pues ésta está dada por intervalos. De esta forma, los EM de los trabajadores difieren en sus valores para cada entidad, pero pertenecen al mismo intervalo (nivel 4), los correspondientes a los cuadros difieren significativamente según la escala definida y conllevan a diferentes niveles para las entidades 1 y 2, con niveles 3 y 4 respectivamente. En cuanto a los EM de los investigadores, coinciden en su valor de 2,42 y nivel 2. Por último, la Figura 9 también brinda el valor EM global considerando los tres grupos de expertos.

4. Conclusiones.

La tecnología propuesta con los enfoques de Arquitectura Empresarial y multicriterio elimina las limitaciones identificadas del procedimiento base, al obtener una evaluación global que integra los resultados de todas las capas consideradas en el diagnóstico. Esto permite visualizar cuál es el estado general de desarrollo de la organización en el proyecto de Arquitectura Empresarial y, con ello, el nivel en el que se encuentra el negocio en su totalidad.

La tecnología tiene un carácter general y es más participativo al tener en cuenta no solamente el criterio de los investigadores externos, sino también la opinión de los trabajadores y cuadros de la organización, que son conocedores del negocio que se está evaluando y que tienen como meta lograr la mejora de la misma.

La propuesta que se realiza muestra el cómo hacer, al presentar los pasos que guían con un enfoque multiexperto-multicriterio el procesamiento de la lista de chequeo, aplicando técnicas de consenso que exigen las decisiones grupales.

La aplicación de la tecnología desarrollada resulta ser efectiva, mostrando su potencialidad para evaluar con carácter integrador sus capas. En este sentido, arrojan que las entidades analizadas están en un nivel 2 de madurez, es decir, tienen conocimiento de la necesidad de aplicar la Arquitectura Empresarial para alinear su negocio con las tecnologías de la información, pero resulta insuficiente lo

logrado en cuanto a su aplicación y gestión. Los resultados más desfavorables están en las capas de negocio e información.

El diagnóstico con esta tecnología hace posible detectar las brechas que constituyen oportunidades de mejora de este proyecto de AE con lo que las organizaciones pueden conducir su quehacer hacia la mejora continua mediante las estrategias pertinentes.

Referencias

- Amaya, C., & Felipe, L. (2008). Modelos de capacidad y madurez y la industria del software en Colombia. *Revista Generación Digital*, 7(2), 1-4.
- Aragónés, P. (1997). *Aproximación a la toma de decisiones multicriterio en proyectos. Implementación de una metodología multicriterio y multiexperto: PRESS II*. (Tesis doctoral no publicada). Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Ávila, B.L. (2018). Modelos de Referencia de Arquitectura Empresarial para la Industria de Educación Superior. *Revista Killkana Técnica*, 2(1), 27-34. DOI: 10.26871/killkana_tecnica.v2i1.288.
- Azim, A.Z., Basiri, M., & Someh, M.F. (2014). A framework for organizational architecture of electronic city and electronic municipality. *European Scientific Journal*, 2(Special Edition), 27-37.
- Bohorquez, J.L., & Hernández, M. (2013, agosto). Utilización del alfa de Cronbach para validar la confiabilidad de un instrumento de medición de satisfacción del estudiante en el uso del software Minitab. En R. Lorán Santos, *Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013)*, Universidad Quintana Roo, Cancun, Mexico.
- Corral, Y. (2009): Validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación para la recolección de datos. *Revista Ciencias de la Educación*, 19, 228-247.
- Cruz, H., & Briceño, W. (2014). Factores relevantes para inicio de arquitecturas empresariales en el sector público colombiano. *Estudio Bibliométrico. Revista Gerencia, Tecnología e Informática*, 13(35), 63-77.
- Cruz, H., & Briceño, W. (2015). Identificación de principios de arquitectura empresarial para la gestión de factores de impacto en entidades públicas colombianas utilizando TOGAF. *Revista Inventum*, 18, 22-28.
- Cuesta, M., & Isaac, C. (2008). Metodología para la mejora de los procesos del sistema de gestión de la calidad de la gerencia de los proyectos de ETECSA. *Revista Ingeniería Industrial*, 29(3), 1-7.
- De Prada, J. et al. (2018). Planificación territorial: elección multicriterio interactivo del patrón de urbanización. Estudio de caso: Río Cuarto, Córdoba, Argentina. *Revista Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 26, 25-51.
- Domínguez, M., et al. (2011). Una revisión crítica para la construcción de indicadores sintéticos. *Revista Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 11, 41-70.
- Durango, C., Quintero, M.E., & Ruiz, C.A. (2015). Metodología para evaluar la madurez de la gestión del conocimiento en algunas grandes empresas colombianas. *Revista Tecnura*, 19(43), 20-36.

- Garrote, R., & Rojas, M.D.C. (2015). La validación por juicio de expertos: dos experiencias cualitativas en Lingüística aplicada. *Revista Nebrija de Lingüística aplicada a la enseñanza de las lenguas*, 9(18), 124-139.
- Garza, R. et al. (2018, octubre). Enfoque multicriterio para evaluar el grado de madurez de un proyecto Arquitectura empresarial. En Y. Palma Díaz, *Convención Internacional Cubaindustria. III Congreso Internacional de Gestión Tecnológica e Innovación Organizacional (GESTEC)*. Organización de las Naciones Unidas para el desarrollo industrial (ONUUDI), La Habana, Cuba.
- Gómez, C. (2017, marzo). Modelo de arquitectura empresarial para pequeña y mediana empresa de TI en Colombia. En T. Marlowe. *The 8th International Multi-Conference on Complexity, Informatics, and Cybernetics: IMCIC 2017. Séptima Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética (CICIC 2017)*, International Institute of Informatics and Systemics, Orlando, EEUU.
- Guerrero, M.D., Gómez, J.A., & Fuet, J.V. (2014). Are Multi-criteria Decision Making Techniques Useful for Solving Corporate Finance problems? A Bibliometric Analysis. *Revista Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 17, 60-79.
- Iglesias, A.M., & Nieto, W. (2015). Un análisis de la adopción de programas de Arquitectura Empresarial en las Organizaciones. *Journal of Engineering and Technology*, 4(1), 62-78.
- Lakhrouit, J., & Baïna, K. (2013, noviembre). State of the art of the maturity models to an evaluation of the enterprise architecture. En Sahbi Sidhom. *3rd International Symposium; Marrakech, Morocco*. IEEE. Recuperado de: <http://sci-hub.cc/10.1109/isko-maghreb>.
- Luftman, J. et al. (2017). Enhancing the measurement of information technology (IT) business alignment and its influence on company performance. *Journal of Information Technology*, 32(1), 26-46.
- Maher, A., & Maysam, F. (2016). Classifiers consensus system approach for credit scoring. *Knowledge Based Systems*, 104, 89-105.
- Malleuve, A., Stuart, M., & Alfonso, D. (2015). Una aproximación hacia la evaluación del nivel de madurez de la arquitectura empresarial. *Revista Cubana de Ingeniería*, 6(3), 33-42.
- Martínez, E. et al. (2019). Diagnóstico del servicio de mantenimiento de grupos electrógenos de emergencia. *Revista Ingeniería Mecánica*, 22(2), 92-99.
- Mettler, T. (2009). *A design science research perspective on maturity models in information systems*. Institute of Information Management, University St Gallen. Recuperado de: <https://www.alexandria.unisg.ch/export/dl/214532.pdf>
- Montaño, O. et al. (2012). Modelo que identifica la madurez de los procesos. Caso: pequeña empresa manufacturera. *Revista DYNA*, 1(1), 131-132.
- Pérez, E., Pérez, I., & Rodríguez, Y. (2014). Modelos de madurez y su idoneidad para aplicar en pequeñas y medianas empresas. *Revista Ingeniería Industrial*, 35(2), 146-158.
- Pérez, E., & Rodríguez, Y. (2014). Procedimiento para la aplicación de un modelo de madurez para la mejora de los procesos. *Revista Cubana de Ingeniería*, 5(2), 29-39.

- Portella, R. et al. (2016). Modelo de madurez en gestión para organizaciones del tercer sector. *Revista del CLAD Reforma y Democracia*, 66, 195-224.
- Röglinger, M. et al. (2011). Maturity models in business process management. *Business Process Management Journal*, 18(2), 328-346.
- Suárez, P., Villar, L., & Infante, M. (2017). Análisis del modelo de madurez de arquitectura empresarial. *Revista Cubana de Ingeniería*, 8(3), 9-16.
- Suárez, P., & Jiménez, L., (2016). *Tecnología para diagnóstico de Sistema de Información de Gobierno basado en enfoque de Arquitectura Empresarial* (Tesis de grado no publicada), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE).

Un modelo cuantitativo de gobierno universitario

FRANK, LUIS

Universidad de Buenos Aires (Argentina)

Correo electrónico: frank@agro.uba.ar

RESUMEN

El trabajo explica, a través de un modelo cuantitativo, cómo se fijan las dedicaciones a la docencia y la investigación en universidades gobernadas por grupos de interés, tales como las universidades públicas argentinas. Para ello, se proponen funciones de utilidad docente y de costo político asumido por el Consejo Académico que gobierna la Universidad. La optimización simultánea de estas funciones conduce a un equilibrio general que satisface los intereses de todas las partes y garantiza la gobernabilidad de la institución, así como una asignación de tiempo óptima para las actividades de enseñanza e investigación.

Palabras clave: gobierno universitario, modelo, universidades públicas, Argentina.

Clasificación JEL: I21; I23.

MSC2010: 49-02.

A quantitative model of university government

ABSTRACT

The paper explains, through a quantitative model, how dedications to teaching and research are fixed in universities governed by interest groups, such as Argentines' public universities. To that end, utility functions of professors and a political cost function assumed by the Academic Council that governs the University are proposed. The simultaneous optimization of these functions leads to a general equilibrium that satisfies the interests of all parties and guarantees the governability of the institution, as well as an optimal time allocation to teaching and research activities.

Keywords: university government, model, public universities, Argentina.

JEL classification: I21; I23.

MSC2010: 49-02.



1. Introducción.

En Argentina, el gobierno de las universidades nacionales se rige por la ley 24.521 de Educación Superior, los Estatutos Universitarios y los reglamentos dictados por los Consejos de cada institución. La Universidad de Buenos Aires (UBA), en particular, se rige por el Estatuto Universitario de 1960 (repuesto por decreto 157/83 y ley 23.068), por los reglamentos del Consejo Superior (CS) de la Universidad, entre los que se destaca el reglamento de provisión de cargos de profesores regulares (resolución CS 4362/12), y por los de los Consejos Directivos (CD) de sus 13 Facultades. La composición del Consejo Superior y de los Consejos Directivos (máximos órganos de gobierno) se basa en el principio de cogobierno entre profesores, graduados y alumnos, impulsado por la Reforma Universitaria de 1918. El CS de la UBA está integrado por 5 profesores, 5 graduados y 5 estudiantes, más los decanos de las 13 facultades y es presidido por el Rector. Los CD son órganos descentralizados y están constituidos por 8 profesores regulares, 4 graduados y 4 estudiantes, y son presididos por el Decano de la Facultad. Existen, además, órganos menores de gobierno, como las Juntas Departamentales, que replican esta estructura de cogobierno. La representación de estos tres claustros se halla sujeta a renovación periódica, cada dos años en el caso del claustro estudiantil y de graduados, y cada cuatro en el caso del claustro de profesores. Con alguna variante, todas las universidades nacionales siguen un esquema similar (para un panorama de la educación superior en Argentina, véase Fernández, 2002).

Las universidades nacionales son instituciones autónomas y autárquicas del Poder Ejecutivo Nacional (Convención Constituyente, 1994, art. 75 inc. 19), aunque el alcance de la autonomía es, a veces, motivo de debate entre juristas (Molina, 2014; Novelli, 2011). El concepto de autarquía en Derecho y Ciencias Políticas (ver por ejemplo García, 1995) se refiere a la facultad de un ente de administrarse a sí mismo, pero de acuerdo con una norma que le es impuesta, al contrario de la autonomía que se refiere la facultad del ente de darse sus propias instituciones y gobernarse por ellas. No obstante, en un fallo que fija jurisprudencia, la Corte Suprema de Justicia de la Nación CSJN (1996) definió que: “la autonomía universitaria consiste en que cada universidad nacional establezca su propio estatuto [...], elija sus autoridades, designe a los profesores, fije el sistema de nombramientos y disciplina interna”. Es decir que, de acuerdo a la CSJN, el autogobierno y la capacidad de fijar su propio sistema de nombramiento de profesores son derechos constitucionales de las universidades nacionales.

La escasa bibliografía sobre la gobernanza de las universidades nacionales aborda la cuestión desde una perspectiva histórico-política (Buchbinder, 2010; Halperin, 2002; Unzué, 2012); normativa-institucional (Romera & Puricelli, 1994, pp. 15-27; Marquis, 2010; Nosiglia & Mulle, 2009, 2015); de fijación de estándares de calidad (CONEAU, 2007; Consejo de Universidades, 2015); incluso, desde una perspectiva electoral (Delicio et al., 2001); o también como marco institucional para explicar la eficiencia técnica de universidades de gestión pública (Coria, 2008). Por esta razón, el trabajo que sigue se propone desarrollar un modelo cuantitativo de gobierno de una universidad nacional típica que explique el comportamiento del CS o los CD. Aclaremos que el objetivo del trabajo es la formalización matemática de los intereses de cada grupo de interés del gobierno universitario y del rol de un instrumento normativo en particular, el reglamento de concursos de profesor, que a nuestro juicio es fundamental para entender la gobernanza de la Universidad.

2. La Universidad típica.

Consideremos una universidad (podría ser también una facultad o una unidad académica menor) gobernada por un Consejo Académico de profesores, graduados y alumnos, en una relación tal que al menos la mitad de los consejeros sean profesores y la otra mitad se distribuya equitativamente entre graduados y alumnos. En este Consejo las decisiones se toman por mayoría simple, es decir, con acuerdo de la mitad más uno de los consejeros, sin que existan mecanismos especiales de desempate.

Si bien estos mecanismos existen en todos los órganos de gobierno, como el voto del rector o decano, su uso reiterado suele acarrear “costos políticos” tan altos que en la práctica tienden a evitarse.

Supongamos, además, que los consejeros de cada claustro representan los intereses de sus pares y, salvo por el hecho de ser consejeros, no se distinguen en nada respecto de ellos. En otras palabras, los consejeros no tienen intereses propios distintos de los de sus representados, y no hay obstáculo político alguno para que cualquiera de los representados pueda ser electo representante.

Los profesores de esta Universidad tienen a su cargo la enseñanza en todos sus aspectos (incluyendo la gestión administrativa de la propia institución) y se designan por concurso de antecedentes y oposición (Llamamos antecedentes a los méritos científicos y académicos del postulante y prueba de oposición a la clase pública orientada a demostrar su destreza didáctica). En los concursos se evalúa a los profesores tanto por su desempeño docente como por su producción científica (por producción científica nos referimos a publicaciones con referato, presentaciones en congresos, edición de libros, dictado de conferencias y seminarios, etc.). Las designaciones son por tiempo limitado, aunque el cargo puede renovarse indefinidamente, pero siempre por concurso. Los profesores tienen una relación laboral de dedicación exclusiva con la Universidad y por la especificidad de su formación sólo pueden ejercer laboralmente en el ámbito educativo, es decir, no alternan la actividad docente con el ejercicio libre de la profesión. Por su conocimiento de la gestión educativa, son los profesores (a través del rector o decano) quienes presentan la gran mayoría de las iniciativas al Consejo. El claustro de profesores puede estar integrado únicamente por profesores, o por profesores y docentes auxiliares, como ocurre en algunas universidades nacionales. A los fines del trabajo, la distinción entre jerarquías docentes es irrelevante ya que ambas son corresponsables de la enseñanza y se hallan sujetas a evaluaciones periódicas de mérito académico. En otras palabras, ambas jerarquías integran el mismo grupo de interés.

Los graduados son profesionales libres y no tienen otro vínculo con la Universidad más allá del título profesional otorgado por ella. Esto significa que los graduados no mantienen vínculos de estudio o trabajo con la Universidad (aunque la omisión de estudios de postgrado pueda parecer poco realista, la realidad muestra que la proporción de graduados que siguen estudios de postgrado es baja). Los graduados enfrentan, además, un mercado laboral plenamente informado del prestigio académico *actual* de la Universidad, de modo que sus posibilidades laborales, su nivel remunerativo e incluso su prestigio profesional dependen directamente del prestigio de la Universidad. En el ámbito del Consejo, los graduados actúan en función de sus intereses de claustro e independientemente de la opinión de los profesores y los estudiantes. Este perfil de claustro es, en general, realista, incluso en aquellas universidades en que los docentes auxiliares son parte del claustro de graduados ya que su peso en el padrón del claustro suele ser reducido. No obstante, no descartamos la existencia de unidades académicas atípicas en las que nuestro perfil no sea representativo.

Los estudiantes asisten a la Universidad únicamente a tomar cursos en la temática de la carrera en que se inscribieron, es decir, excluimos otras motivaciones como las deportivas, de pertenencia a un cierto grupo social, o motivaciones políticas, por ejemplo. Los estudiantes no reciben estipendio alguno de la Universidad, ni mantienen con ella relaciones laborales de ningún tipo. La Universidad es libre de aranceles, o éstos son tan bajos que no representan un obstáculo para estudiar, y no existen otros impedimentos para el estudio (de infraestructura, disponibilidad de recursos tecnológicos, bibliográficos, etc.) que no sea la inasistencia a clase. Este supuesto podría reemplazarse por otro que asegure una amplia disponibilidad de becas de estudio. No existen tampoco limitantes debidas a la formación en etapas educativas previas debido a que operan mecanismos de selección de ingreso como el descrito por (Hernández, 2019). Por lo tanto, los estudiantes son alumnos altamente motivados y, en ausencia de otras limitantes, su desempeño académico depende directamente del esfuerzo pedagógico docente. Por “esfuerzo pedagógico docente” nos referimos a un conjunto de acciones orientadas a brindar una enseñanza de alta calidad, como redacción de material de estudio, preparación de trabajos prácticos y de clases teóricas, atención de

consultas fuera del horario de clases, redacción y corrección de exámenes, etc. Este conjunto de acciones, que es necesariamente multidimensional, puede resumirse en una variable latente mediante una construcción similar al “modelo formativo” de calidad de servicio de docencia de (Valdivieso, 2013). Al igual que los graduados, los estudiantes actúan en el Consejo según sus propios intereses, independientemente de la opinión de los otros claustros.

Omitimos de esta caracterización la representación del personal no docente, recientemente incorporado en los consejos directivos. Omitimos caracterizarla por dos razones: la primera, que el cuerpo no docente no reviste la categoría de “claustro” de acuerdo a los estatutos universitarios y, por lo tanto, no integra el núcleo fundacional de grupos de interés de la universidad reformista. La segunda, y quizá más importante, porque en muchos casos los representantes no docentes tienen voz, pero no voto en los consejos directivos, y aun teniendo derecho a voto prácticamente no intervienen en la discusión de cuestiones académicas como las que trataremos en el trabajo. Al igual que en el claustro de graduados, no descartamos que haya unidades académicas atípicas que desmientan esta afirmación.

En esta Universidad el único recurso relevante para el cumplimiento de sus objetivos es el recurso humano, ya que los recursos materiales no son limitantes. Aunque este supuesto parezca poco realista, en verdad, el 85% del presupuesto de la UBA, por ejemplo, corresponde a salarios y sólo el 15% a gastos de funcionamiento. La cantidad de profesores se determina exógenamente a la Universidad, por ejemplo, a través de un presupuesto aprobado en instancias superiores de gobierno como el Congreso Nacional. La cantidad de alumnos también se define exógenamente, por ejemplo, por motivaciones vocacionales o perspectivas laborales futuras y no puede ser alterada por iniciativa del Consejo Académico.

La Universidad descripta más arriba representa un esquema organizativo que en Argentina se conoce como de “universidad reformista”, en alusión a la Reforma Universitaria de 1918, o “universidad tradicional” en términos de (Nosiglia & Mulle, 2015). No discutiremos aquí hasta qué punto la Universidad actual continúa esta tradición, aunque en términos generales pareciera que este esquema ha perdurado más en Facultades de humanidades que en Facultades de ciencias naturales.

3. La función de utilidad del docente.

Consideremos ahora una función de utilidad individual compuesta por dos términos, uno que representa la utilidad obtenida por la producción científica, y otro que representa la utilidad obtenida por dedicación a la enseñanza. La suma ponderada de ambos términos constituye la utilidad total del docente. Esta utilidad podría interpretarse como un índice de mérito académico similar al utilizado para calificar postulantes en concursos docentes. Cada término del índice es el resultado de multiplicar el puntaje máximo previsto para cada tipo de actividad docente (enseñanza o investigación) por un factor, definido en el intervalo $[0; 1]$, que es función de la dedicación del docente a dicha actividad. Interpretado de este modo, el problema del docente consiste en optimizar la dedicación a cada tipo de actividad, de manera de alcanzar el máximo puntaje en el concurso. Expresado matemáticamente, la función de utilidad es:

$$U(x_1, x_2) = \theta_1 \frac{\ln x_1 + 1}{\ln 2} + \theta_2 x_2 \quad \text{s.a.} \quad x_1 + x_2 = 1, \quad 0 \leq x_1 \leq 1, \quad 0 \leq x_2 \leq 1, \quad (1)$$

donde x_1 es la fracción de tiempo dedicado a la investigación y x_2 es la fracción de tiempo dedicado a docencia, tanto presencial frente a alumnos como no presencial. Los ponderadores θ_1 y θ_2 son los puntajes máximos previstos en el reglamento de concursos para cada tipo de actividad y la constante $\text{cte.} = \ln 2$ es simplemente una constante de escala que normaliza la función entre 0 y 1. Nótese que bajo esta especificación la utilidad marginal de la investigación es decreciente,

pero la utilidad marginal de la enseñanza es constante. Luego, para optimizar esta función de utilidad, planteamos el lagrangeano:

$$L(x_1, x_2, \lambda) = \theta_1 \frac{\ln x_1 + 1}{\ln 2} + \theta_2 x_2 + \lambda(x_1 + x_2 - 1)$$

donde λ es un multiplicador de Lagrange. Las condiciones de primer orden son:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1^*} = \frac{\theta_1}{\ln 2} \frac{1}{x_1^* + 1} - \lambda^* = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial x_2^*} = \theta_2 + \lambda^* = 0, \quad y \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda^*} = x_1^* + x_2^* - 1 = 0,$$

y a partir de las mismas hallamos el punto crítico (x_1^*, x_2^*) , donde:

$$x_1^* = \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) - 1, \quad y \quad x_2^* = 2 - \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right). \quad (2)$$

La utilidad en este punto es:

$$U_{max} = \frac{\theta_1}{\ln 2} \ln \left[\frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) \right] + \theta_2 \left[2 - \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) \right]. \quad (3)$$

El punto (x_1^*, x_2^*) corresponde claramente a un máximo de la función $L(x_1^*, x_2^*, \lambda)$, ya que satisface las condiciones de segundo orden para un máximo:

$$\frac{\partial^2 L}{\partial x_1^2} = -\frac{\theta_1}{\ln 2} \frac{1}{(\ln x_1 + 1)^2} \leq 0, \quad \frac{\partial^2 L}{\partial x_2^2} = 0, \quad y \quad \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda^2} = 0$$

El resultado 2 sugiere, además, la siguiente cota (impuesta por las restricciones $x_1^*, x_2^* \in [0; 1]$) para el cociente de puntajes máximos:

$$\ln 2 \leq \frac{\theta_1}{\theta_2} \leq 2 \ln 2. \quad (4)$$

En este modelo, la asignación de tiempo para cada tipo de actividad queda totalmente a cargo del docente. No obstante, la Universidad podría (de hecho, en la práctica, lo hace) establecer dedicaciones mínimas para alguna de las actividades, normalmente la enseñanza. Si se estableciera una dedicación mínima para la enseñanza, llamémosla \tilde{x}_2 , la solución del problema de optimización sería una función partida, en la que las soluciones x_1^* y x_2^* serían las mismas en el tramo $x_2^* > \tilde{x}_2$, pero $x_2^* = \tilde{x}_2$ y $x_1^* = 1 - \tilde{x}_2$ si $x_2^* \leq \tilde{x}_2$ en el tramo $x_2^* \leq \tilde{x}_2$. La introducción de una dedicación mínima la docencia reduce la cota superior del cociente de puntajes máximos a

$$\ln 2 \leq \frac{\theta_1}{\theta_2} \leq (2 - \tilde{x}_2) \ln 2.$$

En este punto conviene hacer una breve digresión para analizar a la luz de la función de utilidad algunos comportamientos docentes observados en la práctica:

- (a) Si se relaja la restricción $x_1 + x_2 = 1$, es decir, si la dedicación laboral del docente es completamente flexible, el docente simplemente maximiza la función de utilidad:

$$U'(x_1, x_2) = \theta_1 \frac{\ln x_1 + 1}{\ln 2} + \theta_2 x_2 - (x_1 + x_2) \quad \text{s.a. } x_1 \geq 0, x_2 \geq 0.$$

En este contexto, si bien no se obliga al docente a distribuir toda su dedicación entre docencia e investigación, la dedicación a estas actividades reduce su tiempo libre operando $x_1 + x_2$ como un “costo”. La función $U'(x_1, x_2)$ será máxima en:

$$x_1^* = \frac{\theta_1}{\ln 2} - 1, \quad y \quad \theta_2^* = 1.$$

Es decir, la dedicación a la docencia x_2 es independiente del puntaje máximo asignado a este concepto y a la investigación, aunque θ_2 debe ser igual a la unidad para que exista una situación de optimalidad. Notemos, sin embargo, que la utilidad máxima en este caso es:

$$U'_{max} = \frac{\theta_1}{\ln 2} \ln \left(\frac{\theta_1}{\ln 2} \right) + \theta_2 x_2 - \left(\frac{\theta_1}{\ln 2} - 1 + x_2 \right).$$

o bien

$$U'_{max} = U_{max} + \frac{\theta_1 \ln \theta_2}{\ln 2} + (\theta_2 - 1)x_2 - 2\theta_2 + 1.$$

Esta última expresión pone de manifiesto la ambigüedad del relajamiento de la restricción $x_1 + x_2 = 1$ sobre la utilidad máxima, ya que U'_{max} será mayor o menor que U_{max} dependiendo de los valores que tomen θ_1 , θ_2 y x_2 .

- (b) Si la Universidad establece una dedicación mínima a la enseñanza (\tilde{x}_2) aunque el docente puede distribuir libremente su tiempo entre enseñanza e investigación una vez cumplida la dedicación mínima a la enseñanza, la solución para x_1 y x_2 es una función partida que vale:

$$x_2^* = \tilde{x}_2, \quad x_1^* = 1 - \tilde{x}_2 \quad \text{si} \quad \ln 2 \leq \frac{\theta_1}{\theta_2} \leq (2 - \tilde{x}_2) \ln 2$$

o bien, la solución (2) si:

$$(2 - \tilde{x}_2) \ln 2 \leq \frac{\theta_1}{\theta_2} \leq 2 \ln 2.$$

- (c) La relación de puntajes máximos cambia a lo largo de la carrera docente, por ejemplo, si los puntajes máximos en concursos de renovación fueran distintos a los de concursos para nuevos cargos. Para analizar este caso supongamos por simplicidad que el docente prevé concursar para acceder a un nuevo cargo y renovarlo una sola vez antes de jubilarse. En este caso, la función de utilidad actual es igual al valor presente de las utilidades futuras, es decir,

$$U(x_1, x_2) = U^I(x_1, x_2) + \delta U^{II}(x_1, x_2)$$

donde δ es un factor de descuento en el intervalo $(0; 1]$ indicativo del peso que el docente le asigna a las utilidades futuras, el supraíndice I se refiere al primer período y el supraíndice II al segundo período. Procediendo como en los puntos anteriores, las condiciones de primer orden son:

$$\frac{\partial U(x_1, x_2)}{\partial x_j} = \frac{\partial U^I(x_1, x_2)}{\partial x_j} + \delta \frac{\partial U^{II}(x_1, x_2)}{\partial x_j} = 0, \quad \text{para todo } j = \{1, 2\},$$

y la solución:

$$x_1^* = \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1^I + \delta \theta_1^{II}}{\theta_2^I + \delta \theta_2^{II}} \right) - 1, \quad y \quad x_2^* = 2 - \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1^I + \delta \theta_1^{II}}{\theta_2^I + \delta \theta_2^{II}} \right), \quad 0 < \delta \leq 1,$$

donde vemos que la solución óptima depende no sólo de la relación de puntajes futura, sino también del factor de descuento δ . Lógicamente, este factor será menor cuanto mayor sea el

plazo entre concursos. Si la relación de puntajes se mantuviera constante, las dedicaciones óptimas no cambiarían con el tiempo, independientemente de cuál sea el plazo entre llamados a concurso.

La solución intertemporal sugiere también que si un profesor tiene expectativa (o, mejor aún, una oferta concreta) de continuar enseñando después del retiro, reducirá gradualmente la dedicación a la investigación e incrementará la dedicación a la enseñanza. Formalmente, la dedicación óptima a lo largo del tiempo será:

$$x_1^*(t) = \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{1 + \sum_{i=1}^{t-1} \delta^i}{1 + \sum_{i=1}^{t+r} \delta^i} \right) \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) - 1, \quad y \quad x_2^*(t) = 2 - \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{1 + \sum_{i=1}^{t-1} \delta^i}{1 + \sum_{i=1}^{t+r} \delta^i} \right) \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right).$$

donde t es la cantidad de períodos hasta la jubilación y r es la cantidad de períodos de ejercicio docente posteriores a la jubilación. Aclaremos que t representa, en rigor, la cantidad de períodos entre concursos, por lo cual cuanto menor sea el período de designación, más suave será la curva de $x_2^*(t)$ en función de t . Por el contrario, cuánto mayor sea el período entre concursos, más escalonada será la curva de $x_2^*(t)$. De todos modos, el comportamiento de $x_2^*(t)$ dependerá fuertemente de las condiciones de contratación del profesora y de la tradición institucional respecto a la permanencia de los profesores pasada la edad de retiro. En situaciones normales, la oferta de permanencia se revela al final de la carrera docente, de modo que bien cabría esperar que durante la mayor parte de su vida laboral, el profesor fuera indiferente ante la posibilidad permanecer (asumiera que $r \approx 0$) y que recién al final de su carrera aumentara la dedicación a la enseñanza.

4. La función de costo político del Consejo Académico.

La composición del Consejo Académico requiere que toda resolución cuente con el apoyo de al menos un consejero graduado o estudiantil, o de al menos un profesor si hubiera acuerdo entre estudiantes y graduados. Es decir, que la gobernabilidad, y en última instancia la gobernanza, de la institución dependen completamente de un mínimo acuerdo entre claustros. En consecuencia, los consejeros profesores tienen la necesidad de conciliar los intereses de graduados y alumnos para gobernar la Universidad. Matemáticamente esto equivale a minimizar una función de distancia Δ entre la demanda de docencia de los estudiantes y la demanda de producción científica de los graduados. Esta función, a la que llamaremos $g(\Delta)$ o función de costo político es alguna función $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$ de la diferencia entre la dedicación total a la enseñanza y la dedicación total a la investigación sujeta a la condición de optimalidad de la utilidad docente, deducida más arriba. Justificaremos estas funciones más adelante. Formalmente, si no se imponen dedicaciones mínimas a la enseñanza, una forma sencilla para $g(\Delta)$ es:

$$g(\Delta) = \left[\sum_{i=1}^n x_2^* - \sum_{i=1}^n x_1^* \right]^2 = n^2 \left\{ \left[2 - \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) \right] - \left[\frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) - 1 \right] \right\}^2$$

según el criterio de mínimos cuadrados. En este caso, el problema de optimización es:

$$\min_{\theta_1/\theta_2} \left\{ n^2 \left[3 - \frac{2}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) \right]^2 \right\}$$

donde la relación entre puntajes máximos es la variable respecto de la que se optimiza la función de costo político ya que, como dijimos más arriba, consideramos esta relación contenida en el reglamento de provisión de cargos de profesor, el principal instrumento normativo del Consejo. Siguiendo el procedimiento usual de optimización, hallamos que $g(\Delta)$ es mínima en el punto:

$$\frac{\theta_1^*}{\theta_2^*} = \frac{3}{2} \ln 2 \approx 1,04.$$

La verificación de la condición de segundo orden revela que en este punto la función es, efectivamente, mínima ya que:

$$\frac{\partial^2 \Delta^2}{\partial (\theta_1/\theta_2)^2} = \frac{4n^2}{(\ln 2)^2} > 0.$$

La figura 1 muestra tres funciones de utilidad $U(x_1, x_2 | \theta_2 = 1)$ para $\theta_1 = \{0,85; 1,04; 1,15\}$ y superpuestas con éstas la función de utilidades máximas $U_{\max} = f(x_1^* x_2^*)$ y la función de costo político, $C = g(x_1^* x_2^*)$, en sus correspondientes escalas. Tanto U_{\max} como C son funciones de x_1^* y x_2^* que a su vez son función de la relación de puntajes θ_1/θ_2 . Esta relación se halla implícita en el gráfico porque omitimos agregar una escala adicional para facilitar la lectura. Se puede observar que en el punto $x_1 = x_2 = 0,5$ y $\theta_1/\theta_2 = 1,04$, la utilidad docente es máxima y el costo político del Consejo es mínimo, siendo éste el punto de máxima gobernabilidad institucional. En términos propios del Consejo, éste es el punto en el que los tres claustros alcanzan *consenso*. El resultado (5) tiene algunas implicancias que conviene destacar:

a. La relación óptima de puntajes es independiente de la cantidad de docentes n de la Universidad y, por transitividad, de las decisiones presupuestarias que se tomen en niveles superiores de gobierno. Incluso, si extendiéramos el modelo a dos períodos, en el que la cantidad de docentes del segundo período fuera distinta a la del primer período, la conclusión sería la misma. Formalmente, planteando:

$$\min_{\theta_1/\theta_2} \left\{ n_1^2 \left[3 - \frac{2}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) \right]^2 + n_2^2 \left[3 - \frac{2}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) \right]^2 \right\}$$

se aprecia fácilmente que n_1 y n_2 operan como constantes de proporcionalidad que se cancelan al plantear las condiciones de primer orden:

$$\frac{\partial}{\partial (\theta_1^*/\theta_2^*)} [g(\Delta_1) + g(\Delta_2)] = -2(n_1^2 + n_2^2) \left[3 - \frac{2}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1^*}{\theta_2^*} \right) \right] \left(\frac{2}{\ln 2} \right) = 0$$

b. La relación óptima de puntajes que surge del acuerdo entre claustros conduce a una distribución equitativa de la dedicación docente a la enseñanza y a la investigación, ya que reemplazando la relación óptima θ_1^*/θ_2^* en las soluciones individuales x_1^* y x_2^* resulta:

$$x_1^* = x_2^* = \frac{1}{2}$$

aun cuando la relación θ_1/θ_2 sea levemente favorable a la producción científica. Esta distribución de dedicaciones cambia si se ponderara cada tipo de actividad en la función de costo político con algún criterio arbitrario. En ese caso,

$$g(\Delta) = n^2 \left\{ w \left[2 - \frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) \right] - (1-w) \left[\frac{1}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) - 1 \right] \right\}^2,$$

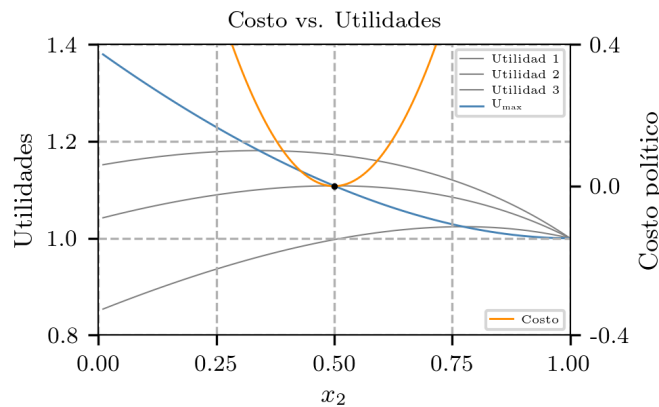
y la solución para el cociente de puntajes resulta:

$$\frac{\theta_1^*}{\theta_2^*} = (1 + w) \ln 2 \quad (6)$$

Esta expresión es claramente una extensión de la solución (5) y podría ser de utilidad para representar el caso de un Consejo en el que los graduados (o los estudiantes) tuvieran mayor representación que los estudiantes (o graduados), pero manteniendo en 50% la representación de profesores. Nótese que a medida que el factor de ponderación w aumenta, también debe aumentar la relación θ_1^*/θ_2^* para garantizar la gobernabilidad de la institución.

c. Las dedicaciones óptimas a la investigación y la docencia x_1^* y x_2^* respectivamente, son proporcionales a la constante de normalización $\text{cte.} = \ln 2$. Si se produjera un shock en la productividad científica, sin que el Consejo actualizara el reglamento de concursos, es decir, manteniendo constante la relación θ_1^*/θ_2^* , cabría esperar un shock en el mismo sentido en x_1^* y en sentido opuesto en x_2^* . Si, por el contrario, el consejo monitoreara permanentemente la productividad científica y ajustara la relación θ_1^*/θ_2^* proporcionalmente a la misma, las dedicaciones x_1^* y x_2^* se mantendrían constantes a lo largo del tiempo.

Figura 1. Dedicación a la enseñanza x_2 que garantiza el máximo mérito académico docente y el mínimo costo político en el Consejo.



Fuente: Elaboración propia.

d. Si se establece una dedicación mínima a la enseñanza, la relación de puntajes óptima sería función de ésta. En este caso la función a minimizar sería la función partida:

$$\min_{\theta_1/\theta_2} \left\{ n^2 \left[3 - \frac{2}{\ln 2} \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) \right]^2 ; n_2^2 \left[\tilde{x}_2 - \frac{\theta_1}{\ln 2} + 1 \right]^2 \right\}$$

Recordemos que al imponer $x_2 = \tilde{x}_2$, el puntaje para enseñanza resultaba $\theta_2 = 1$. Luego, si $x_2 = \tilde{x}_2$, la solución es:

$$\frac{\theta_1^*}{\theta_2^*} = (1 + \tilde{x}_2) \ln 2. \quad (7)$$

5. Conclusión.

El gobierno de las universidades nacionales puede representarse razonablemente a través de un modelo de *stakeholders* o grupos de interés llamados “claustros”. El claustro de profesores está constituido por la planta docente de la Universidad, cuya función es, no sólo impartir enseñanza, sino administrar la propia Universidad. En términos corporativos, los profesores constituyen tanto el staff, como la gerencia de una organización. Aclaremos que si bien recurrimos con frecuencia a términos propios de la bibliografía sobre gobierno de las organizaciones, ello no implica en modo alguno que equiparemos universidad pública con empresa como organizaciones equivalentes.

Los profesores enfrentan un mercado laboral reducido y altamente especializado, por lo que su principal interés es garantizar su continuidad laboral perpetuando la Universidad. El claustro de graduados reúne al conjunto de egresados de la Universidad, quienes pueden ser interpretados como tenedores de un título o bono que les proporciona una renta proporcional al prestigio *actual* de la Universidad y a los alcances profesionales del propio título. Para revalorizar permanentemente el título profesional, la Universidad debe generar nuevos conocimientos que la posicionen en los puestos más elevados de los *rankings* académicos y también que expandan el campo laboral de sus egresados. Los estudiantes (el tercer claustro) son los usuarios de la Universidad, interpretada como institución prestadora de un servicio educativo, y esperan recibir de ella una educación de buena calidad. Satisfaciendo las demandas de estudiantes y graduados, los profesores garantizan la gobernabilidad de la Universidad.

La Universidad de nuestro modelo está gobernada por un Consejo Académico que satisface las demandas de estudiantes y graduados mediante incentivos adecuados establecidos en el reglamento de provisión de cargos de profesor o mediante resoluciones explícitas sobre dedicaciones mínimas a la enseñanza. El reglamento de provisión de cargos es un instrumento complejo que opera sobre la dedicación a la enseñanza y la investigación principalmente a través de un esquema de puntajes máximos para cada una de estas actividades, y ciertas condiciones de renovación periódica de cátedras y plazos de designación. Nuestro estudio se focaliza en la relación de puntajes máximos, y concluye que existe una relación óptima de puntajes levemente superior a 1 (para la función de mérito académico utilizada) que garantiza el cumplimiento de los objetivos institucionales antes mencionados y por ende la gobernabilidad de la organización. Esta relación depende de la relación de representación de cada claustro en el Consejo, de la productividad científica, y de la existencia de dedicaciones mínimas a la enseñanza. Respecto a este último punto, nuestro modelo desestima la eficacia de las dedicaciones mínimas a la enseñanza como instrumento de promoción de la enseñanza, en primer lugar, porque es posible alcanzar la misma dedicación a la enseñanza simplemente ajustando de la relación de puntajes; en segundo lugar, porque las dedicaciones mínimas observadas en la práctica se hallan muy por debajo de la dedicación óptima x_2^* y, en tercer lugar, porque las dedicaciones mínimas por encima de x_2^* serían políticamente costosas en el ámbito del Consejo. Nótese, por ejemplo, que el costo político (fig.1) de aprobar una dedicación mínima de $\tilde{x}_2 = 0,75$ sería altísimo. El modelo muestra, además, que los shocks presupuestarios no afectan mayormente la gobernanza de la Universidad, ni las actividades científicas y docentes, sino simplemente el tamaño de la plantilla docente. La cantidad de alumnos tampoco afecta la gobernanza en este sencillo modelo.

La simplicidad del modelo no debería dejar la falsa impresión de que la única función del Consejo Académico de una universidad es ajustar periódicamente la relación de puntajes máximos en el reglamento de concursos docentes. Por el contrario, el Consejo tiene también la misión de garantizar las condiciones de gobernabilidad implícitas en el modelo, es decir, los llamados “supuestos” del modelo. Entre ellos, es crucial que el Consejo (a) procure que los intereses de profesores, graduados y estudiantes no se superpongan, por ejemplo mediante la aprobación de normas de incompatibilidad laboral, como la prevista en el art. 53 inc. d de la ley 24.521 de Educación Superior; (b) monitoree permanentemente tasa media de publicación docente, u otra variable proxy de la productividad científica, a fin de captar cambios en la función de producción, que como sabemos es inobservable; y (c) promueva evaluaciones externas de calidad institucional

para contar con medidas objetivas de calidad educativa y excelencia académica demandas por estudiantes y graduados, respectivamente.

Conviene advertir al lector sobre los peligros de interpretar al modelo como un modelo integral de gobierno universitario. El modelo no prevé, por ejemplo, cómo la gestión de recursos materiales, o la competencia con otras casas de estudio por la captación de alumnos, o por prestigio académico, influyen en el gobierno universitario. Esta omisión no necesariamente convierte al modelo en uno falso o defectuoso, sino que lo restringe al campo explicativo de aquellos aspectos del gobierno universitario que nos interesaron estudiar, básicamente el rol del reglamento de provisión de cargos de profesor en la gobernanza institucional.

Referencias

- Buchbinder, P. (2010). *Historia de las Universidades Argentinas*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Sudamericana.
- CONEAU (2007). *Guía de autoevaluación. Carreras de primera fase*. Resolución 1232/01. acreditación de carreras de grado de ingeniería. Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria. Recuperado de <http://www.coneau.gob.ar>.
- Consejo de Universidades (2015). *Régimen de Organización de Carreras, Otorgamiento de títulos y Expedición de Diplomas*. Recuperado de <http://portales.educacion.gov.ar/spu/normativa-emanada-por-el-cuerpo/>.
- Convención Constituyente (1994). *Constitución Nacional*. Sancionada en 1853 con las reformas de los años 1860, 1866, 1898, 1957 y 1994. Recuperado de <http://servicios.infoleg.gob.ar>.
- Coria, M. (2008). Eficiencia técnica de las universidades de gestión estatal en Argentina. *Documento de Trabajo, 27*. Pontificia Universidad Católica Argentina “Santa María de los Buenos Aires”. Facultad de Ciencias Sociales y Económicas, Departamento de Economía.
- CSJN (1996). Monges, Analía M. c/ Universidad de Buenos Aires. Fallo del 26 de diciembre de 1996. Corte Suprema de Justicia de la Nación.
- Delicio, F., Carboni, S., Maestromey, M., & Magnoler, G. (2001). *El problema del gobierno universitario y la elección directa de autoridades*. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina. II Coloquio Internacional de Gestión Universitaria en América del Sur.
- Fernández, N. (2002). *La Educación Superior en la Argentina*. Instituto Internacional para la Educación Superior en América Latina y el Caribe (IESALC/UNESCO) y Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la República Argentina. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001494/149464so.pdf>.
- García, H. (1995). *La autonomía de los municipios provinciales en la reforma constitucional de 1994*. Academia Nacional de Ciencias Morales y Políticas. Recuperado de <https://www.ancmyp.org.ar>.
- Halperin, T. (2002). *Historia de la Universidad de Buenos Aires*. Buenos Aires, Argentina: Eudeba.

- Hernández, P. (2019). Desempeño Académico y Curso de Iniciación Universitaria: Un Análisis de Regresiones Discontinuas. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 27, 207-234.
- Marquís, C. (2010). Sobre el Gobierno Universitario. *Gestión Universitaria*, 2(3). Recuperado de http://www.gestuniv.com.ar/gu_06/v2n3a2.htm
- Molina, M.S. (2014). La autonomía institucional y académica de las universidades nacionales. evolución conceptual en la legislación y jurisprudencia argentina. *Revista Iberoamericana de Educación Superior*, 5(13), 66-89.
- Nosiglia, M.C., & Mulle, V. (2009). Las Transformaciones en el Gobierno de las Universidades Argentinas: Análisis de casos. *Revista Argentina de Educación Superior*, 1(1),173-200.
- Nosiglia, M.C., & Mulle, V. (2015). El gobierno de las instituciones universitarias a partir de la Ley de Educación Superior 24.521: un análisis de los Estatutos Universitarios. *Revista Iberoamericana de Educación Superior*, 15(6), 72-89.
- Novelli, C. (2011). Reseña bibliográfica de: La autonomía universitaria: definiciones normativas y jurisprudenciales en clave histórica y actual. Academia. *Revista sobre enseñanza del Derecho*, 9(17), 261-274.
- Romera, M., & Puricelli, G. (1994). *Recuperando la voz. El movimiento estudiantil en los primeros años de la transición democrática*. Buenos Aires: Federación Universitaria de Buenos Aires.
- Unzué, M. (2012). Historia del origen de la Universidad de Buenos Aires (A propósito de su 190 aniversario). *Revista Iberoamericana de Educación Superior*, 8(3), 72-88.
- Valdivieso, C. (2013). Comparación de los modelos formativo, reflexivo y de antecedentes de evaluación estudiantil del servicio de docencia. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 16, 95-120.



Predicción del nivel de cosecha de camarón blanco: el caso de una pequeña camaronera en la parroquia Tenguel del cantón Guayaquil, Ecuador

CEVALLOS-VALDIVIEZO, HOLGER

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) *
Correo electrónico: holgceva@espol.edu.ec

RODRÍGUEZ-CRISTIANSEN, ARIANA

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Correo electrónico: aristrod@espol.edu.ec

VALDIVIEZO-VALENZUELA, PATRICIA*

Correo electrónico: pvaldi@espol.edu.ec

ARÉVALO-AVECILLAS, DANNY

Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (Ecuador)**
Correo electrónico: econ.darevalo@gmail.com

PADILLA-LOZANO, CARMEN**

Correo electrónico: carmen.padilla@ucsg.cu.edu.ec

RESUMEN

Actualmente el sector camaronero del Ecuador es uno de los sectores no petroleros con mayor proyección de crecimiento hacia el mercado internacional. A pesar del auge de este sector, la mayoría de los pequeños productores de camarón toman sus decisiones operativas en función del conocimiento empírico del negocio, sin considerar datos históricos ni ninguna herramienta científica como fundamento de sus decisiones. En este trabajo implementamos y comparamos técnicas de aprendizaje estadístico de vanguardia para la predicción del nivel de cosecha de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* de una pequeña camaronera ubicada en la parroquia Tenguel del cantón Guayaquil, Ecuador. Datos de 35 pescas que corresponden a 7 ciclos se usaron como datos. Luego se hicieron predicciones reales de cosecha para los dos siguientes ciclos. Las técnicas comparadas son: Regresión Lineal Múltiple (RLM) por mínimos cuadrados, Árbol de Regresión CART, Bosques Aleatorios, Regresión adaptativa multivariante por tramos (MARS) y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). MARS sin interacciones, el modelo de RLM aditivo con selección de predictores por Best Subset Selection y SVM con Núcleo lineal produjeron un menor error de predicción por Validación Cruzada. El buen rendimiento predictivo de estos métodos fue confirmado con buenos resultados de predicción real en los dos siguientes ciclos. El uso de técnicas estadísticas de vanguardia puede ser de gran ayuda para obtener predicciones confiables, y, por tanto, para mejorar los procesos operativos de las pequeñas camaroneras.

Palabras clave: predicción, cosecha, camarón blanco *Litopenaeus vannamei*, aprendizaje estadístico, validación cruzada, MARS.

Clasificación JEL: C53; M11; Q22.

MSC2010: 62P20; 62G08; 62J07; 62J20.

Artículo recibido el 12 de diciembre de 2018 y aceptado el 2 de octubre de 2019.

Prediction of white shrimp harvest: the case of a small shrimp farm in Tenguel, Guayaquil-Ecuador

ABSTRACT

Shrimp sector in Ecuador is nowadays one of the fastest-growing non-oil sectors towards the international market. In despite of this growth, to our knowledge most of the little producers of shrimps in Ecuador take important operational decisions based upon empirical knowledge, without considering historical data nor any scientific tool. In this work we implement and compare state-of-the-art statistical learning techniques for the prediction of shrimp harvest (in pounds) for a little shrimp farm located in Tenguel, Guayaquil-Ecuador. For this study we used historical information collected by the farm biologist. The data was organized and put into a digital format by the authors. Data from $n=35$ past harvests, corresponding to 7 cycles of production, were used to train the models. We then made predictions of shrimp harvest for the next two production cycles. We compare Multiple Linear Regression by means of ordinary least squares, CART Regression Tree, Random Forests, Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) and Support Vector Machines (SVM). In our analysis, MARS with no interaction terms allowed, Linear Regression with best subset variable selection and SVM with linear Kernel gave the lowest prediction error estimate by Cross Validation. Their good predictive performance was confirmed with good predictions on the next two production cycles. The use of statistical techniques can be of great help to improve predictions and therefore operational processes of small shrimp farms.

Keywords: prediction, harvest, white shrimp *Litopenaeus vannamei*, statistical learning, cross-validation, MARS.

JEL classification: C53; M11; Q22.

MSC2010: 62P20; 62G08; 62J07; 62J20.



1. Introducción.

El sector acuícola en el Ecuador registra su comienzo a finales de los años sesenta con la explotación de salitrales y pampas. En la década de 1980 el camarón ecuatoriano vio su pico más alto desde su comienzo con un crecimiento del 600% de sus hectáreas cultivadas en comparación con la década anterior, pasando a ser considerado en el ranking mundial como el exportador número uno en el año de 1987 (Alvarado-Espinoza, 2016). Para la siguiente década, el sector había obtenido tal desarrollo que ya registraba una producción total de 250 millones de libras (Santillán-Lara, 2018). Sin embargo, a finales de la década de los 90 se registró un declive de dicho sector debido a ciertos factores exógenos, tales como: enfermedades como el síndrome de Taura y la Mancha Blanca, el fenómeno del Niño y la crisis económica del año 1999. Según los datos de la Cámara Nacional de Acuicultura, desde el año 2010 los precios del producto se han doblado, incentivando así su producción y su exportación. El camarón ecuatoriano actualmente representa el 50% de la producción latinoamericana. El Ecuador es el segundo exportador mundial de camarón, superado solamente por India (FAO, 2018). Es uno de los sectores no petroleros con mayor proyección de crecimiento hacia el mercado internacional y la industria no petrolera más tecnificada en el país.

A pesar del auge de este sector, en nuestro conocimiento la mayoría de los pequeños productores de camarón toman sus decisiones operativas teniendo en cuenta el conocimiento empírico del negocio, sin considerar datos históricos ni ninguna herramienta científica como fundamento de sus decisiones. Por ejemplo, los productores de camarón desearían predecir con cierta precisión el nivel de cosecha de camarón antes de realizar la pesca. Esto les permitiría proyectar sus ingresos y planificar de manera efectiva sus operaciones y futuras inversiones. En este contexto, los métodos estadísticos reducen la incertidumbre y ayudan a obtener una mejor predicción del nivel de cosecha en comparación con predicciones empíricas. El desarrollo de plataformas computacionales permite hoy en día la fácil implementación de técnicas complejas de aprendizaje estadístico que reducen considerablemente el error de predicción en comparación con métodos estadísticos tradicionales. Estas técnicas de aprendizaje estadístico son además apropiadas para problemas con datos con muchas variables y/u observaciones, en donde han mostrado muy buenos resultados predictivos. Por ejemplo, García et al. (2007) realizó la predicción del nivel de cosecha de camarón blanco usando redes neuronales artificiales de tipo alimentación hacia adelante (feed-forward) en datos de series de tiempo en el período 1986-2004 recogidos en Charleston Harbor (Carolina del Sur, EEUU). En el modelo, los autores usaron captura por unidad de esfuerzo (CPUE), número de embarcaderos de pesca comercial estatal, salinidad y temperatura como variables explicativas del nivel de cosecha del próximo mes ($t + 1$) y de tres meses después ($t + 3$). García et al. (2007) obtuvieron una precisión de predicción de hasta el 92% para el caso ($t + 1$) y hasta del 79% para el caso ($t + 3$). Sujjaviriyasup & Pitiruek (2013) compararon técnicas de aprendizaje estadístico para la predicción del nivel de cosecha de camarón blanco en datos de Tailandia en el período entre enero de 2007 y diciembre de 2012. Las siguientes técnicas fueron comparadas: ARIMA (Box & Jenkins, 2015), modelo Holt-Winters (Kalekar, 2004) y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM por sus siglas en inglés) (Boser et al., 1992; Cortes & Vapnik, 1995; Drucker et al., 1997). En la comparación se encontró que SVM obtuvo las predicciones más precisas para este problema. Drews-Jr. et al. (2014) presentaron una nueva metodología basada en técnicas para el aprendizaje estadístico para predecir el nivel de cosecha del camarón rosado en datos del estuario de la Laguna de los Patos del estado de Río Grande del Sur (Brasil). Los datos fueron obtenidos a través de agencias gubernamentales. Los autores discretizaron la variable del nivel de cosecha y estudiaron un problema de clasificación. La nueva metodología consistía en formar una técnica de meta aprendizaje (Breiman, 1996; Vilalta & Drissi, 2002; Kuncheva, 2014) que combinaba SVM, árboles de decisión (Holte, 1993; Göndör & Bresfelean, 2012) y técnicas de aprendizaje de reglas (Cohen, 1960; Kohavi, 1995). Los autores obtuvieron una precisión de predicción de hasta el 91% con su metodología. Por otro lado, Grant et al. (1988) propuso un modelo basado en cadenas de Markov para predecir la cosecha anual de camarones en el Golfo de México. Los datos se

construyeron usando simulaciones y estaban compuestos por atributos relacionados al volumen de captura, área de pesca, profundidades y mortalidad natural y por pesca.

En este trabajo implementamos y comparamos técnicas de aprendizaje estadístico de vanguardia para la predicción del nivel de cosecha de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* (en libras) de una pequeña camaronera ubicada en la parroquia Tenguel del cantón Guayaquil, Ecuador. Se usaron datos recopilados desde la creación de la camaronera en el mes de noviembre de 2015. En este estudio se plantea un problema de regresión. Las técnicas comparadas son: Regresión Lineal Múltiple (RLM) por medio de mínimos cuadrados (Seal, 1967; Stigler, 1981), Árbol de Regresión CART (Breiman et al., 1984), Bosques Aleatorios o Random Forests (Breiman, 2001), Regresión adaptativa multivariante por tramos o MARS (Friedman, 1991) y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). En nuestro conocimiento, no existen trabajos académicos hechos en el Ecuador en donde se compare rendimientos de predicción de metodologías de aprendizaje estadístico con datos locales de cosecha de camarón. Una segunda contribución de este trabajo es la identificación/selección de variables determinantes de la producción de camarón blanco. El modelo de Regresión Lineal Múltiple permite identificar variables predictoras significativas con un modelo aditivo, mientras que CART identifica variables importantes durante su construcción. La técnica de la Selección del Mejor Subconjunto o Best Subset Selection (Beale et al., 1967; Hocking & Leslie, 1967; Furnival & Wilson, 1974) permite seleccionar variables predictoras importantes para el modelo de Regresión Lineal Múltiple. Entre las técnicas consideradas, MARS es la única técnica que hace selección de variables de manera automática durante su construcción.

El resto del manuscrito está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se describe la infraestructura de la camaronera, así como los procedimientos y actividades para la producción de camarón blanco en este negocio. También se explica el origen de los datos utilizados en este estudio y se da una breve explicación de las variables consideradas. En la Sección 3 se define el error de predicción teórico y se explica el procedimiento de Validación Cruzada (Lachenbruch & Mickey, 1968; Geisser, 1993) para estimar este error en el contexto de un problema de regresión. Los métodos de predicción usados en nuestro problema de regresión son explicados ampliamente en la Sección 4. La Sección 5 muestra los resultados de predicción de cada uno de los métodos implementados en base a la estimación del error por Validación Cruzada y en base a predicciones en datos futuros. Se incluye una discusión sobre los resultados de los métodos usando la descomposición del error teórico en sesgo al cuadrado, varianza y ruido. Además, se indican las variables identificadas como importantes por RLM y CART, así como las variables seleccionadas por Best Subset Selection y MARS como las más importantes para predecir el nivel de cosecha de camarón blanco. Finalmente, la Sección 6 presenta las conclusiones de este trabajo.

2. Datos.

Para la realización de este estudio se consideró la producción de 5 estanques de cultivo semi intensivo de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* de la camaronera en estudio. Se procedió a estudiar 7 ciclos de producción de cada una de las piscinas. Estos ciclos abarcan el período comprendido entre el mes de noviembre de 2015 hasta el mes de abril de 2018. Se realizaron luego predicciones del nivel de cosecha de camarón en los dos ciclos siguientes, que corresponden al período entre mayo-agosto de 2018 y septiembre-diciembre de 2018, respectivamente.

La infraestructura de las piscinas corresponde a estanques rústicos con suelo de arcilla-arena que poseen sobre la superficie muros de contención perimetrales y divisorios con una altura aproximada de 2.50 metros. El tamaño de los estanques varía, siendo el más pequeño de 5.8 hectáreas y el más grande de 15 hectáreas. El agua usada proviene de la estación de bombeo, que trabaja con motores estacionarios y bombas de flujo axial que llevan el agua del canal hacia el reservorio y las piscinas de manera independiente por compuertas de paso de agua que por lo

general son abiertas en las noches. La salinidad del agua varía de acuerdo a la estación del año, en verano puede llegar a 20 partes por mil, mientras que en invierno a 10 partes por mil. En esta camaronera anualmente se establecen 3 ciclos de cultivo que duran en promedio 106 días cada una. En este período de tiempo se obtienen tallas de camarones promedio de 18 gramos. No existe aireación mecánica, sin embargo, se tratan de mantener los niveles óptimos de oxígeno a través del recambio de agua y del control del alimento artificial. Se utilizan fertilizantes inorgánicos y alimento artificial (balanceado de 35% de proteína) de acuerdo al tamaño del camarón. El alimento es suministrado en tres raciones diarias mediante el método del boleó, que consiste en que dos personas distribuyan ampliamente el alimento sobre el estanque empleando una canoa para una mejor movilización. La cantidad de alimento se ajusta dependiendo de los niveles de oxígeno en el agua y la revisión de la alimentación en el estanque. En los siguientes casos se suspende la alimentación en las piscinas o se disminuye la dosis suministrada de balanceado: cuando el resultado de tomar el oxígeno disuelto en la piscina a las 4:00 am es inferior a 3 mg/l, o, cuando se observan restos de balanceado en la piscina correspondientes a la dosis anterior. Si no se observa alimento restante de la dosis anterior en la piscina durante 3 días consecutivos, se aumenta el 10% de la dosis de balanceado.

Para este estudio se utilizó la información histórica recopilada por el biólogo de la camaronera. Esta información se recopiló desde el inicio de las operaciones de la camaronera en noviembre de 2015. La información fue organizada y luego digitalizada para su análisis por los autores del presente estudio. Se estudiaron datos de $n = 35$ pescas en los 5 estanques (piscinas), que corresponden a 7 ciclos o corridas. Luego se hicieron predicciones de cosecha en los dos siguientes ciclos, para cada uno de los 5 estanques. La variable de respuesta del nivel de cosecha la medimos a través del número total de libras de camarón producidas. A partir de entrevistas a expertos e investigación exploratoria se escogieron las variables que podrían tener un efecto en nuestra variable de respuesta. Todas las variables predictoras consideradas son cuantitativas. A continuación, enlistamos y describimos las variables predictoras del nivel de cosecha consideradas en este estudio:

- **Hectáreas (HAS):** número de hectáreas que comprende el área de cada una de las piscinas.
- **Cantidad sembrada:** número de larvas que fueron depositadas en cada una de las piscinas.
- **Peso (en gramos):** peso promedio en gramos de una muestra tomada en una piscina un día antes de la pesca.
- **Días de cultivo:** número total de días que comprenden el ciclo de cultivo. Se lo obtiene con la siguiente ecuación:

$$\text{Días de cultivo} = \text{fecha de pesca} - \text{fecha de siembra}$$

- **Supervivencia estimada (en porcentaje):** es la estimación de la supervivencia final de los camarones según la tabla propuesta por la compañía proveedora de balanceado de la camaronera bajo estudio (Tabla 1). Esta tabla utiliza como entrada una estimación empírica del nivel de mortalidad del camarón durante el período del ciclo de cultivo.

Tabla 1. Tabla de supervivencia estimada.

Nº. Días	Nº. Semanas	SUPERVIVENCIA
7	1	96%
14	2	91%
21	3	87%
28	4	82%
35	5	79%
42	6	75%
49	7	72%
56	8	69%
63	9	66%
70	10	62%
77	11	59%
84	12	56%
91	13	53%
98	14	50%
105	15	46%
112	16	43%
119	17	40%

Fuente: Compañía proveedora de balanceado de la camaronera bajo estudio.

- **Total de alimento consumido (libras):** cantidad de alimento artificial (balanceado) suministrado a los camarones durante el ciclo de producción expresado en libras.
- **Oxígeno disuelto promedio del estanque (mg/l):** oxígeno disuelto promedio del estanque (en mg/l) durante el ciclo de cosecha en cada una de las piscinas. Este parámetro es tomado diariamente por uno de los empleados a las 4:00 am. Su concentración debe ser la adecuada para asegurar un entorno saludable en el ciclo de la cosecha. Según Nicovita (1997), los niveles críticos de oxígeno disuelto en el agua del estanque que están relacionados directamente con el bienestar o salud del camarón son: desde 0 - 1.0 mg/l, letal; 1 - 1.5 mg/l., letal con exposición prolongada; 1.7 - 3.0 mg/l., pobre conversión alimenticia, crecimiento lento, disminución de la resistencia a las enfermedades si continúan expuestos.
- **Temperatura promedio del estanque (grados Celsius):** temperatura promedio del estanque en grados Celsius durante el ciclo de cosecha en cada una de las piscinas. Este parámetro es tomado diariamente por uno de los empleados a las 4:00 am. La temperatura del estanque influye en el crecimiento y desarrollo del camarón. *Litopenaeus vannamei* tiene un rango óptimo de temperatura que va de 25°C a 30°C, el cual es considerado adecuado para su cultivo. Sin embargo, si la temperatura cae por debajo de 25°C o sube por encima de 30°C la temperatura es estresante para el camarón, afectando su consumo de alimento en un 30%-50%, ya sea disminuyéndolo o aumentándolo. En estas circunstancias tampoco es aprovechado el alimento eficientemente en el crecimiento en peso (i.e. para convertirlo en músculo) (Nicovita, 1997).

La Tabla 6 de la Sección de Anexos nos muestra la tabla completa de datos recogidos y organizados para la camaronera bajo estudio.

3. El error de predicción y su estimación.

Antes de explicar la metodología que se usará para realizar la predicción del nivel de cosecha de camarón blanco, definiremos al error de predicción y explicaremos dos estimadores del error de predicción. Los estimadores del error se usan en aplicaciones prácticas para comparar la capacidad predictiva de técnicas de aprendizaje estadístico.

Los datos de la muestra en donde se ajustan los métodos de predicción se les denomina datos de entrenamiento. La calidad predictiva de un método de predicción debe de ser evaluada en datos de prueba independientes que provienen de la misma población que la muestra de entrenamiento. Esto corresponde con lo que sucede en aplicaciones prácticas en donde se hacen predicciones en datos futuros independientes a los usados para construir el método de predicción. Sea Y la variable de respuesta, $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$ el vector de variables predictoras y $\hat{f}(X)$ el modelo de predicción que ha sido estimado en los datos de entrenamiento. La función de pérdida que mide los errores entre Y y $\hat{f}(X)$ la denotamos como $L(Y, \hat{f}(X))$. Una opción típica para la función de pérdida en el contexto de regresión es la función de pérdida de errores cuadráticos (Hastie et al., 2001):

$$L(Y, \hat{f}(X)) = (Y - \hat{f}(X))^2$$

Con la función de pérdida de errores cuadráticos definimos al error de predicción como:

$$\text{Err} = E \left[L \left(Y, \hat{f}(X) \right) \right] = E \left[(Y - \hat{f}(X))^2 \right].$$

En la práctica no es posible obtener el error de predicción ya que sólo se cuenta con una muestra de la población. Un procedimiento estándar para estimar Err es el de dividir de forma aleatoria los datos muestrales en datos de entrenamiento y datos de prueba (McLachlan, 1992). Una opción muy común es usar la regla de 80% para datos de entrenamiento y 20% para datos de prueba. Sin embargo, para nuestro estudio de predicción del nivel de cosecha de camarón en donde tenemos $n = 35$ pescas, con 28 observaciones para entrenar el método y 7 para evaluar su capacidad predictiva tendríamos una estimación muy imprecisa y con mucho sesgo del error de predicción Err. En muestras pequeñas como la de nuestro estudio, la técnica de Validación Cruzada puede obtener una estimación más estable del error de predicción (Molinero et al., 2005; Green & Ohlsson, 2007).

Validación Cruzada (CV)

La Validación Cruzada es una técnica para estimar el error de predicción (Lachenbruch & Mickey, 1968; Geisser, 1993). El arte de la Validación Cruzada radica en que el analista sólo utiliza los datos de la muestra para obtener una estimación del error de predicción. Es decir, CV no requiere que el analista disponga de datos de prueba adicionales.

Específicamente, CV divide de manera aleatoria los datos de la muestra en P partes aproximadamente iguales. Luego, un subconjunto de $P - 1$ partes es usado para entrenar el modelo y la parte restante es usada para evaluar el modelo construido, simulando así una evaluación del modelo usando datos de prueba. Este proceso continúa hasta que todos los subconjuntos de $P - 1$ partes hayan sido usados para entrenar y la parte restante para evaluar. Al final, tendremos P estimaciones del error, que se combinan para obtener una estimación final.

Formalmente, sea $\kappa: (1, \dots, n) \mapsto \{1, \dots, P\}$ una función de indexación que indica la partición a la cual la i -ésima observación es designada por la aleatorización. Denotamos por $\hat{f}^{-p}(x)$ la función ajustada, obtenida sin la p -ésima parte de los datos ($p = 1, \dots, P$). Entonces la estimación del error por Validación Cruzada se define como:

$$CV_{error}(\hat{f}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{f}^{-p(i)}(x_i))^2 \quad (1)$$

Los valores más comunes para P son $P = 5$, $P = 10$ y $P = n$. A esta última opción se la conoce también como Validación Cruzada dejando uno fuera o *leave-one-out cross-validation* (LOOCV).

Descomposición del error de predicción

Es posible descomponer el error de predicción teórico en términos del sesgo, varianza y ruido irreducible. Asumiendo que $Y = f(X) + \varepsilon$, en donde $E[\varepsilon] = 0$ y $Var(\varepsilon) = \sigma_\varepsilon^2$, Geman et al. (1992) muestra que el error de predicción de una técnica de regresión ajustada $\hat{f}(X)$ en un punto $X = x_0$, usando la función de pérdida de errores cuadráticos, se descompone de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Err}(x_0) &= E \left[\left(Y - \hat{f}(x_0) \right)^2 \mid X = x_0 \right] \\ &= \sigma_\varepsilon^2 + \left[E\hat{f}(x_0) - f(x_0) \right]^2 + E[\hat{f}(x_0) - E\hat{f}(x_0)]^2 \end{aligned}$$

El primer término representa el ruido irreducible de Y alrededor de su verdadera media $f(x_0)$. El segundo término representa el sesgo al cuadrado de $\hat{f}(x_0)$, mientras que el tercer término representa la varianza de predicción de $\hat{f}(x_0)$. Típicamente, mientras más complejo o flexible sea el modelo \hat{f} construido, más pequeño será el sesgo pero más alta será la varianza. Para minimizar el error de predicción necesitamos un método de aprendizaje que logre una compensación óptima entre sesgo y varianza.

4. Metodología.

Para efectuar la predicción del nivel de cosecha de camarón se ajustarán los siguientes métodos:

4.1. Modelo de Regresión Lineal Múltiple (con errores normales).

Utiliza un modelo lineal en los parámetros para predecir una variable de respuesta cuantitativa (Y) en base a una o varias variables predictoras (X) cuantitativas o cualitativas. El modelo de Regresión Lineal Múltiple con errores normales se define de la siguiente manera:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \dots + \beta_k x_{i,k} + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$\varepsilon_i \sim \text{iid} N(0, \sigma^2)$$

donde Y es la variable dependiente que se quiere predecir, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ son $k + 1$ parámetros desconocidos del modelo que representan al intercepto y a las pendientes respectivamente, x_1, x_2, \dots, x_k son constantes que representan a las variables predictoras o covariables, mientras que ε representa al término del error que contiene los otros factores distintos de x_1, x_2, \dots, x_k que afectan a Y . El subíndice i se refiere a la i -ésima observación y n es el número de observaciones. En el modelo de Regresión Lineal Múltiple con errores normales se asume que los errores ε_i son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas normales, con media cero y varianza σ^2 constante (i.e. varianza constante para cualquier nivel de las variables predictoras). Esto implica además que Y_i es una variable aleatoria normal:

$$Y_i \sim N(\beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \dots + \beta_k x_{i,k}, \sigma^2)$$

Con el fin de obtener un modelo parsimonioso y estable para hacer predicciones, en este estudio consideramos el modelo de regresión lineal de primer orden (i.e. lineal en los predictores) mostrado en la ecuación (2).

Estimación por Mínimos Cuadrados

En este estudio estimamos los parámetros del modelo en (2) usando mínimos cuadrados (Seal, 1967; Stigler, 1981). Sean $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$ los estimadores por mínimos cuadrados de los parámetros del modelo en (2). Usando los datos disponibles, obtenemos estimaciones de estos estimadores b_0, b_1, \dots, b_k . Los valores ajustados o predicciones del modelo de acuerdo a las estimaciones por mínimos cuadrados se obtienen de la siguiente manera:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k, \quad (3)$$

El método de mínimos cuadrados estima la función de regresión del modelo minimizando la suma cuadrática de los residuos. En otras palabras, las estimaciones b_0, b_1, \dots, b_k en (3) se obtienen de manera simultánea minimizando la suma cuadrática de los residuos con respecto a $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{i,1} - \dots - \beta_k x_{i,k})^2 \quad (4)$$

Podemos expresar la solución de mínimos cuadrados en forma matricial. Para aquello, primero definimos las siguientes matrices:

$$\mathbf{Y}_{(n \times 1)} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{X}_{(n \times (k+1))} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1,k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{n,k} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\beta}_{((k+1) \times 1)} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{(n \times 1)} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

de tal forma que podemos expresar el modelo en (2) de forma matricial:

$$\mathbf{Y}_{(n \times 1)} = \mathbf{X}_{(n \times (k+1))} \boldsymbol{\beta}_{((k+1) \times 1)} + \boldsymbol{\varepsilon}_{(n \times 1)}$$

en donde:

- \mathbf{Y} es un vector aleatorio de respuestas
- $\boldsymbol{\beta}$ es un vector de parámetros
- \mathbf{X} es una matriz de constantes
- $\boldsymbol{\varepsilon}$ es un vector de variables aleatorias normales independientes con valor esperado $\mathbf{E}[\boldsymbol{\varepsilon}] = \mathbf{0}$ y matriz de varianzas y covarianzas:

$$\sigma^2[\boldsymbol{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^2 \end{bmatrix} = \sigma^2 \mathbf{I}.$$

Denotamos al vector aleatorio con los estimadores por mínimos cuadrados $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$ como \mathbf{B} :

$$\mathbf{B}_{((k+1) \times 1)} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix}$$

Entonces, los estimadores por mínimos cuadrados se definen de la siguiente forma:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^t \mathbf{Y}$$

Procedimientos inferenciales tales como intervalos de confianza y pruebas de hipótesis pueden llevarse a cabo para los componentes de $\boldsymbol{\beta}$ y para σ^2 . Detalles técnicos sobre estos procedimientos pueden encontrarse en Hastie et al. (2001) y Kutner et al. (2004), por ejemplo. Note que el supuesto de la media cero de los errores $E[\boldsymbol{\varepsilon}] = \mathbf{0}$ garantiza la insesgadez de los estimadores por mínimos cuadrados, mientras que el supuesto de varianza constante σ^2 (homocedasticidad) garantiza que los estimadores por mínimos cuadrados tengan la mínima varianza de entre todos los estimadores lineales insesgados (David & Neyman, 1938; Plackett 1949). Sin embargo, la precisión de los estimadores por mínimos cuadrados puede disminuir ante el problema de multicolinealidad (Salmerón-Gómez & Rodríguez-Martínez, 2017) o ante la inclusión de predictores innecesarios, lo que afecta también la calidad predictiva del modelo (Mundfrom et al., 2018). En varias aplicaciones, es posible mejorar la predicción haciendo una selección de predictores importantes. Al hacer esto sacrificamos un poco de sesgo para reducir la varianza de predicción y, por tanto, podríamos también reducir el error de predicción (Tibshirani, 1996; Hastie et al., 2001).

Selección de variables predictoras por el Mejor Subconjunto (Best Subset Selection)

Best Subset Selection es una técnica muy popular para hacer selección de predictores importantes en el modelo de regresión lineal. La selección por el Mejor Subconjunto encuentra para cada $s \in \{0, 1, \dots, k\}$, el subconjunto de tamaño s con la menor suma cuadrática de sus residuos en (4). El problema de obtener un tamaño óptimo s implica compensación entre sesgo y varianza (Hastie et al., 2001). Además, frecuentemente se desea ajustar un modelo pequeño que sea fácil de interpretar. Típicamente, se escoge el modelo con el menor número de predictores que minimice un estimador del error de predicción (p. ej. Validación Cruzada, ver Sección 3).

Evaluación de los supuestos del Modelo de Regresión Lineal Múltiple

El modelo que se define en (2) implica los supuestos de linealidad ($E[\boldsymbol{\varepsilon}] = \mathbf{0}$), varianza constante σ^2 y normalidad e independencia de los errores ε_i ($i = 1, \dots, n$). Los procedimientos usuales para construir intervalos de confianza y pruebas de hipótesis sobre los parámetros β_j ($j = 0, 1, \dots, k$) y σ^2 se desarrollan bajo estos supuestos y, por tanto, la validez de estos procedimientos inferenciales se basan en la validez de estos supuestos. El no cumplimiento de estos supuestos puede afectar también la calidad predictiva del modelo de RLM (Kutner et al., 2004). En este trabajo evaluamos los supuestos usando procedimientos estándar. Para evaluar el supuesto de linealidad se usó el gráfico de residuos versus valores ajustados, para el de homocedasticidad se usó un gráfico de residuos cuadráticos versus valores ajustados, para el supuesto de normalidad de los errores se usó el gráfico cuantil-cuantil de los residuos y para evaluar el supuesto de errores independientes se usó el gráfico de la función de autocorrelación estimada (Cook & Weisberg, 1982; Atkinson, 1985; Cook 1998). Se realizó también la prueba global para los cuatro supuestos desarrollada por Peña & Slate (2006), que controla la probabilidad de error Tipo I (que se incrementaría al combinar pruebas para cada uno de los supuestos) y que puede ser usada para detectar la violación de al menos un supuesto. Otro problema común al ajustar un modelo de

regresión lineal múltiple es el de multicolinealidad. Para detectar la presencia de multicolinealidad en nuestro problema usamos el Factor de Inflación de Varianza (VIF por sus siglas en inglés) para cada variable predictora. El VIF refleja el grado al cual la varianza muestral de los $\hat{\beta}_j$ ($j = 1, \dots, k$) se incrementa como consecuencia de correlaciones entre las variables predictoras (Marquardt, 1970; Theil, 1971; Fox, 1984). Cuando las variables predictoras no están linealmente correlacionadas, entonces en cada variable el VIF alcanza su valor mínimo de 1. Cuando existen correlaciones el VIF en cada variable es mayor que 1, alcanzando una cantidad sin límite para una variable cuando esta posee una asociación lineal perfecta con las otras variables predictoras en el modelo.

4.2. Métodos Basados en Árboles.

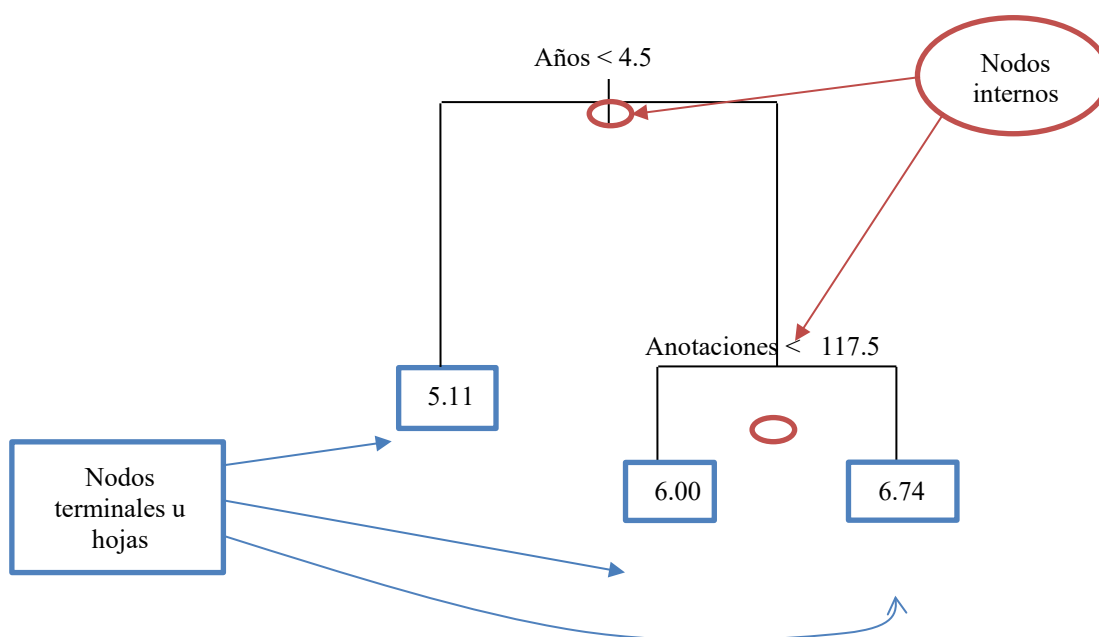
4.2.1. Árbol de Regresión (CART)

Construye un modelo no lineal (Breiman et al., 1984). CART realiza particiones binarias recursivas dentro del espacio predictor, de tal manera que las particiones resultantes sean lo más homogéneas posibles en el sentido que minimizan la suma cuadrática de los residuos en cada paso. En cada región CART estima el valor esperado condicional de Y tomando la media de los valores de Y correspondientes a las observaciones dentro de la región. El proceso de optimización para encontrar una partición es sobre todas las variables predictoras X_1, \dots, X_k y sobre todos los puntos posibles t_k de cada variable. Las particiones binarias son representadas en forma de un árbol. La Ilustración 1 nos muestra tal representación para los datos “Hitters”. Este conjunto de datos contiene marcas y salarios de jugadores de béisbol de la Liga Mayor de EEUU y fueron usados en James et al. (2014). El objetivo de estudio es predecir el salario de un jugador de béisbol teniendo en cuenta sus marcas de juego alcanzadas.

Como observamos en la Figura 1, la partición de cada nodo interno es determinada por una variable predictora X_j y un punto en esta variable t_j . La partición se la efectúa de la siguiente manera: las observaciones que cumplen con la condición $X_j < t_j$ son enviadas al lado izquierdo del nodo mientras que aquellas que no la cumplen son enviadas al lado derecho. Para nuestro ejemplo con los datos “Hitters”, la primera partición se la realiza con la variable predictora “Años” y su valor 4.5. Las observaciones que cumplen con esta condición son enviadas a la región del lado izquierdo y aquellas que no cumplen son enviadas a la región del lado derecho. Hemos entonces formado dos nuevas regiones o nodos. CART buscará nuevamente en estas regiones hacer una partición. En la región resultante del lado derecho se hace una partición usando la variable “Anotaciones” y su valor 117.5. Mientras que en la región del lado izquierdo no se hace más particiones. ¿Hasta cuándo CART realiza particiones? Un criterio muy estándar es el de hacer crecer el árbol hasta que haya un número mínimo de observaciones en cada nodo o hasta que quede una sola observación en el nodo.

Al hacer predicciones con un árbol muy grande corremos el riesgo de que el modelo se sobreajuste a las observaciones usadas para construirlo y que, por tanto, obtengamos una mala predicción en observaciones nuevas, i.e. observaciones a predecir en el futuro. En otras palabras, con un árbol grande se podría tener un sesgo pequeño pero una varianza de predicción mucho más grande, lo que afectaría el error de predicción. Es muy común entonces podar el árbol y encontrar un tamaño ideal para el árbol que compense entre sesgo y varianza, que son los componentes del error de predicción (ver Sección 3). Un procedimiento estándar es el de comparar varios árboles de diferentes tamaños y escoger un tamaño óptimo para el árbol que minimice un estimador del error de predicción (p. ej. Validación Cruzada, ver Sección 3). Hoy en día CART es una técnica muy popular por su flexibilidad, su fácil interpretación al identificar predictores importantes en su construcción y porque es capaz de manejar valores perdidos sin necesidad de hacer imputación previa (Feelders, 1999; Cevallos-Valdiviezo & Van Aelst, 2015).

Figura 1. Ejemplo de árbol de regresión para los datos “Hitters”.



En este ejemplo se busca predecir el salario de un jugador de béisbol sobre la base de sus marcas de juego alcanzadas.

Fuente: James et al. (2014), pág. 304.

4.2.2. Bosques Aleatorios (Random Forests)

Se basa en la combinación de L árboles de decisión de tal manera que formen un bosque (Breiman, 2001). En particular, se toman varias muestras bootstrap sobre las que se ajusta un árbol en cada una. Los árboles del bosque no son árboles CART. Los árboles de los bosques durante su crecimiento seleccionan de manera aleatoria un subconjunto de variables de tamaño m del conjunto completo de predictores de tamaño k ($m \leq k$) como variables candidatas para realizar la partición en cada nodo. De este modo Bosques Aleatorios controla la correlación entre los árboles. En el contexto de regresión el método de Bosques Aleatorios obtiene la predicción final en cada observación al promediar su predicción en los L árboles individuales del bosque. De esta manera, Bosques Aleatorios obtiene predicciones más estables en comparación con el árbol simple CART (Louppe, 2014; Cevallos-Valdiviezo & Van Aelst, 2015). Para nuestro problema de predicción del nivel de cosecha de camarón usamos $m = k/3$, es decir, el número de predictores considerados en cada partición es igual al número total de predictores dividido para 3. Éste es un criterio muy estándar para m en varias aplicaciones.

4.3. Regresión adaptativa multivariante por tramos (Multivariate Adaptive Regression Splines, MARS).

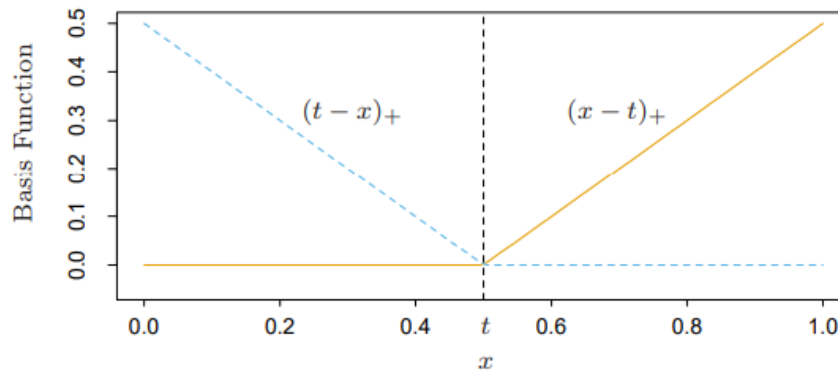
MARS es un método flexible y con estructura a la vez (Friedman, 1991). La flexibilidad de MARS es gracias al uso de funciones base. Sin embargo, MARS controla su flexibilidad e impone una estructura al ajustar funciones base lineales definidas por tramos. Estas funciones base lineales son trazadores lineales (splines) que expanden el espacio predictor. Las funciones base lineales usadas por MARS tienen la forma $(x - t)_+$ y $(t - x)_+$, donde el “+” significa la parte positiva:

$$(x - t)_+ = \begin{cases} x - t, & \text{si } x > t, \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$$

$$(t - x)_+ = \begin{cases} t - x, & \text{si } x < t, \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$$

La Figura 2 nos muestra un ejemplo de estas funciones base lineales cuando $t = 0.5$. La premisa de MARS es formar “pares reflejados” para cada variable X_j con nudos en cada valor observado x_{ij} de dicha variable.

Figura 1. Ejemplo de funciones base $(x - t)_+$ (color naranja) y $(t - x)_+$ (color celeste).



Fuente: Hastie et al. (2001), pág. 322.

Algoritmo

En el paso 1 del algoritmo de MARS el conjunto C contiene todos los pares reflejados, para todas las variables y para todos los valores observados:

$$C = \{(X_j - t)_+, (t - X_j)_+\}$$

$$t \in \{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}$$

$$j = 1, \dots, k.$$

Si todos los valores observados de X_j son distintos ($j = 1, \dots, k$), en el paso 1 el conjunto C contiene $2nk$ funciones base en total. En cada paso del algoritmo de MARS el conjunto C es actualizado eliminando funciones base y añadiendo productos de dos o más de estas funciones. El algoritmo de MARS realiza una regresión lineal paso a paso hacia adelante con las funciones base como variables predictoras:

$$f(X) = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m h_m(X),$$

en donde las $h_m(X)$ son funciones base del conjunto C . Los coeficientes β_m son estimados usando mínimos cuadrados. A continuación, describimos brevemente la primera parte del algoritmo usado por MARS:

1. Empezamos con la función constante $h_0(X) = 1$ sola en el modelo y todas las demás funciones en el conjunto C son funciones candidatas a entrar en el modelo.

2. Ingresa al modelo el par reflejado que produzca la reducción máxima del error de predicción estimado. Es decir, ingresa aquel par reflejado que produzca la mejor predicción.
3. Una vez que ingresa el primer par reflejado se actualiza el conjunto C de las funciones candidatas. La actualización de C consiste en retener las funciones base que estaban en el paso 1 excepto aquel par reflejado que ingresó al modelo en el paso 2. Además, se incluye al producto de los pares reflejados que ingresaron con las funciones base que quedaron.
4. Ingresa al modelo aquel par reflejado o función base que maximice la reducción del error de predicción estimado.
5. Los siguientes pasos actualizan C de la misma manera e ingresan al modelo el par reflejado o función base que maximice la reducción del error de predicción estimado.

Al ingresar un gran número de pares reflejados o funciones base al modelo podemos construir un modelo grande de tamaño \mathcal{M} . Durante la construcción del modelo podemos permitir que ingresen funciones base con interacciones entre predictores o sin interacciones si queremos un modelo menos flexible. Un modelo muy grande de tamaño \mathcal{M} sobreajustaría los datos disponibles, dificultando la generalización del modelo para predecir datos futuros. Por tanto, se aplica un procedimiento de eliminación hacia atrás para construir un modelo más estable. En cada paso del procedimiento de eliminación hacia atrás excluimos del modelo al par reflejado o función base que produzca un mínimo aumento del error estimado. Es decir, en cada paso eliminamos el par reflejado o función base menos importante para la predicción. Se aplica el procedimiento de eliminación hacia atrás hasta que nos quedemos únicamente con la función base $h_0(X) = 1$ dentro del modelo. Como consecuencia, tendremos una secuencia de modelos, desde el más grande de tamaño \mathcal{M} hasta el más simple que contiene únicamente la función base $h_0(X) = 1$. Si nos quedamos con el modelo más grande tendremos un modelo muy complejo y flexible por lo que tendremos una varianza de predicción alta, aunque un sesgo pequeño. Si nos quedamos con el modelo más simple la varianza de predicción será baja, pero el sesgo será muy alto. Por tanto, tenemos que seleccionar el tamaño óptimo del modelo usando un estimador del error de predicción (p. ej. Validación Cruzada, ver Sección 3).

El modelo final puede contener un subconjunto de todas las variables predictoras. Además, puede incluir interacciones entre variables predictoras si permitimos ingresar funciones base con interacciones en el procedimiento hacia adelante. Por tanto, además de ser un método flexible con estructura, otra de las ventajas de MARS es que permite realizar selección de variables y de interacciones de manera automática durante su construcción.

4.4. Máquinas de Soporte Vectorial (SVM).

SVM es una técnica que puede ser formulada para problemas de clasificación y regresión. SVM fue inicialmente propuesta para problemas de clasificación en Boser et al. (1992) y en Cortes & Vapnik (1995). Luego, una formulación de SVM para regresión fue propuesta por Drucker et al. (1997). SVM es una técnica que no hace supuestos probabilísticos, por lo que se la considera como una alternativa robusta ante desviaciones de estos supuestos en los datos.

Para nuestro problema de predicción consideramos regresión por SVM. La adaptación de SVM para regresión hereda algunas de las propiedades del clasificador SVM, por lo que explicamos brevemente el problema de optimización que el clasificador SVM busca resolver. Con clases linealmente separables es posible encontrar un hiperplano separador óptimo que maximiza un margen entre las clases (i.e. que maximiza la distancia mínima entre cada clase y el hiperplano), bajo la restricción que los puntos estén correctamente clasificados y que se encuentren fuera del margen. Con clases solapadas, no existe una solución para el hiperplano separador. Para encontrar una solución con clases linealmente no separables se generaliza el problema del hiperplano separador permitiendo que algunos puntos caigan dentro del margen o

inclusive en el lado incorrecto del hiperplano (i.e. permitiendo clasificaciones erróneas). A esta generalización se la conoce como Clasificador de Soporte Vectorial. El problema del Clasificador de Soporte Vectorial puede ser formulado como un problema de optimización con penalización, en donde se penaliza soluciones con mayores errores de clasificación. La solución del Clasificador de Soporte Vectorial viene dada por los puntos sobre el margen, puntos que caen dentro del margen y por los puntos que caen en el lado incorrecto del hiperplano. Es decir, la solución viene dada por los puntos que son más difíciles de clasificar. A estos puntos se los conoce también como vectores soporte. El Clasificador de Soporte Vectorial construye por tanto un hiperplano en el espacio predictor original. Un procedimiento más flexible se obtiene al expandir el espacio predictor usando funciones base y luego ajustar en este espacio expandido el Clasificador de Soporte Vectorial. La Máquina de Soporte Vectorial (SVM) es una extensión de esta idea, en donde se permite que la dimensión del espacio predictor expandido sea muy grande o infinita. Al considerar transformaciones asociadas con funciones Núcleos (Kernels) de forma apropiada, el problema de SVM puede formularse como un problema general de regularización, cuya solución tiene dimensión finita y viene dada por una combinación lineal de n funciones Núcleo evaluadas en los datos de entrenamiento.

En el espacio predictor original, Regresión de Soporte Vectorial busca por su parte un hiperplano con una banda de ancho ϵ , bajo la restricción que esta banda contenga todos los puntos. Sin embargo, para valores pequeños de ϵ no existe solución para este hiperplano, por lo que se relaja la restricción para encontrar una solución permitiendo que un cierto número de observaciones caiga fuera de la banda. La variable de holgura ξ_i o ξ_i^* determina la distancia máxima a la que puede encontrarse una observación y_i , $i = 1, \dots, n$, sobre o debajo de la banda respectivamente. Definimos al hiperplano por:

$$f(\mathbf{x}) = \beta_0 + \mathbf{x}^t \boldsymbol{\beta}$$

en donde $\mathbf{x}^t = [x_1, x_2, \dots, x_k]$ y $\boldsymbol{\beta}^t = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k]$ es el vector de k variables predictoras y de k parámetros respectivamente. Note que en este caso $\boldsymbol{\beta}$ no incluye el parámetro del intercepto β_0 . Regresión de Soporte Vectorial minimiza:

$$\min_{\beta_0, \boldsymbol{\beta}} \left[\frac{1}{2} \|\boldsymbol{\beta}\|^2 + \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \right] \quad (5)$$

$$\text{sujeto a:} \quad y_i - f(\mathbf{x}_i) \leq \epsilon + \xi_i$$

$$f(\mathbf{x}_i) - y_i \leq \epsilon + \xi_i^*$$

$$\xi_i \geq 0$$

$$\xi_i^* \geq 0, i = 1, \dots, n.$$

donde $\lambda > 0$ es un parámetro de ajuste que controla el número de observaciones fuera de la banda. Se puede mostrar fácilmente que la formulación del problema en (5) es equivalente a la siguiente formulación (Hastie et al., 2001):

$$\min_{\beta_0, \boldsymbol{\beta}} \left[\sum_{i=1}^n L(y_i, f(\mathbf{x}_i)) + \frac{\lambda}{2} \|\boldsymbol{\beta}\|^2 \right] \quad (6)$$

en donde $L(y_i, f(\mathbf{x}_i)) = \max(0, |y_i - f(\mathbf{x}_i)| - \epsilon)$. Note que si $L(y_i, f(\mathbf{x}_i)) = (y_i - f(\mathbf{x}_i))^2$, i.e. la función de pérdida de errores cuadráticos, Regresión de Soporte Vectorial es equivalente a la Regresión Contraída (Hoerl & Kennard, 1970). La solución de este problema viene dada por:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_i^*) \mathbf{x}_i$$

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_i^*) \mathbf{x}^t \mathbf{x}_i + \hat{\beta}_0 \quad (7)$$

en donde $\hat{\alpha}_i$ y $\hat{\alpha}_i^*$ son la solución de la función dual, que es un problema de programación cuadrática:

$$\max_{\substack{\alpha_i, \alpha_i^* \\ i=1, \dots, n}} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i - \epsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) \mathbf{x}_i^t \mathbf{x}_j \quad (8)$$

$$\text{sujeto a:} \quad \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0$$

$$0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq 1/\lambda$$

$$\alpha_i \alpha_i^* = 0.$$

Debido a la naturaleza de las restricciones, sólo un subconjunto de puntos cumple con la condición $(\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_i^*) \neq 0$, el cual corresponde a puntos sobre la banda o que se encuentran fuera de la banda. Estos son los vectores soporte para Regresión de Soporte Vectorial. Note que una vez encontrados $\hat{\alpha}_i$ y $\hat{\alpha}_i^*$, $\hat{\beta}_0$ se puede obtener fácilmente con cualquier vector soporte sobre la banda usando la ecuación $y_i - \hat{f}(\mathbf{x}_i) = \epsilon$ o la ecuación $\hat{f}(\mathbf{x}_i) - y_i = \epsilon$.

De manera análoga al problema de clasificación, SVM para regresión se basa en la idea de expandir el espacio predictor usando funciones base $h(\mathbf{x}) = (h_1(\mathbf{x}), h_2(\mathbf{x}), \dots, h_M(\mathbf{x}))$ y ajustar Regresión de Soporte Vectorial en el espacio expandido. Definimos al hiperplano en el espacio expandido como:

$$f(\mathbf{x}) = \beta_0 + h(\mathbf{x})^t \boldsymbol{\beta}.$$

Ya que el problema de optimización de Regresión de Soporte Vectorial en (8) y la solución para el hiperplano en (7) involucra a las variables predictoras a través de productos punto, podemos escribir:

$$\max_{\substack{\alpha_i, \alpha_i^* \\ i=1, \dots, n}} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i + \epsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) h(\mathbf{x}_i)^t h(\mathbf{x}_j) \quad (9)$$

con solución:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_i^*) h(\mathbf{x})^t h(\mathbf{x}_i)$$

Una formulación equivalente a (9), puede obtenerse al considerar un problema de estimación funcional en un espacio Hilbert con Núcleo reproductor \mathcal{H}_K generado por un Núcleo positivo definido K . Consideremos funciones base de transformación h asociadas con funciones base ϕ_m de una expansión (posiblemente finita) de K :

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m(\mathbf{x}) \phi_m(\mathbf{x}') \delta_m$$

$$\delta_m \geq 0$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} \delta_m^2 < \infty$$

con $h_m(\mathbf{x}) = \sqrt{\delta_m} \phi_m(\mathbf{x})$. Note que $h(\mathbf{x})^t h(\mathbf{x}') = \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m(\mathbf{x}) \phi_m(\mathbf{x}') \delta_m = K(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$.

Por tanto, no es necesario especificar la transformación $h(\mathbf{x})$, sólo se requiere conocer la función Núcleo $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$. Ya que $f(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m \sqrt{\delta_m} \phi_m(\mathbf{x})$ y tomando $\theta_m = \sqrt{\delta_m} \beta_m$, podemos escribir (6) como:

$$\min_{\beta_0, \theta_m} \left[\sum_{i=1}^n L(y_i, \beta_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \theta_m \phi_m(\mathbf{x}_i)) + \frac{\lambda}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\theta_m^2}{\delta_m} \right] \quad (10)$$

que es un problema de dimensión infinita. Sin embargo, se puede mostrar que la solución a este problema es de dimensión finita (Wahba, 1990) y se expresa como:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha}_i - \hat{\alpha}_i^*) K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) \quad (11)$$

i.e. una combinación lineal de n funciones Núcleo evaluadas en cualquier punto \mathbf{x} y en cada uno de los puntos de entrenamiento \mathbf{x}_i , $i = 1, \dots, n$. El criterio de optimización en (10) es por tanto equivalente al criterio en (9). Usando (11) y propiedades de \mathcal{H}_K , el criterio en (10) puede reducirse al criterio de dimensión finita:

$$\min_{\alpha} \left[\sum_{i=1}^n L(y_i, \mathbf{K}\tilde{\alpha}) + \lambda \tilde{\alpha}^t \mathbf{K}\tilde{\alpha} \right] \quad (12)$$

en donde \mathbf{K} es una matriz de dimensión $(n \times n)$ con entrada (i, j) -ésima $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ y $\tilde{\alpha}$ es un vector columna de dimensión $(n \times 1)$ que contiene los coeficientes $(\alpha_i - \alpha_i^*)$, $i = 1, \dots, n$. Note que por simplicidad hemos asumido en (12) que $\beta_0 = 0$. El criterio en (12) puede verse como un caso especial de un problema general de regularización:

$$\min_{f \in \mathcal{H}} \left[\sum_{i=1}^n L(y_i, f(\mathbf{x}_i)) + \lambda J(f) \right]$$

donde $L(y_i, f(\mathbf{x}_i))$ es una función de pérdida, $J(f)$ es el término de penalización funcional y \mathcal{H} es un espacio de funciones en donde $J(f)$ se encuentra definido.

Entre las funciones Núcleo más populares tenemos: funciones de base radiales, función Núcleo lineal, polinomial, Laplaciano y tangente hiperbólica. Asimismo, entre las funciones de pérdida más populares para regresión por SVM tenemos: ϵ -insensible, función de pérdida de Huber y la clásica función de pérdida de errores cuadráticos. Además del parámetro de penalización λ , regresión por SVM debe de optimizar el parámetro ϵ que controla el ancho de la banda. Adicionalmente, la función Núcleo a menudo depende de al menos un parámetro de ajuste, p. ej. el ancho de banda en las funciones de bases radiales. Esto implica que regresión por SVM busca optimizar sus parámetros de ajuste en un espacio de al menos dos dimensiones.

5. Resultados y Discusión.

En esta sección comparamos la capacidad predictiva de cinco metodologías para el problema de la camaronera bajo estudio. A saber: Regresión Lineal Múltiple (RLM), Arbol de Regresión (CART), Bosques Aleatorios (Random Forests), Regresión adaptativa multivariante por tramos (MARS) y Regresión por Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). Para evaluar la capacidad predictiva de cada método, consideramos la estimación del error según la técnica de Validación Cruzada con $P = 10$ y la predicción real de cosechas futuras. Para la evaluación con Validación Cruzada se consideraron los datos de todas las cosechas observadas desde noviembre de 2015 hasta abril de 2018 (35 pescas en total). Estos datos constituyen los datos de entrenamiento. Luego se hicieron predicciones de la cosecha a recogerse en los 5 estanques durante los dos siguientes ciclos, cuyos períodos comprendían los meses de mayo-agosto de 2018 y septiembre-diciembre de 2018, respectivamente. Una vez efectuada la pesca, estimamos el error de predicción al comparar el nivel de cosecha real en cada estanque con el nivel de cosecha predicho por la metodología. La implementación de estos métodos es hecha en el lenguaje estadístico R (R Core Team, 2018). La Tabla 4 reporta para cada método la raíz cuadrada del error por Validación Cruzada CV_{error} definido en (1), así como la función y el paquete correspondiente usados para su implementación en R. La Tabla 5 reporta el error de predicción estimado en los dos ciclos siguientes para cada método.

Note que cada método tiene parámetros de ajuste que pueden usarse para mejorar la predicción. Estos parámetros son optimizados en los datos de entrenamiento. En R, estos parámetros de ajuste se controlan en los argumentos de la función respectiva. La columna “Argumentos de la función en R” de la Tabla 4 muestra algunos de los parámetros de ajuste usados en cada técnica. Regresión lineal Múltiple tiene como parámetro de ajuste el número de predictores en el modelo. Para nuestro análisis consideramos el modelo aditivo con todos los 8 predictores y usando un subconjunto óptimo de predictores a través de la técnica Best Subset Selection con búsqueda exhaustiva (i.e. búsqueda del mejor subconjunto recorriendo el espacio entero de subconjuntos). En base al Criterio de Información Bayesiano (BIC, por sus siglas en inglés), Best Subset Selection seleccionó un modelo con 4 predictores como óptimo. A saber, el modelo con los predictores: “Cantidad sembrada”, “Peso (en gramos)”, “Supervivencia Estimada” y “Total de alimento consumido (libras)”. El modelo seleccionado por Best Subset Selection tuvo mejores resultados de predicción que el modelo completo según se muestra en la Tabla 4 y en la Tabla 5. Esto implica que en el modelo completo existen variables ruidosas o redundantes, y que por ende, no aportan información nueva para la predicción. Podemos constatar en los resultados inferenciales del modelo completo (ver Tabla 2) que al 5% de significancia cuatro variables tienen efectos no significativos. Note además que los valores VIF para el modelo completo son mayores que estos valores para el modelo reducido (ver Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente), lo que es un indicativo de mayor multicolinealidad en el modelo completo. De hecho, las variables con efectos significativos en el modelo completo concuerdan con las variables seleccionadas por Best Subset Selection (note que la variable “Total de alimento consumido (libras)” es marginalmente significativa en el modelo completo). En cuanto a los supuestos, los gráficos de diagnóstico muestran una ligera desviación del supuesto de homocedasticidad tanto en el modelo completo como en el modelo reducido (ver Figura 4 y Figura 5 en la Sección de Anexos). Sin embargo, la prueba global concluye que todos los cuatro supuestos son aceptables al 5% de significancia en cada modelo.

Tabla 2. Valores VIF, coeficientes estimados [IC 95%] y valores P para el modelo de RLM aditivo completo con 8 predictores.

Predictor	VIF	Coefficiente de regresión [IC 95%]	Valor P
Hectáreas (HAS)	3.59	273.92 [-200.59; 748.42]	0.25
Cantidad sembrada	4.65	0.01 [0.01; 0.02]	<0.001
Peso (en gramos)	1.46	1295.16 [800.58; 1789.73]	<0.001
Días de cultivo	1.95	10.13 [-72.77; 93.02]	0.80
Supervivencia Estimada (en porcentaje)	3.57	37902.08 [29149.93; 46654.23]	<0.001
Total de alimento consumido (libras)	4.43	0.07 [-0.01; 0.14]	0.05
Oxígeno disuelto promedio del estanque (mg/l)	2.67	67.57 [-2585.29; 2450.15]	0.96
Temperatura promedio del estanque (grados Celsius)	1.21	65.69 [-697.94; 829.31]	0.86
Resultados Prueba Global: H_0 : Los 4 supuestos (linealidad, homocedasticidad, errores normales e independientes) se cumplen H_a : Al menos uno de los cuatro supuestos no se cumple Valor Estadístico = 8.91 Valor P = 0.06			

En la parte inferior se muestran los resultados de la Prueba Global para evaluar los cuatro supuestos.
Fuente: Elaboración propia.

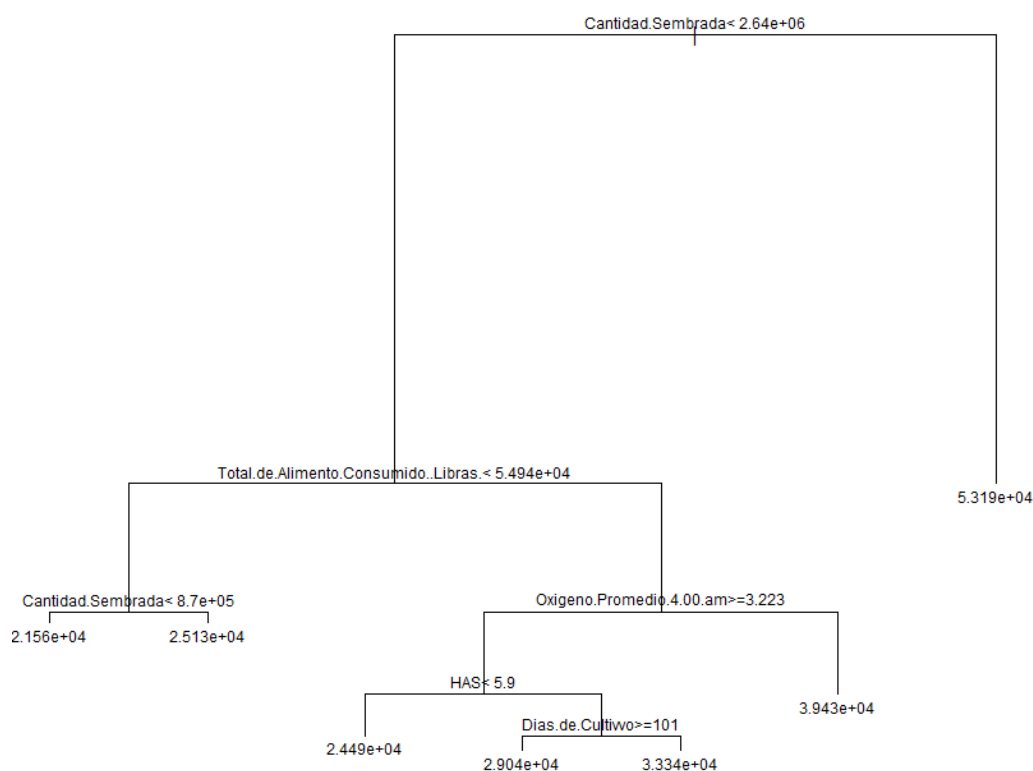
Tabla 3. Valores VIF, coeficientes estimados [IC 95%] y valores P para el modelo de RLM aditivo con 4 predictores seleccionados por Best Subset Selection.

Predictor	VIF	Coefficiente de regresión [IC 95%]	Valor P
Cantidad sembrada	3.27	0.01 [0.01; 0.02]	<0.001
Peso (en gramos)	1.39	1216.34 [750.62; 1682.05]	<0.001
Supervivencia Estimada (en porcentaje)	2.98	37821.35 [30096.66; 45546.04]	<0.001
Total de alimento consumido (libras)	1.57	0.08 [0.04; 0.12]	<0.001
Resultados Prueba Global: H_0 : Los 4 supuestos (linealidad, homocedasticidad, errores normales e independientes) se cumplen H_a : Al menos uno de los cuatro supuestos no se cumple Valor Estadístico = 8.60 Valor P = 0.07			

En la parte inferior se muestran los resultados de la Prueba Global para evaluar los cuatro supuestos.
Fuente: Elaboración propia.

Árbol de regresión (CART) controla su flexibilidad a través de su tamaño. Un árbol CART más grande generalmente construye un procedimiento más flexible. Entre los parámetros de ajuste que controlan el tamaño del árbol CART tenemos: el número mínimo de observaciones en cualquier nodo terminal (argumento minbucket en rpart), el número mínimo de observaciones que deben existir en un nodo para intentar hacer una partición (argumento minsplit en rpart) y el número de nodos finales (controlado por el argumento cp en rpart). Para nuestro análisis consideramos minsplit=20 y minbucket=7. El argumento cp representa al parámetro de complejidad de CART. Mientras más grande sea el valor del argumento cp, en general más pequeño será el árbol construido. Para nuestro análisis usamos el valor default de cp=0.01 que construye un árbol con 7 nodos (ver Figura 3). Podar el árbol no mejoró el desempeño predictivo de CART, por lo que no mostramos estos resultados en esta Sección.

Figura 2. Árbol de regresión con 7 nodos terminales para predecir la cosecha de camarón blanco en nuestro estudio.



Fuente: Elaboración propia, usando los datos de entrenamiento.

La técnica de Bosques Aleatorios tiene como parámetros de ajuste al número L de árboles en el bosque y al número m de predictores seleccionados al azar que serán considerados como candidatos al hacer una partición en cada árbol individual. Usando Validación Cruzada LOOCV obtuvimos un valor óptimo de $L = 500$. Dado $L = 500$, el valor $m = 3$ dio los mejores resultados predictivos.

Para MARS consideramos modelos que no permitían interacción entre predictores, modelos hasta con interacciones de primer orden y modelos hasta con interacciones de segundo orden. En esta Sección sólo reportamos los resultados del modelo MARS sin interacciones

(degree=1 en la función earth en R), que tuvo un menor error de predicción por Validación Cruzada y mejor desempeño en la predicción de cosechas futuras.

Para regresión por SVM se usó la función de pérdida ϵ -insensible y se consideraron varias opciones para funciones Núcleo con diferentes valores para sus parámetros de ajuste, diferentes valores para el parámetro de penalización λ y para el parámetro del ancho de banda ϵ . Se consideraron las funciones Núcleo lineal, polinomial, Laplaciano, tangente hiperbólica y funciones de base radial. La opción de parámetros de ajuste con mejor desempeño predictivo consistió en un Núcleo lineal (kernel="vanilladot" en la función ksvm en R), con parámetro de penalización $C=10$ (donde C tiene correspondencia con el parámetro λ) y $\epsilon = 0.1$. Esta selección de parámetros para regresión por SVM es la que se muestra en las Tablas 4 y 5, y es la que se reporta en esta Sección.

Sobre la base de la estimación del error por Validación Cruzada, concluimos que el modelo MARS sin interacciones es aquél que tiene la mejor capacidad predictiva, seguido por el modelo de Regresión lineal múltiple con el subconjunto óptimo de 4 predictores. RLM es un modelo bastante estructurado en el sentido que ajusta un hiperplano para hacer la predicción. Además, RLM con selección de variables importantes a través de Best Subset Selection tiene la capacidad de eliminar variables ruidosas o redundantes, construyendo de esa forma un modelo aún más estable. MARS es más flexible ya que usa transformaciones no lineales en el espacio predictor, aunque mantiene una estructura en el modelo al usar funciones base lineal. La técnica de regresión por SVM con Núcleo lineal también tuvo un buen desempeño relativo según Validación Cruzada. Estos resultados sugieren que para obtener una buena predicción del nivel de cosecha en nuestro problema es importante construir un modelo lo suficientemente estructurado y estable. Por otro lado, la técnica de Validación Cruzada sugiere que la flexibilidad de CART y Bosques Aleatorios no ayudan a mejorar la predicción. De igual modo, SVM con funciones Núcleo más complejas que la lineal no mostraron un buen desempeño predictivo.

Tabla 4. Métodos Predictivos, funciones y su paquete correspondiente en R, artículo de referencia, argumentos de la función utilizados y error por CV.

Método Predictivo	Función en R	Paquete en R	Referencia	Argumentos de la función en R	$\sqrt{CV_{error}}$
RLM	lm()	stats	R Core Team (2018)	formula*	3508.34
Best subset selection (4 predictores)	regsubsets()	leaps	Lumley & Miller (2017)	formula.bss**, method="exhaustive"	2555.02
Árbol de Regresión (CART)	rpart()	rpart	Therneau & Atkinson (2018)	formula*, cp=0.01, control=rpart.control(minsplit=20, minbucket=7)	7989.21
Bosques aleatorios	randomForest()	randomForest	Liaw & Wiener (2002)	formula*, $m = 3$, $L = 500$	6606.83
MARS	earth()	earth	Milborrow et al. (2018)	formula*, degree=1	2.330.78

Regresión SVM	ksvm()	kernlab	Karatzoglou et al. (2004)	formula*, kernel="vanilladot", C=10, epsilon=0.1	2877.05
---------------	--------	---------	---------------------------	--	---------

*formula = Hectáreas (HAS) + Cantidad sembrada + Peso (en gramos) + Días de cultivo + Supervivencia Estimada (en porcentaje) + Total de alimento consumido (libras) + Oxígeno disuelto promedio del estanque (mg/l) + Temperatura promedio del estanque (grados Celsius)

** formula.bss = Cantidad sembrada + Peso (en gramos) + Supervivencia Estimada (en porcentaje) + Total de alimento consumido (libras)

Fuente: Elaboración propia.

Además de estimar el error de predicción de cada método usando la técnica de Validación Cruzada, se evaluó su capacidad predictiva real en los dos siguientes ciclos. Para realizar esta predicción se utilizaron los valores observados en las variables predictoras durante estos dos siguientes ciclos. Estimamos el error de predicción de cada método tras obtener el monto real de la cosecha en cada uno de los 5 estanques. La Tabla 5 muestra la raíz cuadrada del error cuadrático promedio de predicción en los dos siguientes ciclos para cada uno de los métodos descritos en la Tabla 4. La Tabla 5 muestra que los desempeños predictivos reales de los métodos van en concordancia con las estimaciones del error obtenidas con Validación Cruzada. Estos resultados confirman que los modelos que son suficientemente estructurados y estables tienen un buen desempeño predictivo en nuestro problema.

Tabla 5. Raíz cuadrada del error cuadrático promedio de predicción en los dos siguientes ciclos para cada uno de los métodos considerados.

Método Predictivo	Raíz cuadrada del error cuadrático promedio
RLM	6733.84
Best subset selection (4 predictores)	6587.96
Árbol de Regresión (CART)	10575.74
Bosques aleatorios	7135.97
MARS	4016.45
Regresión SVM	6456.50

Fuente: Elaboración propia.

Otras de las contribuciones de este trabajo es la identificación/selección de variables importantes para la predicción del nivel de cosecha de camarón blanco. El modelo de RLM completo identificó a cuatro predictores significativos, los cuales concordaron con la selección óptima de Best Subset Selection. Estos predictores son:

- Cantidad sembrada (número de larvas)
- Peso (en gramos)

- Supervivencia estimada (en porcentaje)
- Total de alimento consumido (libras)

Según se visualiza en la Figura 3, los predictores identificados como los más importantes para la predicción del nivel de cosecha de camarón según CART son:

- Cantidad sembrada (número de larvas)
- Total de alimento consumido (libras)
- Oxígeno disuelto promedio del estanque (mg/l)
- Hectáreas (HAS)
- Días de cultivo

MARS realiza selección automática de predictores importantes. Para nuestro problema MARS seleccionó:

- Cantidad sembrada (número de larvas)
- Peso (en gramos)
- Supervivencia estimada (en porcentaje)
- Días de cultivo
- Total de alimento consumido (libras)

Note que las variables “Cantidad Sembrada” y “Total de Alimento Consumido (libras)” fueron identificadas por RLM y CART y seleccionadas por MARS y Best Subset Selection como variables importantes para la predicción del nivel de cosecha de camarón blanco.

6. Conclusiones.

Hemos realizado una comparación de cinco metodologías de aprendizaje estadístico para la predicción del nivel de cosecha de camarón blanco *Litopenaeus vannamei* (en libras) de una pequeña camaronera ubicada en la parroquia Tenguel del cantón Guayaquil, Ecuador. Para este efecto, se estudiaron datos de $n = 35$ pescas que corresponden a 7 ciclos, los cuales se usaron como datos de entrenamiento. Luego se hicieron predicciones reales de cosecha para los dos siguientes ciclos. MARS sin interacciones, el modelo de RLM aditivo con selección de predictores por Best Subset Selection y SVM con Núcleo lineal produjeron un menor error de predicción por Validación Cruzada en comparación con los métodos CART y Bosques Aleatorios. El buen rendimiento predictivo de estos métodos fue confirmado con buenos resultados de predicción real en los dos siguientes ciclos. Las variables “Cantidad Sembrada” y “Total de Alimento Consumido (libras)” fueron identificadas/seleccionadas por los métodos considerados como variables importantes para la predicción del nivel de cosecha de camarón blanco.

Se espera que este trabajo produzca un impacto positivo en la pequeña camaronera estudiada. El uso de técnicas estadísticas de vanguardia puede ser de gran ayuda para obtener predicciones confiables de la próxima cosecha. Si la camaronera en estudio puede obtener predicciones confiables, entonces podrá proyectar sus ingresos y planificar de manera efectiva

sus operaciones y futuras inversiones. A lo largo de la última década se ha comprobado que la tecnificación de procesos y la tecnología ha sido pieza clave para el crecimiento del sector camaronero en el Ecuador.

Referencias

- Alvarado-Espinoza, F. (2016). *La comercialización del camarón ecuatoriano en el mercado internacional y su incidencia en la generación de divisas*. (Tesis de fin de Máster). Universidad de Guayaquil, Guayaquil.
- Atkinson, A.C. (1985). *Plots, Transformations, and Regression: An Introduction to Graphical Methods of Diagnostic Regression Analysis*. Oxford: Clarendon Press.
- Beale, E.M.L., Kendall, M.G., & Mann, D.W. (1967). The discarding of variables in multivariate analysis. *Biometrika*, 54(3/4), 357-366.
- Boser, B.E., Guyon, I.M., & Vapnik, V.N. (1992). A training algorithm for optimal margin classifiers. *Proceedings of the Fifth Annual Workshop on Computational Learning Theory COLT '92*, 144-152.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., & Ljung, G.M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5^{ta} ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine Learning*, 24, 123-140.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., & Stone, C. (1984). *Classification and Regression Trees*. Nueva York: Wadsworth & Brooks.
- Cevallos-Valdiviezo, H., & Van Aelst, S. (2015). Tree-based prediction on incomplete data using imputation or surrogate decisions. *Information Sciences*, 311, 163-181.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46.
- Cook, R.D. (1998). *Regression Graphics: Ideas for Studying Regressions through Graphics*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Cook, R.D., & Weisberg, S. (1982). *Residuals and Influence in Regression*. Nueva York: Chapman & Hall.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297.
- David, F.N., & Neyman, J. (1938). Extension of the Markoff's theorem on least squares. *Statistical Research Memoirs*, 2, 105-116.
- Drewns-Jr, P., Bauer, M., Machado, K., Puciarelli, P., & Felipe Dumont, L. (2014, octubre). A machine learning approach to predict the pink shrimp harvest in the patos lagoon estuary. *KDMILE*. Sao Carlos, Brasil.

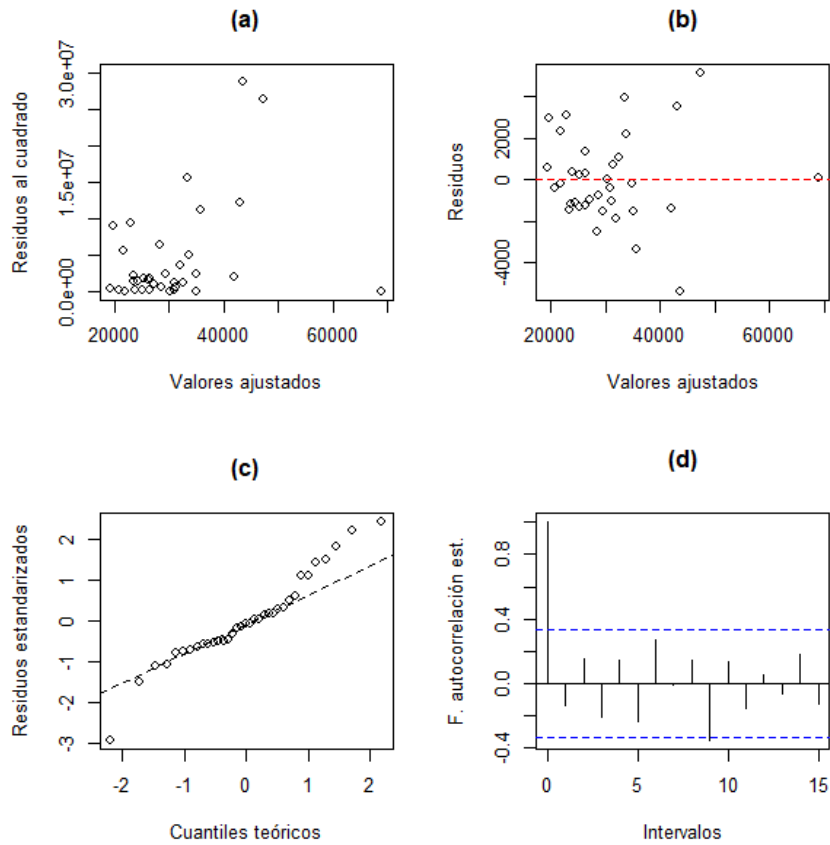
- Drucker, H., Burges, C.J.C., Kaufman, L., Smola, A.J., & Vapnik, V. (1997). Support vector regression machines. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 28(7), 155-161.
- FAO (2018). *GLOBEFISH Highlights: A Quarterly Update on World Seafood Markets* (1st issue). Descargado de <http://www.fao.org/3/I8626EN/i8626en.pdf>
- Feelders, A. (1999). Handling missing data in trees: Surrogate splits or statistical imputation? *Principles of Data Mining and Knowledge Discovery* (pp. 329-334). Berlin Heidelberg: Springer.
- Fox, J. (1984). *Linear Statistical Models and Related Methods, with Applications to Social Research*. Nueva York: John Wiley.
- Friedman, J.H. (1991). Multivariate adaptive regression splines. *Annals of Statistics*, 19(1), 1-67.
- Furnival, G.M., & Wilson, R.W. (1974). Regressions by leaps and bounds. *Technometrics*, 16(4), 499-511.
- Garcia, S.P., DeLancey, L.B., Almeida, J., & Chapman, R. (2007). Ecoforecasting in real time for commercial fisheries: The Atlantic white shrimp as a case study. *Marine Biology*, 152, 15-24.
- Geisser, S. (1993). *Predictive Inference*. Nueva York: Chapman & Hall.
- Geman, S., Bienenstock, E., & Doursat, R. (1992). Neural networks and the bias/variance dilemma. *Neural Computation*, 4, 1-58.
- Grant, W., Matis, J., & Miller, W. (1988). Forecasting commercial harvest of marine shrimp using a Markov chain model. *Ecological Modelling*, 43(3), 183-193.
- Green, M., & Ohlsson, M. (2007, julio). Comparison of standard resampling methods for performance estimation of artificial neural network ensembles. *Third International Conference on Computational Intelligence in Medicine and Healthcare*. Plymouth, Reino Unido.
- Göndör, M., & Bresfelean V. (2012). RepTree and M5P for measuring fiscal policy influences on the Romanian capital market during 2003-2010. *International Journal of Mathematics and Computers in Stimulation*, 4, 378-386.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J.H. (2001). *The Elements of Statistical Learning*. Nueva York: Springer.
- Hocking, R. R., & Leslie, R. N. (1967). Selection of the best subset in regression analysis. *Technometrics*, 9(4), 531-540.
- Hoerl, A.E., & Kennard, R.W. (1970). Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics*, 12(1), 55-67.
- Holte, R.C. (1993). Very simple classification rules perform well on most commonly used datasets. *Machine Learning*, 11(1), 63-90.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2014). *An Introduction to Statistical Learning: With Applications in R*. Nueva York: Springer.

- Kalekar, P. S. (2004). *Time series Forecasting using Holt-Winters Exponential Smoothing*. Kanwal Rekhi School of Information Technology. Descargado de https://caohock24.files.wordpress.com/2012/11/04329008_exponentialsmoothing.pdf
- Karatzoglou, A., Smola, A., Hornik, K., & Zeileis, A. (2004). kernlab - an S4 package for kernel methods in R. *Journal of Statistical Software*, 11(9), 1-20.
- Kohavi, R. (1995). The power of decision tables. *European Conference on Machine Learning (ECML)*, 174-189.
- Kuncheva, L. I. (2014). *Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms* (2^{da} ed.). Nueva York: John Wiley.
- Kutner, M., Nachtsheim, C., Neter, J., & Li, W. (2004). *Applied Linear Statistical Models*. Chicago: McGraw-Hill.
- Lachenbruch, P.A., & Mickey, M.R. (1968). Estimation of error rates in discriminant analysis. *Technometrics*, 10(1), 1-11.
- Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomforest. *R News*, 2(3), 18-22.
- Loupe, G. (2014). *Understanding Random Forests: From Theory to Practice*. (Tesis doctoral no publicada). Universidad de Lieja, Lieja.
- Lumley, T., & Miller, A. (2017). *leaps: Regression Subset Selection*. R package version 3.0.
- Marquardt, D.W. (1970). Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation. *Technometrics*, 12(3), 591-612.
- McLachlan, G. (1992). *Discriminant analysis and statistical pattern recognition*. Nueva York: John Wiley.
- Milborrow, S., Hastie, T., Tibshirani, R., Miller, A., & Lumley, T. (2018). *earth: Multivariate Adaptive Regression Splines*. R package version 4.6.3.
- Molinaro, A.M., Simon, R., & Pfeiffer, R.M. (2005). Prediction error estimation: a comparison of resampling methods. *Bioinformatics*, 21(15), 3301-3307.
- Mundfrom, D., Smith, M., & Kay, L. (2018). The effect of multicollinearity on prediction in regression models. *General Linear Model Journal*, 44, 24-28.
- Nicovita (1997). *Interrelaciones de la temperatura, oxígeno y amoníaco tóxico en el cultivo de camarón en Tumbes*. Descargado de https://www.nicovita.com.pe/extranet/Boletines/ago_97_02.pdf
- Peña, E.A., & Slate, E. H. (2006). Global validation of linear model assumptions. *Journal of the American Statistical Association*, 101(473), 341-354.
- Plackett, R. L. (1949). A historical note on the method of least squares. *Biometrika*, 36(3/4), 458-460.

- R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Salmerón-Gómez, R., & Rodríguez-Martínez, E. (2017). Métodos cuantitativos para un modelo de regresión lineal con multicolinealidad. Aplicación a rendimientos de letras del tesoro. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 24, 169-189.
- Santillán-Lara, X. (2018). *La acuacultura del camarón y su impacto sobre el ecosistema de manglar*. SPINCAM 3. Descargado de http://www.spincam3.net/data/actividades/2018/marzo/INFORME_TALLER_ECOSISTEMAS_USO_PRESIONES_28MAR2018.pdf
- Seal, H.L. (1967). Studies in the history of probability and statistics. xv: The historical development of the gauss linear model. *Biometrika*, 54(1/2), 1-24.
- Stigler, S.M. (1981). Gauss and the invention of least squares. *The Annals of Statistics*, 9(3), 465-474.
- Sujjaviriyasup, T., & Pitiruek, K. (2013). Agricultural product forecasting using machine learning approach. *International Journal of Mathematical Analysis*, 7(38), 1869-1875.
- Theil, H. (1971). *Principles of Econometrics*. Nueva York: John Wiley.
- Therneau, T., & Atkinson, B. (2018). *rpart: Recursive Partitioning and Regression Trees*. R package version 4.1-13.
- Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 58(1), 267-288.
- Vilalta, R., & Drissi, Y. (2002). A perspective view and survey of meta-learning. *Artificial Intelligence Review*, 18(2), 77-95.
- Wahba, G. (1990). *Spline Models for Observational Data*. Montpelier: Capital City Press.

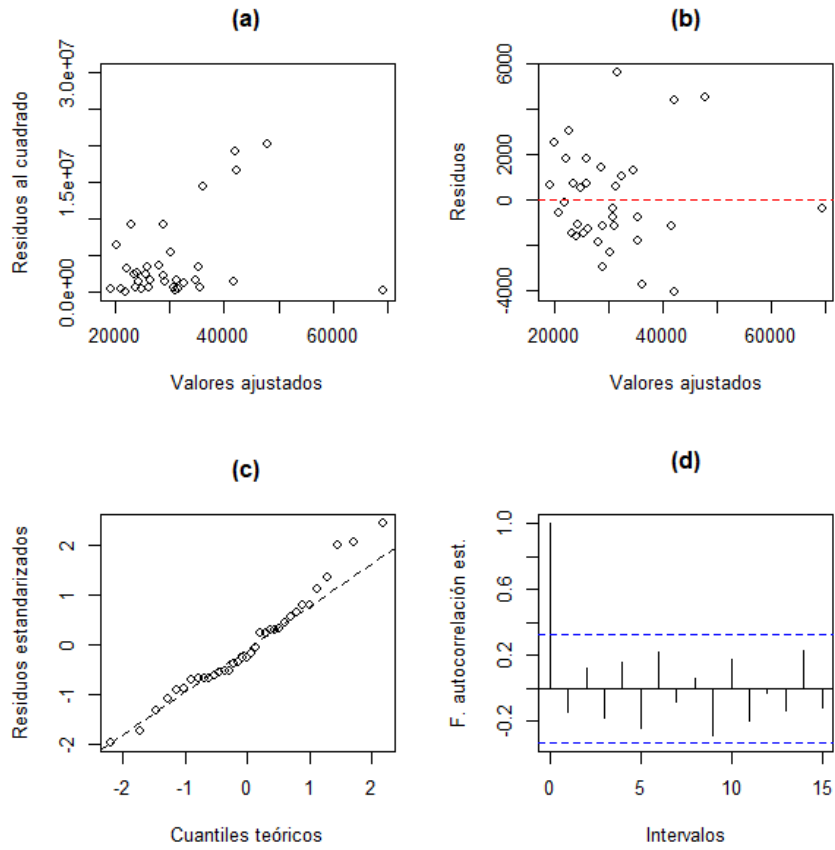
Anexos

Figura 4. Gráficos de diagnóstico para evaluar los supuestos del modelo de RLM completo con 8 predictores: (a) Residuos al cuadrado vs Valores ajustados, (b) Residuos vs Valores ajustados, (c) Residuos estandarizados vs Cuantiles teóricos de la distribución normal estándar, (d) Función de autocorrelación estimada vs Intervalos.



Fuente: Elaboración propia, usando los datos de entrenamiento.

Figura 5. Gráficos de diagnóstico para evaluar los supuestos del modelo de RLM con 4 predictores seleccionados por Best Subset Selection: (a) Residuos al cuadrado vs Valores ajustados, (b) Residuos vs Valores ajustados, (c) Residuos estandarizados vs Cuantiles teóricos de la distribución normal estándar, (d) Función de autocorrelación estimada vs Intervalos.



Fuente: Elaboración propia, usando los datos de entrenamiento.

Tabla 6. Producción de la camarонера bajo estudio desde noviembre/2015 a diciembre/2018.

Año	Corrida	Piscina	Hectáreas (Has)	Fecha de inicio	Cantidad Sembrada	Peso Promedio (Gramos)	Fecha Pesca	Días de Cultivo	Libras Cosechadas	Cliente	Supervivencia Estimada (Porcentaje)	Total de Alimento Consumido (Libras)	Oxígeno Disuelto Promedio (Miligramo por litro)	Temperatura Promedio (Grados Celsius)
2016	Primera Corrida	1	7,4	16/11/2015	900.000	17,2	23/2/2016	99	24.230	Expalsa	49,1%	39.017,00	4,21	28,41
2016	Primera Corrida	2	6,0	16/11/2015	840.000	17,5	7/3/2016	112	21.700	Expalsa	43,2%	42.636,00	4,28	28,46
2016	Primera Corrida	3	5,8	16/11/2015	840.000	18,0	5/3/2016	110	19.835	Promarisco	44,1%	37.054,60	3,57	28,46
2016	Primera Corrida	4	8,1	16/11/2015	1.020.000	18,0	6/3/2016	111	27.750	Expalsa	43,6%	46.420,00	4,50	28,64
2016	Primera Corrida	5	15,0	28/12/2015	2.004.000	13,5	26/4/2016	120	30.000	Expalsa	39,5%	86.229,00	3,63	29,29
2016	Segunda Corrida	1	7,4	4/3/2016	900.000	18,0	9/6/2016	97	25.388	Expalsa	50,1%	42.627,20	4,51	28,81
2016	Segunda Corrida	2	6,0	2/4/2016	840.000	17,5	20/7/2016	109	24.000	Expalsa	44,6%	54.940,60	4,22	28,20
2016	Segunda Corrida	3	5,8	2/4/2016	840.000	16,0	22/7/2016	111	20.350	Expalsa	43,63%	46.063,60	4,35	28,53
2016	Segunda Corrida	4	8,1	2/4/2016	1.020.000	13,0	6/7/2016	95	25.000	Expalsa	51,0%	46.755,50	4,23	28,67
2016	Segunda Corrida	5	15,0	2/4/2016	2.004.000	17,0	24/6/2016	83	30.200	Expalsa	56,5%	56.205,60	4,36	28,88
2016	Tercera Corrida	1	7,4	22/6/2016	1.750.000	18,0	3/11/2016	134	27.900	Expalsa	39,0%	103.554,00	3,82	26,48
2016	Tercera Corrida	2	6,0	3/8/2016	840.000	17,1	17/11/2016	106	25.800	Cristiansen	45,9%	66.968,00	3,60	26,21
2016	Tercera Corrida	3	5,8	1/8/2016	840.000	18,0	15/11/2016	106	22.400	Proceos	45,9%	60.651,80	3,52	26,21
2016	Tercera Corrida	4	8,1	27/7/2016	1.020.000	19,0	12/11/2016	108	29.945	Expalsa	45,0%	88.682,00	3,26	26,29
2016	Tercera Corrida	5	15,0	10/7/2016	1.980.000	17,0	2/11/2016	115	40.500	Expalsa	41,8%	151.998,00	3,18	26,36
2017	Primera Corrida	1	7,4	13/12/2016	1.015.000	18,0	11/3/2017	88	32.000	Expalsa	54,2%	64.460,00	3,40	28,36
2017	Primera Corrida	2	6,0	13/12/2016	884.000	17,9	15/3/2017	92	33.500	Cristiansen	52,4%	58.443,00	3,35	28,45
2017	Primera Corrida	3	5,8	13/12/2016	885.000	18,0	12/3/2017	89	27.875	Expalsa	53,7%	58.509,00	3,34	28,38
2017	Primera Corrida	4	8,1	13/12/2016	1.075.000	17,5	13/3/2017	90	33.600	Expalsa	53,3%	68.233,00	3,63	28,57
2017	Primera Corrida	5	15,0	13/12/2016	2.035.000	20,0	13/3/2017	90	46.500	Expalsa	53,3%	116.281,00	3,12	28,56
2017	Segunda Corrida	1	7,4	1/4/2017	1.150.000	22,1	10/8/2017	131	26.705	Cristiansen	39,0%	60.368,00	4,52	26,54
2017	Segunda Corrida	2	6,0	13/5/2017	1.200.000	18,0	12/8/2017	91	22.620	Omarsa	52,8%	41.514,00	4,36	26,19
2017	Segunda Corrida	3	5,8	1/4/2017	900.000	22,2	26/7/2017	116	23.205	Omarsa	41,3%	58.982,00	3,88	26,44
2017	Segunda Corrida	4	8,1	13/5/2017	1.500.000	17,5	24/8/2017	103	25.897	Omarsa	47,3%	43.120,00	5,00	26,29
2017	Segunda Corrida	5	15,0	5/5/2017	2.800.000	22,1	11/8/2017	98	38.160	Omarsa	49,6%	63.195,00	4,51	26,43
2017	Tercera Corrida	1	7,4	7/9/2017	800.000	16,0	8/12/2017	92	21.892	Omarsa	52,4%	42.020,00	4,29	25,67
2017	Tercera Corrida	2	6,0	7/9/2017	1.050.000	15,8	10/12/2017	94	23.992	Omarsa	51,4%	42.130,00	3,99	25,65
2018	Tercera Corrida	3	5,8	11/9/2017	2.000.000	18,4	2/2/2018	144	35.961	Cristiansen	39,0%	89.144,00	3,02	26,61
2017	Tercera Corrida	4	8,1	7/9/2017	1.025.000	15,5	27/12/2017	111	30.508	Omarsa	43,6%	57.530,00	3,90	25,68
2017	Tercera Corrida	5	15,0	7/9/2017	1.400.000	17,2	12/12/2017	96	37.400	Omarsa	50,5%	54.945,00	4,12	25,75

Año	Corrida	Piscina	Hectáreas (Has)	Fecha de inicio	Cantidad Sembrada	Peso Promedio (Gramos)	Fecha Pesca	Días de Cultivo	Libras Cosechadas	Cliente	Supervivencia Estimada (Porcentaje)	Total de Alimento Consumido (Libras)	Oxígeno Disuelto Promedio (Miligramo por litro)	Temperatura Promedio (Grados Celsius)
2018	Primera Corrida	1	7,4	18/12/2017	2.480.000	20,7	4/4/2018	107	32.410	Omarsa	45,5%	62.970,60	3,36	28,62
2018	Primera Corrida	2	6,0	18/12/2017	2.350.000	20,2	21/4/2018	124	34.740	Cristiansen	39,0%	63.823,10	2,94	28,46
2018	Primera Corrida	3	5,8	18/12/2017	2.350.000	16,8	19/3/2018	91	26.195	Omarsa	52,8%	37.753,10	3,10	28,30
2018	Primera Corrida	4	8,1	18/12/2017	2.800.000	20,7	22/4/2018	125	52.465	Proexpo	39,0%	94.342,60	3,07	28,77
2018	Primera Corrida	5	15,0	19/12/2017	4.500.000	16,1	8/4/2018	110	68.940	Cristiansen	44,1%	118.525,00	3,07	28,84
2018	Segunda Corrida	1	7,4	18/4/2018	2.200.000	18,1	12/8/2018	116	21.970	Proexpo	25,0%	43.584,20	3,36	28,62
2018	Segunda Corrida	2	6,0	5/5/2018	1.550.000	15,1	7/9/2018	125	23.695	Proexpo	46,1%	43.320,20	2,94	28,46
2018	Segunda Corrida	3	5,8	18/4/2018	1.800.000	17,0	17/8/2018	121	28.600	Omarsa	42,4%	47.196,60	3,10	28,30
2018	Segunda Corrida	4	8,1	5/5/2018	1.950.000	14,6	6/9/2018	124	22.250	Proexpo	35,4%	52.470,00	3,07	28,77
2018	Segunda Corrida	5	15,0	18/4/2018	4.000.000	17,5	10/9/2018	145	50.096	Proexpo	32,5%	98.879,00	3,07	28,84
2018	Tercera Corrida	1	7,4	31/8/2018	1.800.000	15,6	17/12/2018	108	21.280	Cristiansen	34,3%	32.551,21	4,14	26,35
2018	Tercera Corrida	2	6,0	26/9/2018	1.920.000	16,5	10/1/2019	106	20.765	Proexpo	29,8%	30.000,47	3,95	25,81
2018	Tercera Corrida	3	5,8	31/8/2018	1.600.000	18,0	8/1/2019	130	32.972	Proexpo	51,9%	49.969,92	3,81	26,18
2018	Tercera Corrida	4	8,1	26/9/2018	2.400.000	16,8	22/1/2019	118	33.152	Proexpo	37,4%	50.532,10	4,02	25,99
2018	Tercera Corrida	5	15,0	26/9/2018	4.800.000	17,4	7/2/2019	134	47.685	Proexpo	26,0%	93.453,84	3,89	26,18

Fuente: Elaboración propia.



Construcción y validación de un instrumento para caracterizar el nivel de innovación en instituciones prestadoras de servicios de salud

CHAVARRIA CHAVARRIA, TATIANA MARGARITA
Facultad de Administración. Universidad CES (Colombia)
Correo electrónico: tchavarría@ces.edu.co

PULGARÍN MOLINA, SERGIO ANDRÉS
Escuela de Administración. Universidad del Rosario (Colombia)
Correo electrónico: sergio.pulgarin@urosario.edu.co

RESUMEN

La investigación pretende desarrollar y validar un instrumento para caracterizar el nivel de impacto, en las instituciones prestadoras de servicios de salud, de la aplicación de las cuatro dimensiones esenciales del Radar de la innovación: las ofertas de la institución (¿qué?), los clientes que atiende (¿a quién?), los procesos que utiliza (¿cómo?) y los puntos de presencia que emplea para llevar sus ofertas al mercado (¿dónde?).

Se optó por un estudio de corte exploratorio mixto. Mediante la revisión bibliográfica y la discusión con un panel de 11 expertos, se construyó y aprobó el contenido del instrumento de 49 ítems en escala Likert de 5 puntos para caracterizar la utilización de la innovación en las instituciones prestadoras de servicios de salud; el constructo y la fiabilidad fueron validados mediante la aplicación de una prueba piloto a 33 participantes y el estudio de los resultados obtenidos para cada una de las dimensiones del Radar de la innovación se realizó empleando el Análisis Factorial Exploratorio (AFE) y el alfa de Cronbach.

La investigación propone un instrumento cuyo contenido y cuyo constructo fueron validados para la estructura factorial final compuesta por 43 ítems incluidos en 13 factores o criterios; mediante el análisis estadístico se evidencia alta fiabilidad para las cuatro dimensiones que propone el Radar de la innovación.

Palabras clave: innovación, radar de la innovación, innovación en salud, instituciones prestadoras de servicios de salud, validación de instrumentos de medición.

Clasificación JEL: O32; I10.

MSC2010: 90B50; 62H25.

Construction and validation of an instrument to characterize the level of innovation in healthcare institutions

ABSTRACT

The research aims to develop and validate an instrument to characterize the impact level, in the healthcare institutions, of the application of the four essential dimensions of the Radar of innovation: the offers of the institution (what?), the clients (who?), the processes (how?) and the points of presence (where?).

A mixed exploratory study was chosen. Through the bibliographic review and the discussion with a panel of 11 experts, the content of the instrument of 49 items was constructed and approved on a 5-point Likert scale to characterize the use of innovation in the healthcare institutions; the construct and reliability were validated by applying a pilot test to 33 participants and the study of the results obtained for each of the dimensions of the innovation radar was carried out using exploratory factor analysis (AFE) and Cronbach's alpha.

The research proposes an instrument whose content and construct were validated for the final factorial structure composed of 43 items, included in 13 factors or criteria; through statistical analysis, high reliability is demonstrated for the four dimensions proposed by the Radar of innovation.

Keywords: innovation, innovation radar, innovation in health, healthcare institutions, validation instruments of measure.

JEL classification: O32; I10.

MSC2010: 90B50; 62H25.



1. Introducción.

La innovación surge como una alternativa de transformación para los cambios en el entorno y como una opción para la generación de ventajas competitivas en las empresas. Sin embargo, los esfuerzos realizados en salud no tienen sentido si desde el punto de vista del paciente no se perciben beneficios relacionados con una mejor salud y para la organización un aumento en la eficiencia de las operaciones internas y la calidad en la atención (Länsisalmi, Kivimäki, Aalto & Ruoranen, 2006).

Para generar evidencias que permitan a los usuarios y al sistema de salud percibir los beneficios de la innovación, se requiere caracterizar su impacto en la calidad de la atención, la seguridad del paciente y la reducción de costos innecesarios en la prestación de los servicios (Giacometti-Rojas, 2013; Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2009).

El Manual de Oslo clasifica la innovación en cuatro tipos de acuerdo al objetivo buscado: innovación en producto, innovación en mercado, innovación en proceso e innovación en la organización (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE], 2005); por su parte Barba (2012) manifiesta que existen 10 tipos de innovación de acuerdo a los expuestos por Doblin para los ámbitos estratégicos y los campos en los que es posible innovar en las organizaciones.

Para efectos de este estudio se utilizó un método de clasificación de innovación integrado denominado Radar de la innovación, propuesto por Sawhney, Wolcott y Arroniz (2007) que realiza una aproximación hacia la caracterización de la innovación mediante cuatro dimensiones esenciales: las ofertas de la empresa (¿qué?), los clientes que atiende (¿a quién?), los procesos que utiliza (¿cómo?) y los puntos de presencia que emplea para llevar sus ofertas al mercado (¿dónde?); en cada uno de estos cuatro puntos de referencia, el método incorpora 3 criterios para un total de 12 factores en los que las empresas pueden innovar.

Para la dimensión relacionada con los productos, servicios o el qué ofertado por la empresa, los criterios específicos en los que se puede innovar son: oferta, plataforma y soluciones; para la dimensión relacionada con el consumidor, usuario o a quién va dirigida la oferta, los criterios específicos son: clientes, experiencia del cliente y obtención de valor; en la dimensión de los procesos o el cómo, los criterios son: procesos, organización y cadena de suministro y, finalmente, para la dimensión presencia o en dónde, los criterios propuestos son presencia, conexiones y marca (Sawhney et al., 2007).

En esta investigación se desarrolla y valida un instrumento para la medición del impacto, en las instituciones prestadoras de servicios de salud, de los 12 criterios o factores de la innovación propuestos por Sawhney et al. (2007); el contenido del instrumento de 49 ítems tipo escala Likert fue aprobado por un panel de juicio de expertos y el constructo y la fiabilidad se validaron por medio de una prueba piloto cuyos resultados se analizaron mediante técnicas estadísticas como el Análisis Factorial Exploratorio (AFE) y el alfa de Cronbach.

Se obtiene un instrumento simplificado que representa las cuatro dimensiones propuestas por el Radar de la innovación, con 13 factores o criterios en los que las instituciones pueden innovar (uno más que el instrumento original) y un total de 43 criterios (6 menos que el instrumento original).

El instrumento desarrollado permite, a las instituciones prestadoras de servicios de salud, caracterizar el rol de la innovación de manera rápida, de bajo costo y teniendo en cuenta todas las áreas y procesos de las entidades.

2. Metodología.

Esta investigación se enmarca en un diseño exploratorio mixto que parte de la revisión de la literatura y la observación. Para recoger los datos analizados, se llevó a cabo un estudio de carácter no

experimental de tipo transeccional, dado que el trabajo de campo fue realizado en un momento específico, con el fin de identificar el estado de la variable de estudio, en este caso, la innovación en el sector salud (Hernández, Fernandez & Baptista, 2010).

A continuación, se describe la manera en la que se llevó a cabo el estudio en términos de número y características de los participantes, el instrumento desarrollado y empleado para la caracterización de la innovación en salud y el procedimiento empleado en el marco de ésta.

Participantes

Para la etapa de construcción y aprobación del contenido del instrumento, se conformó un panel de discusión con 11 expertos que tenían el siguiente perfil: 6 docentes e investigadores de instituciones de educación superior y 5 coordinadores de las áreas de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) de instituciones prestadoras de servicios de salud.

Se seleccionó el panel de expertos teniendo en cuenta las recomendaciones de Hyrkäs, Appelqvist-Schmidlechner y Oksa (2003) para quienes un panel de expertos, conformado por mínimo diez participantes, brinda una estimación confiable de la validez del instrumento.

En la prueba piloto, cuya finalidad fue validar el constructo y fiabilidad del instrumento, participaron voluntariamente 33 expertos en innovación en salud de la ciudad de Medellín, con la siguiente distribución de acuerdo al área de trabajo o al tipo de actividad realizada: 11 docentes e investigadores universitarios, 7 expertos del área de infraestructura y tecnologías hospitalarias, 7 expertos de áreas directamente relacionadas con la atención en salud y la prestación de servicios, 6 pertenecían al área comercial y de comunicaciones y 2 al área de planes y proyectos en salud.

Se seleccionó el tamaño de la muestra para la prueba piloto teniendo en cuenta las recomendaciones de Babbie (2000) que manifiesta que el tamaño de muestra para estudios piloto debe ser entre 30 y 50 participantes y todos los expertos deben poseer los atributos que se desean medir en la población objetivo.

Los atributos que se tuvieron en cuenta para la selección de los participantes de la prueba piloto fueron los recomendados por Skjong y Wentworth (2000): experiencia en el sector salud, experiencia y conocimientos en innovación, alta reputación en la comunidad, disponibilidad para participar e imparcialidad.

Instrumento

Se desarrolló un instrumento, en adelante HCI (Herramienta de Caracterización de la Innovación), basado en la metodología propuesta por Sawhney et al. (2007) en el Radar de la innovación.

De cara a la innovación en salud, se realizó una revisión bibliográfica y se tuvieron en cuenta los siguientes autores: del Llano, Martínez-Cantarero, Gol y Raigada (2002); Djellal y Gallouj (2005); Guan, Yam, Mok y Ma (2006); Jaramillo, Latorre, Albán y Lopera (2008); Keeley, Pikkell, Quinn y Walters (2013); Palencia-Sánchez y García-Ubaque (2016); Thune y Mina (2016); y con el apoyo del panel de expertos se definieron los ítems a evaluar en cada dimensión para conformar la HCI empleando el método propuesto por Sawhney et al. (2007).

Se seleccionaron 49 ítems para las cuatro dimensiones del Radar de la innovación, cada uno representado de la siguiente manera; para la dimensión ¿qué? un total de 11 ítems; para la dimensión ¿a quién? un total de 14 ítems; en la dimensión ¿cómo? se incluyeron 13 ítems y, finalmente, para la dimensión ¿dónde? un total de 11 ítems.

Los ítems de la HCI se evalúan a través de una escala tipo Likert, donde 1 es “muy en desacuerdo” y 5 es “muy de acuerdo”, permitiendo así medir la percepción y el grado de conformidad del experto con cada una de las afirmaciones propuestas para los criterios del Radar de la innovación.

Procedimiento

A continuación, se detallan cada una de las etapas del proceso de validación del instrumento.

a) Aprobación del contenido del instrumento diseñado.

La aprobación del contenido de un instrumento no puede expresarse cuantitativamente, se estima de manera subjetiva empleando para este caso el juicio de los expertos. Se recurre a este método para conocer la probabilidad de error en la configuración del instrumento (Corral, 2009).

Para aprobar el contenido de la HCI, conforme a lo planteado por Hyrkäs et al. (2003), en esta investigación se consideró que un ítem sería incorporado si el 80% de los expertos estaban de acuerdo con su validez.

Para evaluar cualitativamente el instrumento, el panel de expertos calificó, positiva o negativamente, cada uno de los ítems incluidos en la HCI para los siguientes criterios: claridad en la redacción, inducción a la respuesta, lenguaje adecuado y percepción de que los ítems realmente miden lo que se pretende.

Este proceso permitió evaluar el instrumento a partir de su claridad desde el punto de vista del significado y la formulación, efectuando las modificaciones que se consideraban oportunas para garantizar la buena redacción y, por consiguiente, brevedad y facilidad de comprensión.

b) Validez del constructo.

Entre las técnicas estadísticas más utilizadas para validar el constructo de un instrumento de medición, se destacan las dos modalidades del análisis factorial (AF): el análisis factorial exploratorio (AFE) y el análisis factorial confirmatorio (AFC); la diferencia principal entre ambos análisis radica en que el AFE es un procedimiento descriptivo que busca definir los grupos de variables o factores que están altamente correlacionados entre sí, mientras que el AFC se usa cuando el problema de investigación está vinculado a una teoría que se ha probado anteriormente (Detrinidad, 2016; Pérez-Gil, Chacón & Moreno, 2000).

Para este estudio, se utilizó el AFE ya que el objetivo fue determinar si los ítems estaban correctamente agrupados en cada uno de los criterios en los que se subdividen las cuatro dimensiones del Radar de la innovación e igualmente, describir los factores y determinar si los propuestos eran suficientes para explicar los resultados que proporcionan todas las preguntas del instrumento.

Para esta etapa del estudio, se aplicó una prueba piloto a 33 expertos, quienes evaluaron los 49 ítems incluidos en la HCI de escala Likert de acuerdo a la percepción del impacto considerado para el criterio y la dimensión que los contenían.

Los expertos fueron contactados a través de correos electrónicos institucionales, se inició con la socialización y explicación de la HCI para posteriormente realizar la evaluación.

El análisis factorial se realizó empleando el programa estadístico SPSS Statistics versión 23, inicialmente se calculó la medida de adecuación muestral de Kaiser, Meyer y Olkin (KMO) y el valor del nivel de significación de la prueba de esfericidad de Barlett para cada una de las dimensiones; se aprobó la realización del AFE si el KMO era superior a 0,5 y el nivel de significación de Barlett inferior a 0,05 para cada una de las dimensiones de la HCI (Montoya, 2007).

Para extraer los factores se suelen utilizar dos métodos estadísticos: el análisis de componentes principales (ACP) y el análisis de ejes principales (AEP). Para esta investigación se ha usado el ACP debido a que al analizar la varianza total, este método permite obtener los mejores resultados con la menor pérdida de información, ya que el ACP sugiere extraer únicamente los autovalores cuyo valor es superior a 1; sin embargo, al emplear este método estadístico, el principal problema radica en que los resultados en bruto son difíciles de analizar por lo que se aplica la rotación ortogonal u oblicua para generar una estructura simple (Pérez & Medrano, 2010; Zamora, Monroy & Chávez, 2009).

Para esta investigación se aplica la rotación ortogonal tipo Varimax, que facilita la interpretación debido a que se genera una estructura factorial simple cuyas variables están altamente cargadas en un solo factor (Zamora et al., 2009).

c) Análisis de fiabilidad.

Para demostrar que los ítems del instrumento tienen consistencia interna, se desarrolló un análisis de fiabilidad. Éste se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo sujeto u objeto, produce iguales resultados (Hernández et al., 2010).

El índice de fiabilidad para cada una de las dimensiones del instrumento se obtiene mediante el cálculo del estadístico alfa de Cronbach α utilizando la Ecuación 1.

$$\alpha = \left(\frac{K}{K-1} \right) \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k S_i^2}{St^2} \right)$$

donde:

K es el número de ítems (preguntas) del cuestionario

S_i^2 Corresponde a la varianza de cada ítem

St^2 Indica la varianza total del cuestionario (Suma de varianza de los evaluadores).

Ecuación 1. Cálculo del estadístico alfa de Cronbach.

La literatura especializada no presenta valores estándar para la interpretación del alfa de Cronbach; algunos autores aseguran que los aceptados se encuentran entre 0,6 y 0,8 en análisis exploratorios o primeras fases de la investigación (Huh, DeLorme, & Reid, 2006; Jaramillo & Osses, 2012), otros investigadores expresan que valores de coeficientes confiables oscilan entre 0,7 y 0,9 (Campo-Arias & Oviedo, 2008; Kaplan, Saccuzzo & Reyes, 2006).

Por otro lado, Ruiz (1998) propone una manera para establecer los rangos de magnitud del coeficiente de acuerdo a la escala presentada en la Tabla 1, que se empleó en este estudio para el análisis de los resultados.

Tabla 1. Rangos de valoración de confiabilidad mediante alfa de Cronbach.

Rangos	Magnitud
0,81 a 1,00	Muy alta
0,61 a 0,80	Alta
0,40 a 0,60	Moderada
0,21 a 0,40	Baja
0,01 a 0,20	Muy Baja

Fuente: Ruiz (1998).

3. Resultados.

A continuación, se presentan los resultados de la validación de la HCI; en primer lugar, se presentará el análisis de la validez del contenido del instrumento inicial empleando el panel de juicio de expertos, posteriormente se muestran los resultados de la validez del constructo y la fiabilidad del instrumento para, finalmente, proponer ajustes a la HCI de acuerdo al análisis estadístico.

3.1 Validación del contenido del instrumento.

Los 11 participantes que conformaron el panel de juicio de expertos, coincidieron en la importancia de aplicar el instrumento dividido en las dimensiones (¿qué?, ¿a quién?, ¿cómo? y ¿dónde?) y estuvieron de acuerdo con los 49 ítems tipo escala Likert desarrollados.

En la dimensión “¿dónde?”, algunos de los ítems incluidos en los criterios “presencia” y “conexiones” fueron formulados de tal manera que inducían sesgo por lo que los expertos sugirieron ajustar la redacción.

La Tabla 2 presenta el contenido de la HCI con los 49 ítems inicialmente definidos y teniendo en cuenta las recomendaciones de los expertos en la validación del contenido de la herramienta.

Tabla 2. Ítems incluidos en la primera versión de la HCI.

DIMENSIÓN ¿QUÉ?
OFERTA Q3 Apertura de servicios. Q4 Mejoramiento de los servicios existentes. Q5 Facilidad de acceso y personalización de la oferta. Q6 Generación de paquetes de servicios y productos (varios servicios y productos relacionados y su venta en un solo paquete).
PLATAFORMA Q7 Dotación y aprovechamiento de la tecnología biomédica. Q8 Aprovechamiento de la infraestructura física. Q9 Actividades de docencia e investigación. Q10 Suministro de diferentes líneas de productos y servicios (incluyendo líneas complementarias).
SOLUCIONES Q11 Generación de asociaciones y alianzas. Q12 Integración del portafolio (incluyendo servicios sanitarios y no sanitarios). Q13 Identificación del perfil de los clientes para brindar mejores soluciones.
DIMENSIÓN ¿A QUIÉN?
CLIENTES Q14 Relación entre la calidad y el precio. Q15 Segmentación de los clientes. Q16 Nuevos nichos de mercado (identificación de necesidades insatisfechas)

<p>EXPERIENCIA DEL CLIENTE</p> <p>Q17 Atención e información al cliente.</p> <p>Q18 Calidad y seguridad en la prestación de los servicios.</p> <p>Q19 Participación y pertenencia del usuario y sus acompañantes en todo el proceso de prestación de servicios.</p> <p>Q20 Servicios de preventa y posventa.</p> <p>Q21 Medios de atención</p>
<p>OBTENCIÓN DE VALOR</p> <p>Q22 Actividades comerciales e industriales diferentes a la prestación de servicios de salud.</p> <p>Q23 Participación en proyectos de impulso del sector.</p> <p>Q24 Publicidad.</p> <p>Q25 Formas de pago o financiación.</p> <p>Q26 Interacción con proveedores, competidores y otros aliados.</p> <p>Q27 Participación en redes y trabajo colaborativo.</p>
<p>DIMENSIÓN ¿CÓMO?</p>
<p>PROCESOS</p> <p>Q28 Sistemas de información e informática</p> <p>Q29 Implementación y uso de estándares nacionales e internacionales.</p> <p>Q30 Logística de la prestación de los servicios.</p>
<p>ORGANIZACIÓN</p> <p>Q31 Integración de la tecnología biomédica con las tecnologías de la información y la comunicación.</p> <p>Q32 Profesionales y especialistas en salud (talento humano).</p> <p>Q33 Educación continua y formación.</p> <p>Q34 Sistemas de incentivos.</p> <p>Q35 Gestión del conocimiento</p>
<p>CADENA DE SUMINISTRO</p> <p>Q36 Integración de la cadena de suministro.</p> <p>Q37 Generación de alianzas estratégicas.</p> <p>Q38 Implementación y uso de TI (Tecnologías de la información).</p> <p>Q39 Logística en la cadena de suministro.</p> <p>Q40 Gestión de la información.</p>
<p>DIMENSIÓN ¿DÓNDE?</p>
<p>PRESENCIA</p> <p>Q41 Generación de alianzas estratégicas para afianzar la presencia.</p> <p>Q42 Ubicación.</p> <p>Q43 Diversificación.</p> <p>Q44 Cobertura y atención internacional.</p>
<p>CONEXIONES</p> <p>Q45 Relación con otros miembros de la red de prestadores de servicios.</p> <p>Q46 Implementación y uso de medios de atención a distancia.</p>

Q47 Implementación de alianzas estratégicas y de colaboración.
Q48 Confidencialidad de la información y confiabilidad de la institución.
MARCA
Q49 Extensión de la marca a otros campos
Q50 Reconocimiento nacional e internacional de la marca.
Q51 Percepción, posición y aceptación de la marca vs la competencia.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 presenta los resultados de la aprobación del contenido del instrumento en cuanto al porcentaje de expertos que manifestaron que los ítems eran claros, empleaban el lenguaje adecuado, median la innovación en salud y en la redacción no se inducía la respuesta.

Tabla 3. Resultados de la medición para la aprobación del contenido del instrumento.

CRITERIOS DEL RADAR DE LA INNOVACIÓN	CRITERIOS A EVALUAR			
	Redacción	Inducción a la respuesta (sesgo)	Lenguaje adecuado	Los criterios en general miden lo que se pretende
Dimensión: ¿Qué?				
Oferta	90,9%	0%	100%	100%
Plataforma	90,9%	9,09%	100%	100%
Soluciones	100%	9,09%	100%	90,9%
Dimensión: ¿A quién?				
Clientes	81,81%	0%	100%	100%
Experiencia del cliente	100%	0%	100%	90,9%
Obtención de valor	100%	9,09%	100%	100%
Dimensión ¿Cómo?				
Procesos	90,9%	0%	100%	90,9%
Organización	100%	0%	100%	90,9%
Cadena de suministro	90,9%	0%	90,9%	100%
Dimensión: ¿Dónde?				
Presencia	100%	72,72%	100%	100%
Conexiones	90,9%	63,63%	100%	100%
Marca	90,9%	0%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Validez del constructo y fiabilidad.

Se aplicó el AFE y se calculó el coeficiente alfa de Cronbach para validar el constructo y la fiabilidad de cada una de las dimensiones del Radar de la innovación. A continuación, se presentan los resultados de este análisis.

AFE y fiabilidad para la dimensión “¿qué?”

Inicialmente se validó la aplicabilidad del AFE ya que se encontró un KMO entre 0,5 y 1; y la prueba de esfericidad de Barlett arrojó un resultado menor a 0,05 (Montoya, 2007).

La Tabla 4 presenta los autovalores iniciales para la dimensión “¿qué?”: se definen cuatro factores de extracción debido a que tienen valores mayores a 1 y explican el 70,83% de la varianza total de los datos originales.

Tabla 4. Autovalores iniciales para la dimensión “¿qué?”.

Ítem	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	% acumulado
1	4,348	39,523	39,523
2	1,297	11,791	51,315
3	1,124	10,215	61,529
4	1,023	9,296	70,825
5	0,836	7,604	78,430
6	0,650	5,906	84,336
7	0,502	4,566	88,902
8	0,427	3,885	92,787
9	0,415	3,771	96,558
10	0,249	2,268	98,826
11	0,129	1,174	100,000

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, inicialmente se habían planteado de acuerdo con el Radar de la innovación, 3 criterios o factores que son: oferta, plataforma y soluciones; por esto se decide aplicar el análisis de fiabilidad para determinar la posible eliminación de algún ítem y, por ende, de algún factor.

El alfa de Cronbach para esta dimensión fue de 0,75 pero este valor aumenta a 0,77 al eliminar el ítem Q6.

La Tabla 5 presenta los resultados de pruebas KMO y esfericidad de Barlett que confirman nuevamente la aplicabilidad del AFE; con el instrumento dimensional modificado y aplicando la rotación Varimax continúan los cuatro factores que explican el 74,30% de la varianza total de los datos y la distribución de los ítems se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados AFE instrumento modificado para la dimensión "¿qué?".

KMO	0,59			
Esfericidad de Barlett	0,00			
Matriz de factores				
	Factores			
	1	2	3	4
Q4 Mejoramiento de los servicios existentes.	0,772			
Q5 Facilidad de acceso y personalización de la oferta.	0,684			
Q12 Integración del portafolio (incluyendo servicios sanitarios y no sanitarios).	0,749			
Q13 Identificación del perfil de los clientes para brindar mejores soluciones.	0,803			
Q9 Actividades de docencia e investigación.		0,870		
Q10 Suministro de diferentes líneas de productos y servicios (incluyendo líneas complementarias).		0,639		
Q7 Dotación y aprovechamiento de la tecnología biomédica.			0,799	
Q8 Aprovechamiento de la infraestructura física.			0,755	
Q3 Apertura de servicios.				0,799
Q11 Generación de asociaciones y alianzas.				0,803

Fuente: Elaboración propia.

AFE y fiabilidad para la dimensión "¿a quién?"

Inicialmente se validó la aplicabilidad del AFE ya que se encontró un KMO entre 0,5 y 1; y la prueba de esfericidad de Barlett arrojó un resultado menor a 0,05 (Montoya, 2007).

La Tabla 6 presenta los autovalores iniciales para la dimensión "¿a quién?"; se definen cuatro factores de extracción puesto que tienen valores mayores a 1 y explican el 70% de la varianza total de los datos originales.

Sin embargo, inicialmente se habían planteado de acuerdo con el Radar de la innovación, 3 criterios o factores que son: clientes, experiencia del cliente y obtención de valor; por esto se decide aplicar el análisis de fiabilidad para determinar si se hace necesaria la eliminación de algún ítem y, por ende, de algún factor.

El alfa de cronbach para esta dimensión fue de 0,82 pero este valor aumenta a 0,85 al eliminar los ítems Q22 y Q25.

Tabla 6. Autovalores iniciales para la dimensión "¿a quién?".

Ítem	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	% acumulado
1	4,747	33,906	33,906
2	1,977	14,121	48,027
3	1,721	12,295	60,321
4	1,353	9,664	69,985
5	0,979	6,990	76,975
6	0,728	5,198	82,173
7	0,604	4,312	86,485
8	0,472	3,371	89,856
9	0,344	2,454	92,309
10	0,334	2,385	94,694
11	0,297	2,118	96,812
12	0,209	1,492	98,304
13	0,144	1,029	99,332
14	0,093	0,668	100,000

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7 presenta los resultados de pruebas KMO y esfericidad de Barlett que confirman nuevamente la aplicabilidad del AFE; con el instrumento dimensional modificado y aplicando la rotación Varimax continúan los cuatro factores que explican el 74,61% de la varianza total de los datos y la distribución de los ítems se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados AFE instrumento modificado para la dimensión "¿a quién?".

KMO	0,71			
Esfericidad de Barlett	0,00			
Matriz de factores rotada				
	Factores			
	1	2	3	4
Q17 Atención e información al cliente.	0,774			
Q18 Calidad y seguridad en la prestación de los servicios.	0,590			
Q19 Participación y pertenencia del usuario y sus acompañantes en todo el proceso de prestación de servicios.	0,789			
Q20 Servicios de preventa y posventa.	0,761			

Q14 Relación entre la calidad y el precio.		0,823		
Q15 Segmentación de los clientes.		0,616		
Q16 Nuevos nichos de mercado (identificación de necesidades insatisfechas)		0,557		
Q24 Publicidad.		0.852		
Q21 Medios de atención.			0,701	
Q26 Interacción con proveedores, competidores y otros aliados.			0,854	
Q23 Participación en proyectos de impulso del sector.				0,851
Q27 Participación en redes y trabajo colaborativo.				0.775

Fuente: Elaboración propia.

AFE y fiabilidad para la dimensión “¿cómo?”.

Inicialmente se validó la aplicabilidad del AFE ya que se encontró un KMO entre 0,5 y 1; y la prueba de esfericidad de Barlett arrojó un resultado menor a 0,05 (Montoya, 2007).

La Tabla 8 presenta los autovalores iniciales para la dimensión “¿cómo?”, se definen cuatro factores de extracción pues tienen valores mayores a 1 y explican el 68,47% de la varianza total de los datos originales.

Tabla 8. Autovalores iniciales para la dimensión "¿cómo?".

Ítem	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	% acumulado
1	5,655	43,502	43,502
2	2,039	15,682	59,184
3	1,207	9,286	68,470
4	0,941	7,241	75,711
5	0,809	6,224	81,936
6	0,634	4,880	86,816
7	0,586	4,506	91,322
8	0,350	2,694	94,016
9	0,268	2,060	96,076
10	0,207	1,592	97,668
11	0,153	1,180	98,848
12	0,105	0,811	99,659
13	0,044	0,341	100,000

Fuente: Elaboración propia.

El Radar de la innovación para esta dimensión propone tres criterios o factores que son: procesos, organización y cadena de suministro; por esto se decide aplicar el análisis de fiabilidad para determinar la consistencia interna del instrumento y evaluar si se requieren cambios en los ítems.

El alfa de Cronbach para esta dimensión fue de 0,88 que se considera “muy alto” y teniendo en cuenta que los tres factores explican adecuadamente la varianza total, no se eliminan ítems para esta categoría.

La Tabla 9 presenta los resultados de pruebas KMO y esfericidad de Barlett que confirman la aplicabilidad del AFE; con el instrumento dimensional modificado y aplicando la rotación Varimax se tienen tres factores con la distribución de los ítems que se ve en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados AFE instrumento modificado para la dimensión "¿cómo?".

KMO	0,63		
Esfericidad de Barlett	0,00		
Matriz de factores rotada			
Factores			
	1	2	3
Q29 Implementación y uso de estándares nacionales e internacionales.	0,860		
Q30 Logística de la prestación de los servicios.	0,711		
Q31 Integración de la tecnología biomédica con las tecnologías de la información y la comunicación.	0,685		
Q35 Gestión del conocimiento	0,559		
Q39 Logística en la cadena de suministro.	0,827		
Q28 Sistemas de información e informática.		0,777	
Q36 Integración de la cadena de suministro.		0,728	
Q37 Generación de alianzas estratégicas.		0,819	
Q38 Implementación y uso de TI (Tecnologías de la información).		0,872	
Q40 Gestión de la información.		0,581	
Q32 Profesionales y especialistas en salud (talento humano).			0,652
Q33 Educación continua y formación.			0,810
Q34 Sistemas de incentivos.			0,637

Fuente: Elaboración propia.

AFE y fiabilidad para la dimensión ¿dónde?

Inicialmente se validó la aplicabilidad del AFE ya que se encontró un KMO entre 0,5 y 1; y la prueba de esfericidad de Barlett arrojó un resultado menor a 0,05 (Montoya, 2007).

La Tabla 10 presenta los autovalores iniciales para la dimensión “¿dónde?”, se definen cuatro factores de extracción que tienen valores mayores a 1 y explican el 70,83% de la varianza total de los datos originales.

Tabla 10. Autovalores iniciales para la dimensión "¿dónde?"

Ítem	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	% acumulado
1	4,348	39,523	39,523
2	1,297	11,791	51,315
3	1,124	10,215	61,529
4	1,023	9,296	70,825
5	0,836	7,604	78,430
6	0,650	5,906	84,336
7	0,502	4,566	88,902
8	0,427	3,885	92,787
9	0,415	3,771	96,558
10	0,249	2,268	98,826
11	0,129	1,174	100,000

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, inicialmente se habían planteado de acuerdo con el Radar de la innovación, 3 criterios o factores que son: presencia, conexiones y marca; por esto se decide aplicar el análisis de fiabilidad para determinar si se requiere el cambio de algún ítem y, por ende, de algún factor.

El alfa de Cronbach para esta dimensión fue de 0,81 pero este valor aumentó a 0,86 al eliminar los ítems Q42 y Q48.

La Tabla 11 presenta los resultados de pruebas KMO y esfericidad de Barlett que confirman nuevamente la aplicabilidad del AFE, con el instrumento dimensional modificado y aplicando la rotación Varimax, los factores disminuyen a dos y explican el 60,62% de la varianza total; la distribución de ítems se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Matriz de factores para la dimensión "¿dónde?".

KMO	0,70	
Esfericidad de Barlett	0,00	
Matriz de factores rotada		
Factores		
	1	2
Q45 Relación con otros miembros de la red de prestadores de servicios.	0,563	
Q46 Implementación y uso de medios de atención a distancia.	0,752	
Q47 Implementación de alianzas estratégicas y de colaboración.	0,613	
Q50 Reconocimiento nacional e internacional de la marca.	0,808	
Q51 Percepción, posición y aceptación de la marca vs la competencia.	0,727	
Q41 Generación de alianzas estratégicas para afianzar la presencia.		0,804
Q43 Diversificación.		0,869
Q44 Cobertura y atención internacional.		0,624
Q49 Extensión de la marca a otros campos.		0,675

Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones.

En este trabajo se ha sometido a estudio la calidad del instrumento HCI. Como resultado se obtiene un instrumento simplificado, representado en las cuatro dimensiones que propone el Radar de la innovación, con 13 factores o criterios (uno más que el instrumento original) y un total de 43 ítems (6 menos que el instrumento original).

Schramm et al. (2008, p.2) afirman que la “la medición de la innovación está en la infancia” y crece la necesidad de establecer mecanismos que faciliten este proceso pues los directivos de las empresas requieren justificar las inversiones en I+D con el fin de mejorar la eficiencia de los recursos y estimar nuevas inversiones para el crecimiento de las empresas.

Las empresas invierten en innovación con el objetivo de ganar participación en el mercado, reducir costos o en un sentido más amplio, mejorar su productividad (OCDE, 2010); la medición del impacto de los resultados de estas inversiones constituye un elemento de gran utilidad para la toma de decisiones en políticas tecnológicas, aseguramiento de recursos, desarrollo de infraestructura, establecimiento de prioridades, entre otras actividades de interés (Torres, Ramos, Lizazo, Monteagudo & Noda, 2008).

El instrumento desarrollado permite medir el impacto de los 12 criterios del Radar de la innovación en las instituciones prestadoras de servicios de salud, de forma rápida, de bajo costo y teniendo en cuenta todas las áreas y procesos de las entidades.

La principal limitación de esta investigación está relacionada con la muestra de estudio, que aunque es representativa para los expertos en innovación en salud, para el AFE se sugieren muestras de gran tamaño para disminuir la probabilidad de que las correlaciones varíen de una muestra a otra; generalmente se recomienda un tamaño de muestra mínimo de 50; por esta razón las conclusiones obtenidas en este trabajo son significativas para la prueba aplicada (Lloret-Segura, Ferreres-Traver, Hernández-Baeza, & Tomás-Marco, 2014).

Los expertos contribuyeron en buena medida a que se diera la concreción del instrumento y por esto se tomaron las decisiones sobre el comportamiento de los criterios, pero se recomienda una validación con muestras más grandes.

El instrumento desarrollado constituye un acercamiento a una herramienta sencilla de medición de la innovación en las instituciones prestadoras de servicios de salud; sin embargo, debe ser sometido a una prueba en por lo menos una institución de salud para evaluar su aplicabilidad.

5. Recomendaciones.

Este artículo presenta el desarrollo y validación de una herramienta para caracterizar la innovación en las instituciones prestadoras de servicios de salud a partir de las cuatro dimensiones esenciales del Radar de la innovación.

Para la dimensión “¿qué?” se propone un nuevo modelo factorial al eliminar el ítem Q6 (generación de paquetes de servicios y productos), debido a que los cuatro factores explican el 74,30% de la varianza total (valor superior al explicado por el modelo inicial); además la confiabilidad de la dimensión es “alta” representada por un alfa de Cronbach de 0,77.

Para la dimensión “¿a quién?” de la HCI, el nuevo modelo factorial se propone a partir de la eliminación de los ítems Q22 y Q25 debido a que los cuatro factores generados explican mejor la varianza total y la confiabilidad de la dimensión es “muy alta” representada por un coeficiente alfa de Cronbach de 0,85.

La dimensión “¿cómo?” no se modificó debido a que al eliminar los ítems que aumentaban la fiabilidad de la dimensión, la nueva estructura factorial solo explicaría el 64,96% de la varianza total, valor menor al explicado por los factores iniciales.

En la dimensión “¿dónde?”, la nueva estructura factorial explica el 60,63% de la varianza total; este valor es inferior al explicado por la estructura factorial inicial, sin embargo en el primer modelo uno de los factores incluía solamente un ítem; el análisis de fiabilidad para esta dimensión propuso entonces la eliminación de los ítems Q42 (ubicación de la institución) y Q48 (confidencialidad de la información y confiabilidad de la institución) pues aumentan la fiabilidad del instrumento para esta dimensión. El modelo factorial propone entonces nuevos factores para cada dimensión en función de la herramienta reducida presentada en la Tabla 12.

Según la validación con los expertos, la eliminación de los ítems Q6 y Q22 se debe a que se desvinculan de la razón de ser del tipo de instituciones analizadas, pues implican ampliar la oferta con actividades diferentes a la prestación de los servicios en salud.

La eliminación de ítems relacionados con la ubicación y la confidencialidad de la información, se debe a que no constituyen una innovación para las instituciones de salud, pues para el primer ítem se estarían privilegiando solo las instituciones que cumplen con ciertas características de localización física lo que les da ventajas competitivas y para el segundo ítem es un tema normativo.

En el nuevo modelo, los factores que agruparon ítems similares a los presentados en la primera versión de la HCI se conservaron; sin embargo, el modelo propuso la generación de nuevos factores que se nombraron de acuerdo a la dimensión y el tipo de innovación que propone el nuevo orden de los ítems.

Se pueden nombrar los nuevos factores pues pertenecen al mismo constructo teórico propuesto por Sawhney et al. (2007) en cada una de las dimensiones del Radar de la innovación (de Carvalho et al., 2016).

Tabla 12. HCL, versión ajustada.

DIMENSIÓN: ¿QUÉ?
FACTOR 1: OFERTA
Q4 Mejoramiento de los servicios existentes.
Q5 Facilidad de acceso y personalización de la oferta.
Q12 Integración de portafolio.
Q13 Identificación del perfil del cliente para brindar mejorar las soluciones.
FACTOR 2: SOLUCIONES
Q9 Actividades de docencia e investigación.
Q10 Suministro de diferentes líneas de productos y servicios (incluyendo líneas complementarias).
FACTOR 3: PLATAFORMA
Q7 Dotación y aprovechamiento de la tecnología biomédica.
Q8 Aprovechamiento de la infraestructura física.
FACTOR 4: SISTEMA DE SERVICIOS
Q3 Apertura de servicios.
Q11 Generación de asociaciones y alianzas.
DIMENSIÓN: ¿A QUIÉN?
FACTOR 1: EXPERIENCIA DEL CLIENTE
Q17 Atención e información al cliente.
Q18 Calidad y seguridad en la prestación de los servicios.
Q20 Servicios de preventa y posventa.
FACTOR 2: CLIENTES
Q14 Relación entre la calidad y el precio.
Q15 Segmentación de clientes.
Q16 Nuevos nichos de mercado (identificación de necesidades insatisfechas).
Q24 Publicidad.
FACTOR 3: OBTENCIÓN DE VALOR
Q21 Medios de atención.
Q26 Interacción con proveedores, competidores y aliados.
FACTOR 4: RED
Q23 Participación el proyectos de impulso al sector.
Q27 Participación en redes y trabajo colaborativo.
DIMENSIÓN: ¿CÓMO?
FACTOR 1: PROCESOS
Q29 Implementación y uso de estándares nacionales e internacionales.
Q30 Logística de la prestación de los servicios.
Q31 Integración de la tecnología biomédica con las tecnologías de la información y la comunicación.
Q35 Gestión del conocimiento.

Q39 Logística en la cadena de suministro.
FACTOR 2: CADENA DE SUMINISTRO
Q36 Integración de la cadena de suministro.
Q37 Generación de alianzas estratégicas.
Q38 Implementación y uso de TI (Tecnologías de la información).
Q40 Gestión de la información.
FACTOR 3: ORGANIZACIÓN
Q28 Sistemas de información e informática.
Q32 Profesionales y especialistas en salud (talento humano).
Q33 Educación continua y formación.
Q34 Sistemas de incentivos.
DIMENSIÓN: ¿DÓNDE?
FACTOR 1: CONEXIONES
Q45 Relación con otros miembros de la red de prestadores de servicios.
Q46 Implementación y uso de medios de atención a distancia.
Q47 Implementación de alianzas estratégicas y de colaboración.
Q50 Reconocimiento nacional e internacional de la marca.
Q51 Percepción, posición y aceptación de la marca vs la competencia.
FACTOR 2: PRESENCIA
Q41 Generación de alianzas estratégicas para afianzar la presencia.
Q43 Diversificación.
Q44 Cobertura y atención internacional.
Q49 Extensión de la marca a otros campos.

Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, el instrumento HCI de 43 ítems presentado en la Tabla 12, ofrece mayor calidad que el cuestionario original, tanto a nivel general como para cada una de sus dimensiones específicas.

Referencias

- Babbie, E. (2000). *Fundamentos de la investigación social*. Mexico: International Thomson.
- Barba, E. (2012). *Los 10 tipos de innovación. El ejemplo de red bull. Gestionando la innovación*. Recuperado de <http://www.enricbarba.com/2012/11/los-10-tipos-de-innovacion-el-ejemplo-de-red-bull/>
- Campo-Arias, A., & Oviedo, H.C. (2008). Propiedades Psicométricas de una Escala: la Consistencia Interna. *Revista de Salud Pública*, 10(5), 831-839. DOI: 10.1590/S0124-00642008000500015.
- Corral, Y. (2009). Validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación para la recolección de datos. *Ciencias de la Educación*, 19(33), 228-247.

- de Carvalho, G.D.G., dos Anjos Almeida, M.C.A., Quandt, C.O., de Carvalho, H.G., Cruz, J.A.W., & da Veiga, C.P. (2016). Estructura de Agrupamiento das Dimensões do Radar da Inovação de Micro e Pequenas Empresas no Brasil. *Revista Espacios*, 37(23), 19-25.
- del Llano Señarís, J., Martínez-Cantarero, J.F., Gol, J., & Raigada, F. (2002). Análisis cualitativo de las innovaciones organizativas en hospitales públicos españoles. *Gaceta sanitaria / S.E.S.P.A.S*, 16(5), 408-416. DOI: 10.1016/S0213-9111(02)71950-X.
- Detrinidad, E. (2016). *Análisis Factorial Exploratorio y Confirmatorio aplicado al modelo de secularización propuesto por Inglehart-Norris. Periodo 2010-2014 (Estudio de caso España, Estados Unidos, Alemania, Holanda) WSV*. Universidad de Granada.
- Djellal, F., & Gallouj, F. (2005). Mapping innovation dynamics in hospitals. *Research Policy*, 34(6), 817-835. DOI: 10.1016/j.respol.2005.04.007.
- Giacometti-Rojas, L.F. (2013). Innovación tecnológica y desarrollo de ventaja competitiva en la atención a la salud: enfoque conceptual y metodológico. *Revista gerencia y políticas de salud*, 12(25), 66-82. DOI: 10.11144/Javeriana.rgsp12-25.itdv.
- Guan, J.C., Yam, R.C.M., Mok, C.K., & Ma, N. (2006). A study of the relationship between competitiveness and technological innovation capability based on DEA models. *European Journal of Operational Research*, 170(3), 971-986. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.07.054.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2010). *Metodología de la investigación*. México: Mcgraw-Hill
- Huh, J., DeLorme, D.E., & Reid, L. N. (2006). Perceived Third-Person Effects and Consumer Attitudes on Prevetting and Banning DTC Advertising. *The journal of Consumer Affairs*, 40(1), 90-116. DOI: 10.1111/j.1745-6606.2006.00047.x.
- Hyrkäs, K., Appelqvist-Schmidlechner, K., & Oksa, L. (2003). Validating an instrument for clinical supervision using an expert panel. *International Journal of Nursing Studies*, 40(6), 619-625. DOI: 10.1016/S0020-7489(03)00036-1.
- Jaramillo, S., & Osses, S. (2012). Validación de un Instrumento sobre Metacognición para Estudiantes de Segundo Ciclo de Educación General Básica. *Estudios pedagógicos (Valdivia)*, 38(2), 117-131. DOI: 10.4067/S0718-07052012000200008
- Jaramillo, H., Latorre, C., Albán, C., & Lopera, C. (2008). *El hospital como organización de conocimiento y espacio de investigación y formación: los recursos humanos en salud y su tránsito a comunidades científicas: el caso de la investigación clínica en Colombia*. Editorial Universidad del Rosario. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/j.ctt1b18wpz>.
- Kaplan, R.M., Saccuzzo, D.P., & Reyes, M. de L. (2006). *Pruebas psicológicas: principios, aplicaciones y temas*. Mexico: Thomson.
- Keeley, L., Pikkal, R., Quinn, B., & Walters, H. (2013). *Ten types of innovation. The building blocks of breakthroughs*. USA: Willey.
- Länsisalmi, H., Kivimäki, M., Aalto, P., & Ruoranen, R. (2006). Innovation in Healthcare: A Systematic Review of Recent Research. *Nursing Science Quarterly*, 19(1), 66-72. DOI: 10.1177/0894318405284129.

- Lloret-Segura, S., Ferreres-Traver, A., Hernández-Baeza, A., & Tomás-Marco, I. (2014). El análisis factorial exploratorio de los ítems: Una guía práctica, revisada y actualizada. *Anales de Psicología*, 30(3), 1151-1169. DOI: 10.6018/analesps.30.3.199361.
- Montoya, O. (2007). Aplicación del análisis factorial a la investigación de mercados. Caso de estudio. *Scientia et Technica*, 1(35), 281-286. Recuperado de <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5443>
- OCDE (2005). *Manual de Oslo: Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación*. EUROSTAT Y OCDE. DOI: 10.1787/9789264065659-es.
- OCDE (2010). *La medición de la innovación: una nueva perspectiva*. Recuperado de http://www.foroconsultivo.org.mx/libros_editados/medicion_innovacion.pdf
- OPS (2009). *Innovación para la Salud Pública en las Américas: Promoción de la investigación y el desarrollo de productos para la salud*. Panamá: Organización Panamericana de la Salud.
- Palencia-Sánchez, F., & García-Ubaque, J. C. (2016). Innovación e investigación en hospitales universitarios. *Revista Facultad de Medicina*, 64(4), 741-747. DOI: 10.15446/revfacmed.v64n4.54837.
- Pérez-Gil, J.A., Chacón, S., & Moreno, R. (2000). Validez de constructo: El uso de análisis factorial exploratorio-confirmatorio para obtener evidencias de validez. *Psicothema*, 12(SUPPL. 2), 442-446. DOI: 10.1177/0013164412473825.
- Pérez, E.R., & Medrano, L. (2010). Análisis factorial exploratorio: Bases conceptuales y metodológicas. *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento*, 2(1889), 58-66. DOI: 10.2307/2183556.
- Ruiz, C. (1998). *Instrumentos de investigación educativa: un enfoque cuantitativo y cualitativo para la recolección y análisis de datos*. Houston: DANAGA Training and Consulting.
- Sawhney, M., Wolcott, R., & Arroniz, I. (2007). The 12 different ways for companies to innovate. *IEEE Engineering Management Review*, 35(1), 45-45. DOI: 10.1109/EMR.2007.329139.
- Schramm, C.J., Arora, A., Chandy, R.K., Cooper, K., Jorgenson, D.W., Siegel, D.S.,... Menzer, J. (2008). *Innovation Measurement: Tracking the State of Innovation in the American Economy*. USA: Secretary of commerce, U.S. Department of Commerce. DOI: 10.2139/ssrn.1090630.
- Skjong, R., & Wentworth, B. (2000). Expert Judgement and Risk Perception. *Det Norske Veritas*, 1-8. Recuperado de <http://research.dnv.com/skj/Papers/SkjWen.pdf>
- Thune, T., & Mina, A. (2016). Hospitals as innovators in the health-care system: A literature review and research agenda. *Research Policy*, 45(8), 1545-1557. DOI: 10.1016/j.respol.2016.03.010.
- Torres, V., Ramos, N., Lizazo, D., Monteagudo, F., & Noda, A. (2008). Modelo estadístico para la medición del impacto de la innovación o transferencia tecnológica en la rama agropecuaria. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 42(2), 133-139.
- Zamora, S., Monroy, L., & Chávez, C. (2009). Análisis factorial: una técnica para evaluar la dimensionalidad de las pruebas. *Papeles de Psicólogo*, 31(1), 18-33.



Diseño de una carta de control basada en Análisis de Componentes Principales. Un caso de estudio

RAHMER, BRUNO DE JESÚS

Facultad de Ingeniería. Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco (Colombia)

Correo electrónico: brunodejesus.2509@gmail.com

SOLANA GARZÓN, JOSÉ

Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco (Colombia)

Correo electrónico: ingjosemsolanag@gmail.com

GARZÓN SAÉNZ, HERNANDO

Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco (Colombia)

Correo electrónico: hnando2001@gmail.com

ORTIZ PIEDRAHITA, GUSTAVO

Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco (Colombia)

Correo electrónico: gustavoap@gmail.com

RESUMEN

El abanico de métodos y técnicas cuantitativas utilizadas para la detección de variaciones de fondo en procesos de manufactura se circunscriben en una disciplina matriz, catalogada como control estadístico de procesos. Tales métodos poseen una aptitud sobresaliente para diagnosticar el estado general de sistemas productivos y realizar una evaluación simultánea de diversas características de calidad interrelacionadas. En el marco de esta investigación, se propone el análisis y monitoreo de un proceso químico sustentado en los principios teóricos del análisis en componentes principales. De este modo, las variables originales seleccionadas son representadas en un espacio dimensional más compacto, bajo la hipótesis de normalidad multivariante. Se construye en la fase posterior, un gráfico de control basado en los cuadrados de los errores de predicción con el objeto de evaluar el comportamiento de los factores subyacentes. Los resultados indican que el proceso no es marginalmente estable y existe un margen de reducción de variabilidad significativo.

Palabras clave: industria química, reducción de datos, análisis estadístico, control de calidad multivariante, variabilidad.

Clasificación JEL: C19; C38.

MSC2010: 62H25.

Design of a control charter based on principal component analysis. A case study

ABSTRACT

The set of quantitative methods and techniques used to detect assignable variations in manufacturing processes are contained within a discipline classified as statistical process control. Such methods carry out precise evaluations on the general state of productive systems and carry out simultaneous monitoring of various interrelated quality characteristics. In the framework of this research, the analysis of a chemical process based on the theoretical principles of principal component analysis is proposed, which enables the representation of the original variables in a compact dimensional space. In the later phase, a control graph based on the squares of the prediction errors is constructed in order to evaluate the behavior of the composite variables found. The results indicate that the process is not marginally stable and it is necessary to reduce its variability margin.

Keywords: chemical industry, data reduction, statistical analysis, multivariate quality control, variability.

JEL classification: C19; C38.

MSC2010: 62H25.



1. Introducción.

Las técnicas de análisis multivariante han sido reconocidas en múltiples dominios (incluyendo el monitoreo industrial) por su capacidad superlativa para la detección de anomalías en procesos donde ocurren comovimientos entre las variables y donde existen ingentes cantidades de registros disponibles (Rahim, Siddiqui & Elshafei, 2014). Las técnicas utilizadas para la construcción de marcos de monitorización apuntan a estabilizar el proceso, reducir su nivel de variabilidad y prever la aparición de eventos de fondo que repercuten negativamente en el performance de los sistemas productivos (Camacho, Pérez-Villegas, García-Teodoro & Maciá-Fernández, 2016).

Aunque es innegable que tales técnicas no gozan de una generalizada popularidad, es preciso indicar que éstas permiten reducir cuotas de esfuerzo al momento de evaluar sincrónicamente, múltiples variables, sin asumir pérdidas de elevadas fracciones de información. En este sentido, los métodos multivariantes para el control de procesos se ocupan generalmente de medir la direccionalidad de las observaciones en un espacio multivariante, en contraste con los métodos ortodoxos, que sólo monitorean la magnitud y la variación de características individuales sin someter a escrutinio los cambios simultáneos entre ellas. De este modo, se superan ciertas restricciones operativas inamovibles que se imponen sobre los marcos de control convencionales.

Ciertas técnicas estadísticas multivariantes como el Análisis de Componentes Principales (ACP) han sido catalogadas como métodos de reducción de dimensionalidad y son muy utilizadas cuando hay una gran cantidad de variables de naturaleza cuantitativa. Su uso permite obtener un sistema transformado de coordenadas denominadas componentes principales, combinación lineal de las primitivas (Filho & Sant'Anna, 2016), amén de ser capaces de retener la variación global exhibida por los datos originales (Owen, 2014). Este tipo de métodos y sus extensiones, no sólo permiten la proyección de datos en un sub-espacio dimensional más parsimonioso, sino que posibilitan la implementación de metodologías alternativas para el diseño de cartas de control, como aquellas que se construyen para el análisis de variables latentes. Es sabido que los usos directos de las herramientas estándares para el control de operaciones son ineficientes para el abordaje de circunstancias anómalas. Así, por ejemplo, la existencia de variables colineales (lo que conduce a que la matriz de covarianza se convierta en una matriz casi singular y difícilmente invertible) y el incumplimiento de ciertos supuestos teóricos, produce un incremento de las tasas de falsas alarmas.

La metodología seguida en este caso de investigación tiene un énfasis puramente empírico, pues el objetivo ulterior es evaluar el estado actual de un proceso productivo en una unidad empresarial, localizada en el clúster petroquímico plástico cartagenero. La importancia de este análisis de caso queda refrendada, en tanto que llena algunas lagunas a nivel epistémico discernibles en estudios de caso similares, reportados en este espacio geográfico.

El uso de herramientas de monitorización que integran metodologías de síntesis de información como el exhibido en este artículo, ostentan propiedades teóricas deseables para ser utilizadas en entornos fabriles, a efectos de caracterización y evaluación sistemática de procesos en los que subyace una multiplicidad de características de calidad altamente correlacionadas y donde la cantidad y la calidad de los datos disponibles es aceptable.

2. Metodología.

La presente investigación se segmenta en tres apartes que serán explicados pormenorizadamente a continuación. En la fase inicial se procede a identificar y caracterizar el comportamiento de un conglomerado de variables del proceso productivo analizado. La definición y análisis de tales propiedades mensurables favorece a la explicación de un panorama general de la estabilidad general del proceso y las correlaciones entre cada una ellas. El conjunto de datos obtenidos vía selección muestral

aleatorizada se efectúa inicialmente y luego se realiza un somero análisis exploratorio de los mismos (Herrera, Herrera & Rahmer, 2017).

En la fase subsiguiente, se ejecuta el análisis de componentes principales utilizando los datos originarios. En términos generales, el análisis de componentes principales envuelve un conjunto de datos con observaciones sobre p variables numéricas para cada una de las n entidades o individuos. Estos valores definen vectores n -dimensionales $x_1, x_2 \dots x_n$ de modo que se busca una combinación lineal dada por: $\sum_{j=1}^p a_j x_j$ (Jolliffe & Cadima, 2016), cuyos coeficientes son obtenidos a partir de los vectores propios de la matriz de covarianza de los datos recabados.

Para la extracción secuencial de los componentes principales se dispone del procedimiento algorítmico catalogado como mínimos cuadrados parcialmente iterativos no lineales. La determinación de la cantidad óptima de las variables sustitutivas se realiza a través de la aplicación del método de validación cruzada de Krzanowski. Se subraya adicionalmente que, dentro de este análisis la extracción de componentes principales, se efectúa sobre variables tipificadas, puesto que las unidades de medida difieren.

Una vez concluido el análisis de componentes principales se construye una carta de control multivariante, siendo ésta la fase neurálgica del presente artículo, ya que permite detectar la ocurrencia de eventos anómalos y movilizaciones del proceso fuera del hiper-plano definido por el modelo de referencia. Bajo esta misma intencionalidad, se bosqueja un análisis auxiliar basado en la construcción de gráficos de monitorización para cada componente extraído. En todos los casos, los límites de especificación se computan a partir de la información histórica del proceso.

3. Resultados.

Para la adquisición de los datos se ha aplicado un plan de muestreo aleatorio simple sin reposición. En este procedimiento de selección muestral todos los sujetos tienen idéntica probabilidad de ser seleccionados y sin oportunidad para otra eventual selección.

Se cuenta inicialmente con un volumen bruto de datos en el que difícilmente se pueden identificar relaciones matemáticas. Por tanto, debemos realizar un tratamiento oportuno de la información recogida para su utilización en procedimientos estadísticos posteriores. En la Tabla 1 se listan 9 variables correspondientes a un proceso de fabricación de poliestireno expandido: Presión (P), Temperatura de vapor de agua (T), Resistencia a la difusión del vapor de agua (R), Densidad (D), Diámetro de pellets (Diam), Contenido de Pentano (PE), Concentración del polímero (PO), Concentración de oxígeno (O).

Se relacionan en la Tabla 1, los límites de especificación para cada variable, junto con algunos estadísticos descriptivos de dispersión y de tendencia central. Adicionalmente se muestran los respectivos factores de escala.

El hecho de que las métricas de las variables observadas difieren significativamente supondría a priori, una problemática patente a efectos de estimación de las componentes principales, pues estas características no son comparables entre sí. Además, aquellas características cuya varianza sea alta, irremediablemente dominarán las primeras sub-dimensiones. Esto es particularmente cierto para el caso de variables como Presión, Temperatura y Resistencia a la difusión, pues sus medias son significativamente superiores a las demás variables restantes. Para sortear esta circunstancia indeseable se procede a la estandarización de las variables originarias, de modo que ellas serán equiponderadas al instante de iniciar el análisis.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas y escalamiento de las variables.

VARIABLE	Media	Desviación Estándar	Factor de Escala	Límite Inferior	Límite Superior
Presión (P)	19,510	9,659	9,659	20 Kpa	22 Kpa
Temperatura (T)	81,899	11,030	11,030	80°C	100 °C
Resistencia a la difusión (R)	22,366	5,620	5,620	20	40
Densidad Nominal (D)	9,086	5,332	5,332	9 Kg/m ³	11 Kg/m ³
Diámetro de pellets (Diam)	4,967	1,305	1,305	0,2 mm	1 mm
Contenido de Pentano (PE)	5,668	1,037	1,037	5%	7%
Concentración del polímero (PO)	0,233	0,050	0,050	0,03	0,07
Concentración de oxígeno (O)	0,967	0,328	0,328	0,92	0,98

Fuente: Elaboración propia.

3.1. Extracción de las Componentes Principales.

Intuitivamente, la finalidad esencial en este apartado es hallar un conjunto nuevo de direcciones ortogonales que definen la variabilidad máxima en términos de la estructura de varianza-covarianza de las variables originales. De esta manera, la información contenida en el conjunto completo de las componentes halladas es el equivalente exacto de la información original de los datos, conjeturándose que existen elementos redundantes y que sólo añaden dimensionalidad al problema estudiado (Montgomery, 2012). A través del ACP, los datos originales son proyectados en una representación dimensional mucho más compacta y parsimoniosa (Vanhatalo, Kulahci, & Bergquista, 2017), que posibilita el análisis y monitoreo de múltiples variables bajo un enfoque levemente simplificado.

Para el cálculo de la primera componente principal defínase:

$$y = e_1'X, e_1'e_1 = 1$$

De modo que:

$$Var(Y_1) = Var(l'X), \max_l Var(l'X) = Var(e_1'X) = e_1'\Sigma e_1$$

Para maximizar esta función multivariable sujeta a varias restricciones se dispone del método de Lagrange. Nótese que el vector desconocido e_1 proporciona la combinación lineal óptima. De este modo se tiene que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max\{l'\Sigma l\} \\ l'l = 1 \end{array} \right\} = \phi_1(l) = l'\Sigma l - \lambda(l'l)$$

Al derivar respecto a l y premultiplicar por 2 se obtiene que:

$$\Rightarrow \frac{\partial \phi_1}{\partial l} = 2\Sigma l - 2\lambda l = 0 \Rightarrow (\Sigma - \lambda I)l = 0$$

Se supone que $\Sigma_{p \times p}$ $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \lambda_p \geq 0$ con autovectores asociados $e_1, e_2, \dots e_p$ y como $l'\Sigma l = \lambda l'l = 1$, $Var(l'\Sigma l) = \lambda$ y tomando $l = e_1$ que corresponde al mayor autovalor, se resuelve el problema de optimización propuesto, de modo que la primera componente principal queda expresada como $Y_1 = e_1'X$ y $Var(Y_1) = \lambda_1$.

La racionalidad del procedimiento anterior puede aplicarse para hallar la $r(+1)$ -ésima componente.

Para este caso se tiene que $Y_{r+1} = l'X$; $l'l = 1$; $l'\Sigma e_i = 0, i = 1, \dots r$

$$\phi_{r+1}(l) = l'\Sigma e_1 - (\lambda l'l - 1) - 2 \sum_{i=1}^r v_i l'\Sigma e_i$$

Se demuestra que $\lambda_i \neq 0, i = 1, \dots r$ el problema conduce a $v_i = 0, i = 1 \dots r$. De esta manera el sistema que resuelve el problema de maximización viene dado por:

$$\{2\Sigma l - 2\lambda l = 0, \Sigma l - \lambda l = 0, \Sigma l - \lambda l = 0\}$$

Pueden ocurrir dos casos:

Si $\lambda_{r+1} \neq 0, \lambda = \lambda_{r+1}, l = e_{r+1}$ y la $r(+1)$ -ésima componente principal será:

$$Y_{r+1} = e_{r+1}'X$$

Y la varianza $Var(Y_{r+1}) = \lambda_{r+1}, \lambda$

En el otro caso posible cuando $\lambda_{r+1} = 0, \neq 0, i \neq r + 1$ se toma la combinación lineal de α_{r+1} y α_{r+1} y α_i para la que $\alpha_i \neq 0$ (De Ketelaere, Hubert & Schmitt, 2015; Severson, Molaro & Braatz, 2017).

3.2 Extracción de sucesivas componentes.

En lugar de ir obteniendo sucesivamente las componentes principales y resolver los sucesivos problemas de programación restringida y al final considerar globalmente todos, es preciso actuar globalmente desde un comienzo. Así, en lugar de ir resolviendo los sucesivos problemas de máximos condicionados, se parte de un resultado de maximización conocido.

Considérese el siguiente lema de maximización:

Sea A una matriz $p \times p$ definida positiva, con autovalores $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_p > 0$ y autovalores normalizados $e_1, e_2, e_3 \dots e_p$ y sea x un vector $p \times 1$ arbitrario no nulo. Entonces se cumple que:

$$\max_x \frac{x'Ax}{x'x} = \lambda_1$$

Alcanzado en $x = e_1$

$$\max_x \frac{x'Ax}{x'x \neq 0} = \lambda_p$$

Alcanzado en $x = e_p$

$$\max_{x \perp e_1, e_2, e_3 \dots e_p} \frac{x'Ax}{x'x \neq 0} = \lambda_{k+1}$$

Alcanzado en $x = e_{k+1}$ $k = 1, 2, \dots, p - 1$

Sea $X = (X_1, \dots, X_p)'$ un vector aleatorio con matriz de covarianza conocida Σ definida positiva y real y sean (λ_i, e_i) los autovalores-autovectores Σ de $\lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_p > 0$. La CP i -ésima Y_i antes definida viene dada por:

$$Y_i = e_i'X + e_{i1}X_1 + \dots + e_{ip}X_p, i = 1, \dots, p$$

Y se verifica:

$$Var(Y_i) = e_i'\Sigma e_i = \lambda_i$$

$$Cov(Y_i, Y_j) = e_i'\Sigma e_j = 0, i \neq j$$

Si hay autovalores iguales, pongamos λ_k , entonces los e_k asociados no son únicos, por lo que, en este caso las respectivas CP no son únicas.

Dada una matriz B , de dimensiones $p \times p$ con descomposición $\sum_{i=1}^p \lambda_i e_i e_i'$ sea la matriz $\mathbb{P} = (e_1, e_2, e_3 \dots e_p)$ conformada por columnas, con los autovectores normalizados e_i . Por consiguiente: $B = \mathbb{P}\Lambda\mathbb{P}' = \sum_{i=1}^p \lambda_i e_i e_i'$ siendo $\mathbb{P}'\mathbb{P} = I$ y $\Lambda = diag(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_p)$. En el caso $\lambda_i > 0$ se puede utilizar esta descomposición para definir la matriz $B^{1/2} = \mathbb{P}\Lambda^{1/2}\mathbb{P}' = \sum_{i=1}^p \sqrt{\lambda_i} e_i e_i'$ dado que $B^{-1} = \mathbb{P}\Lambda^{-1}\mathbb{P}' = \sum_{i=1}^p \frac{1}{\lambda_i} e_i e_i'$

3.3 Validación cruzada de *Krzanowski*.

Para la extracción secuencial de los componentes principales se ha utilizado el procedimiento algorítmico denominando *mínimos cuadrados parcialmente iterativos no lineales*. En cada iteración ocurre un ajuste lineal de las columnas de X sobre un vector de puntuaciones t para la obtención de un vector de cargas p , seguida de una regresión lineal. Instantáneamente, se regresan las filas de X sobre el vector de cargas para la re-estimación de t hasta que se cumpla el criterio de convergencia predefinido. Este procedimiento algorítmico puede sintetizarse en los siguientes pasos (Quaglino & Vitelleschi, 2009):

1. Se selecciona una columna de la matriz de datos y se hace igual a un vector t_h
2. El vector t_h se utiliza para predecir la matriz X con el modelo de regresión:

$$X = t_h b_h^T + U$$

siendo
$$\hat{b}_h^T = \frac{t_h^T X}{t_h^T t_h}$$

El estimador mínimo cuadrático de b_h^T y constituye la proyección de las columnas de X sobre la dirección de t_h , definida en el espacio de las N observaciones.

3. Se define el vector: $p_h = \hat{b}_h$
4. El vector p_h se normaliza, de manera que su longitud se hace igual a la unidad.
5. El vector p_h se utiliza para predecir la matriz X^T a partir del modelo visto en:

$$X^T = p_h b_h^T + F$$

6. Siendo el estimador mínimo cuadrático de b_h^T dado por:

$$\hat{b}_h^T = \frac{t_h^T X^T}{p_h^T p_h}$$

7. La proyección de las filas de la matriz X sobre la dirección del vector p_h definida sobre el espacio de las K variables se obtiene de este modo.

8. Se define el vector $t_h = \hat{b}_h$

9. Se calcula la norma cuadrática de la diferencia entre los vectores obtenidos en el paso anterior y en el inicial.

10. Se contrasta la norma cuadrática con el valor de tolerancia fijado en 10^{-6} . Si la diferencia es menor a este nivel se ha obtenido la h -ésima componente. En caso opuesto, se retorna al paso 2.

El procedimiento anteriormente descrito se aplica en reiteradas ocasiones para la obtención de n -componentes; sin embargo, para el retenimiento de una cantidad apropiada de sub-dimensiones y evitar el fenómeno de sobre-ajuste del modelo de PCA se aplica un método de validación cruzada como el de *Krzanowski*. Este esquema alternativo basado en el algoritmo de descomposición de valores singulares, tiene por objetivo determinar una cantidad óptima de componentes y facilitar la identificación de información redundante en la matriz de datos (Camacho & Ferrer, 2014). Para tal propósito, una prueba de significación estadística es aplicada sobre cada componente extraído a fin de determinar cuáles de ellos deben ser incorporados al modelo. El método propuesto asume que se pretende predecir los elementos x_{ij} de la matriz X a través del modelo:

$$x_{ij} = \sum_{t=1}^m v_{it} \gamma_t u_{tj} + e_{ij}$$

En este sentido, se predice el valor $\hat{x}_{ij}^{(m)}$ de x_{ij} ($i = 1, \dots, g; j = 1 \dots e$) para la selección de una cantidad de componentes m . La suma de los cuadrados de la diferencia entre los valores actuales y las estimaciones se cuantifica a través de la expresión:

$$PRESS(m) = \frac{1}{np} \sum_i^n \sum_j^p [\hat{x}_{ij}^{(m)} - x_{ij}]^2$$

Como se desea evitar sesgos predictivos, los x_{ij} no deben ser utilizados a efectos del cálculo de $\hat{x}_{ij}^{(m)}$ para cada i e j . El método de *Krzanowski* parte de la asunción de que la descomposición de valores singulares de la matriz X puede ser expresado como $X = UDV^T$.

Se define, subsiguientemente, el estadístico:

$$W_m = \frac{PRESS(m-1)PRESS(m)}{D_m} + \frac{PRESS(m)}{D_r}$$

siendo D_m los grados de libertad requeridos para ajustar los m -ésimos componentes y D_r los grados de libertad remanentes una vez ajustados los m -ésimos componentes W_m representa el incremento de la información predictiva en cada componente restante. El procedimiento estándar de validación cruzada consiste en subdividir X en varios grupos, eliminar cada grupo de los datos, evaluar los parámetros del predictor a partir de los datos restantes y predecir los valores eliminados (Dias & Krzanowski, 2006).

Siguiendo un criterio ortodoxo y sutilmente restrictivo, los componentes con mayor significancia estadística deberán poseer valores W_m mayores a la unidad. Incontestablemente, resultaría inapropiado detener la adición de componentes principales tan pronto como W_m , se localice por debajo de la unidad en la primera ocasión porque es una función de m no monotónica decreciente (Bógalo, 2012). Esto deja entrever que no existen cánones o criterios unificados para determinar qué proporción de variabilidad deba ser explicada por las componentes principales (Lazzarotto, Madalena, Chaves, & Texeira, 2016). Sin embargo, para propósitos de monitoreo, se seguirá esta pauta empírica.

En la Tabla 2 se compila un resumen de los resultados arrojados por el análisis de componentes principales. El parámetro R^2X cuantifica la bondad de ajuste del modelo al dar cuenta sobre la proporción de la variabilidad explicada por éste. Nótese que las tres componentes principales extraídas son capaces de explicar hasta aproximadamente el 93% de la variación total. Por otro lado, se muestra el valor de Q^2X , que es una expresión semejante al R^2X , excepto que evidencia un comportamiento menos inflacionario a medida que se acrecienta la complejidad del modelo. Ésta permite evaluar la capacidad predictiva del mismo, indicando que tal es aceptable, pues asume un valor próximo a la unidad.

El vector de eigenvalores, por su parte, puede ser conceptualizado como la magnitud de la varianza de las observaciones a lo largo de la dirección de su correspondiente autovector. Es un hecho fehaciente que el primer factor explica una fracción mayoritaria de la dispersión total de la nube y los sucesivos explican porciones cada vez más pequeñas de información de los datos originales.

Se postula, además, que la suma de las varianzas de las variables o inercia total de la nube de puntos es equivalente al sumatorio de las varianzas de las componentes principales. En este sentido, el porcentaje de inercia explicada por una componente i -ésima es:

$$\lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^p V(x_i)$$

siendo $\sum_{i=1}^p V(x_i) = \text{traza}(v)$, una expresión de la medida de variabilidad asociada a las variables originales (Pérez, 2004).

Tabla 2. Resumen de la extracción de las componentes.

COMPONENTE	R ² X	R ² X ACUM	AUTOVALOR	Q ² X	Q ² X ACUM	LÍMITE
1	0,7085	0,7085	5,6633	0,6051	0,6051	0,1347
2	0,1306	0,8391	1,0435	0,2059	0,6864	0,1525
3	0,0849	0,9240	0,6820	0,3362	0,7919	0,1763

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 3 se relacionan las saturaciones o cargas factoriales. En tanto que no son directamente observables, su determinación está parcialmente condicionada por criterios subjetivos. La carga de un factor cualquiera equivale a la correlación existente entre una variable original y un factor, obtenido por combinación lineal de las variables originales.

Ahora bien, sean las Componentes Principales Y_i asociadas al vector aleatorio X de matriz de covarianzas Σ conocida y sean (λ_i, e_i) sus autovalores-autovectores.

Para calcular ρ_{Y_i, X_k} ha de considerarse $h'_k = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$, definido por $h_{ki} = \delta_{ki}$. Entonces:

$$\text{Cov}(Y_i, Y_j) = \text{Cov}(e'_i X h'_k X) = e'_i \Sigma h_k = \lambda_i e_i$$

Con $\text{Var}(Y_i) = \lambda_i$, $\text{Var}(X_k) = \sigma_{kk}$, luego entonces:

$$\rho_{Y_i, X_k} = \frac{\lambda_i e_{ki}}{\sqrt{\lambda_i} \sqrt{\sigma_{kk}}} = \frac{e_{ki} \sqrt{\lambda_i}}{\sqrt{\sigma_{kk}}} = \frac{e_{ki} \sqrt{\lambda_i}}{\sigma_k} \quad i, k = 1 \dots p$$

A partir de la expresión obtenida para ρ_{Y_i, X_k} , se infiere que la componente k -ésima del eigenvector e_i que proporciona la componente principal Y_i , cuantifica la relevancia absoluta que la variable original k -ésima, X_k sobre ésta. De manera que, cuanto mayor sea $|e_{ik}|$ mayor es la correlación entre X_k y la Y_i .

Se deriva de lo anterior que valores positivos próximos a 1 indican una fuerte correlación entre un componente y una variable cualquiera como sucede con las variables Presión y Contenido de Pentano en el primer factor; por el contrario, saturaciones negativas cercanas a la unidad revelan un acentuado grado de asociación negativa entre ambos.

Tabla 3. Matriz correlaciones entre componentes y variables.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Presión (P)	0,803	0,587	0,066
Temperatura (T)	0,726	0,743	0,043
Resistencia a la difusión (R)	-0,895	0,186	0,847
Densidad Nominal (D)	-0,846	0,154	0,764
Diámetro de pellets (Diam)	0,876	-0,090	0,825
Contenido de Pentano (PE)	0,883	-0,211	0,321
Concentración del polímero (PO)	-0,783	0,709	-0,303
Concentración de oxígeno (O)	0,877	-0,087	-0,200

Fuente: Elaboración propia.

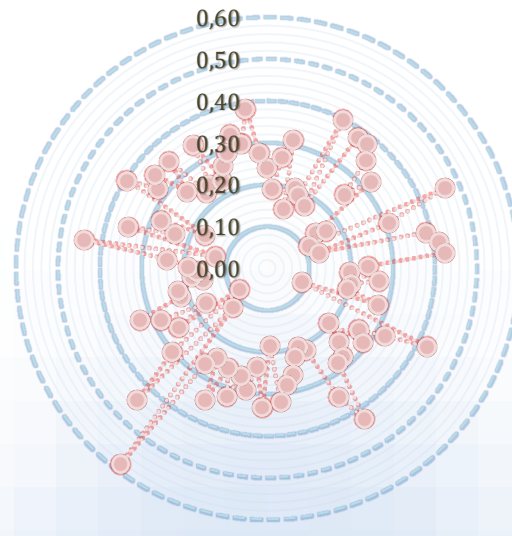
El parámetro estadístico utilizado para calcular la distancia euclidiana de las observaciones respecto al modelo se define por el ratio entre la distancia absoluta hacia al modelo S_i y la distancia normalizada respecto al mismo S_o tal y como se expresa en:

$$S_i = \sqrt{\sum_{k=1}^K e_{ik}^2 / (k - A)}$$

$$S_o = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M e_{ik}^2 / (k - P - P_0)(k - P)}$$

Como se observa en la Figura 1, las distancias normalizadas de las observaciones respecto al modelo oscilan entre 0.00 y 0.5, indicando que existen pocos outliers moderados.

Figura 1. Distancias normalizadas respecto al modelo.

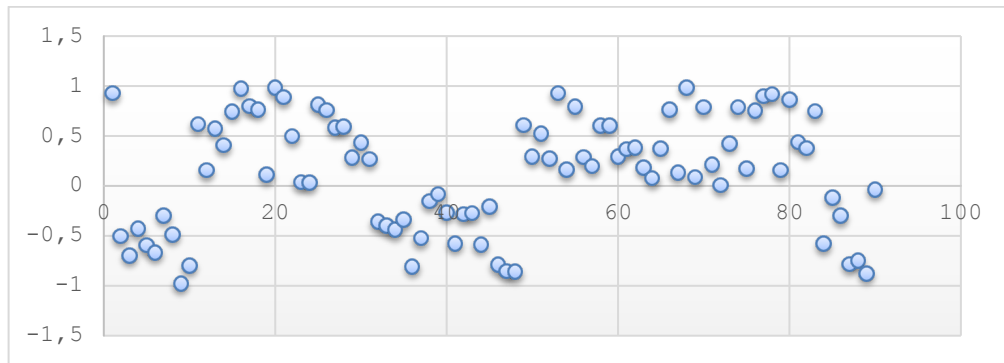


Fuente: Elaboración propia.

Al reducir la dimensionalidad y modelar los datos originales es que una vez extraída una cantidad óptima de variables sucedáneas es posible predecir, con cierto grado de exactitud los valores asumidos por el conglomerado de datos originales. El nivel de precisión predictiva incrementa en la medida que se incorporan más componentes al modelo, hasta cierto punto. Ahora bien, siempre existirá una discrepancia natural entre las observaciones originales y las predicciones generadas por el modelo de PCA. Tales, se denominan residuos y en condiciones ideales deberían exhibir valores bajos, sin desviaciones obvias de aleatoriedad.

Un somero examen visual de la Figura 2 permitirá concluir que existe un comportamiento no sistemático de los residuos, que además oscilan en un espectro reducido de valores, partiendo desde -1,0 hasta 1,0 sin incluir estas cantidades numéricas. Ello sugiere que el modelo de PCA se ajusta apropiadamente a los datos originales.

Figura 2. Gráfico de residuos.



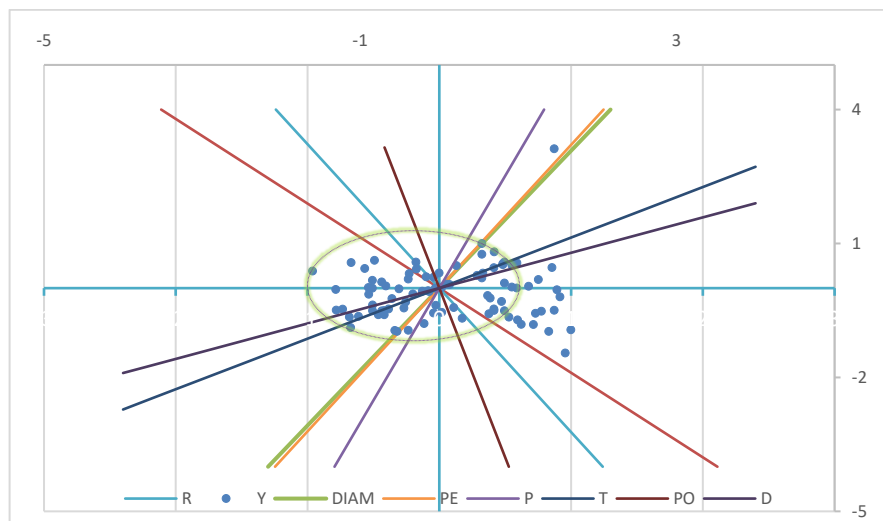
Fuente: Elaboración propia.

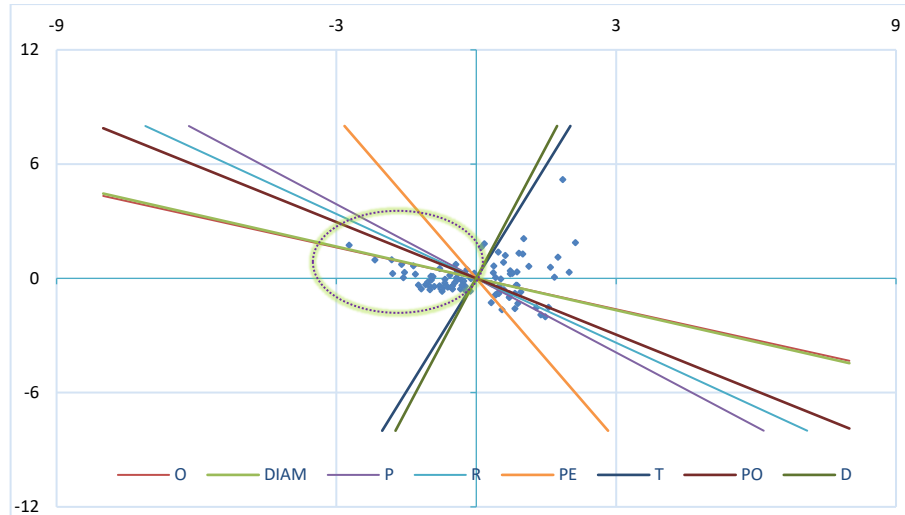
La Figura 3 no es nada más que una representación gráfica combinada de los *scores* estandarizados del componente principal 1 versus los componentes 2 y 3 junto con las proyecciones de las variables estandarizadas. La elipse que encierra la nube de puntos queda definida por:

$$e = \sqrt{(t_1/\sigma_1)^2 + (t_2/\sigma_2)^2}$$

Siendo σ_i la desviación estándar de los scores. Se observa que existen casos anómalos situados al exterior de los límites definidos, a pesar de que la nube de puntos se distribuye de forma homogénea.

Figura 3. Carta de control SPE.





Fuente: Elaboración propia.

3.2. Diseño de Carta de Control.

Ciertos diagramas de control multivariados están basados en la transformación de un vector \mathbb{R}^p a un escalar a través de una función cuadrática que detecta la existencia de outliers o direcciones extremas.

Cuando se ha descartado la presencia de una estructura de correlación serial en las observaciones y el proceso verifica la condición de estacionariedad, los gráficos de control de esta naturaleza pueden ser implementados si la meta es el ajuste en la monitorización de procesos que exhiben alta dimensionalidad. A diferencia de los diagramas de control de T_{PCA}^2 éstos son aptos para descubrir un cambio en la media del proceso si el desplazamiento es ortogonal a los primeros k vectores propios de la matriz de covarianza S (Phaladiganon, Bum, Chen & Jiang, 2013). La construcción de la carta de control que se reporta en la Figura 4, está basada en los cuadrados de los errores de predicción (SPE) dados por la expresión:

$$SPE_y = \sum_{k=1}^i (y_{nueva,i} - \hat{y}_{nueva,i})^2$$

El estadístico SPE representa la distancia ortogonal cuadrática de una nueva observación multivariada respecto al sub-espacio multivariante de las componentes principales. En otros términos, es una medida que cuantifica la falta de ajuste de la nueva muestra respecto al modelo que incluye los componentes retenidos, al detectar los datos proyectados que no son representados por éste. Para una muestra x_i los residuos denotados por r_i vienen dados por:

$$r_i = x_i - \hat{x}_i = x_i(I - P_l P_l^T)$$

Mientras que la magnitud de los residuos es equivalente a (Slišković, Grbić & Hocenski, 2012) la expresión dada por:

$$Q = \|r_i\| = r_i r_i^T = x_i(I - P_l P_l^T)x_i^T$$

Siendo, r_i la i -ésima fila de la matriz residual que representa los errores de predicción del modelo, $P_l = [p_1, \dots, p_n]$ e I la matriz identidad o unitaria.

Los límites de control aproximados para Q pueden ser determinados siempre y cuando los datos puedan ser descritos por una distribución normal multivariante y los autovalores de la matriz covarianza sean conocidos. Así, el umbral Q_α responde a la siguiente expresión:

$$Q_\alpha = \theta_1 \left(\frac{z_\alpha \sqrt{2\theta_2 h_0^2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (1 - h_0)}{\theta_1^2} \right)^{\frac{1}{h_0}}$$

Siendo Q_α el límite superior de confianza para Q con un nivel de significancia α y z_α la estadística de la distribución normal estandarizada correspondiente al percentil superior $(1 - \alpha)$.

Entretanto,

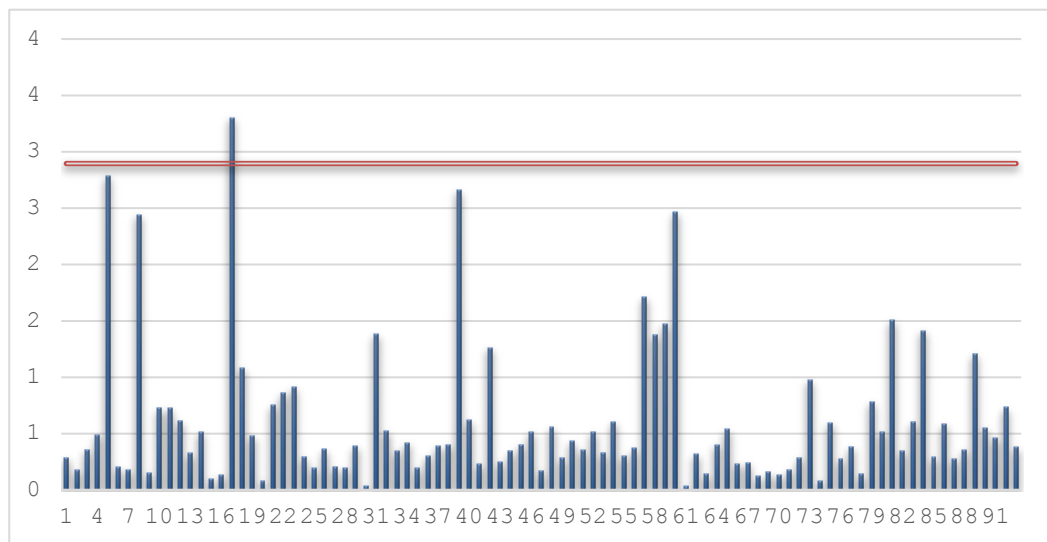
$$h_0 = 1 - \frac{2\theta_1\theta_3}{3\theta_2^2}$$

y

$$\theta_1 = \sum_{j=k+1}^p \lambda_j^i$$

Siendo λ_j el valor propio de la matriz de covarianzas. Los errores entre los valores prospectados y los reales pueden medirse para determinar su significación estadística y caracterizar las actuales condiciones de operación. En caso tal que Q superase el umbral, es decir, que $Q > Q_\alpha$ entonces se sostendrá que existen indicios de la presencia de eventos que afectan la estructura de covarianza de X , tal y como se evidencia en la Figura 4, y por ello se concluye que en el proceso concurren fluctuaciones anómalas que no son explicadas por el modelo.

Figura 4. Carta de control SPE.



Fuente: Elaboración propia.

La presencia de muestras fuera de los límites del diagrama de control construidos a partir de los puntajes de los componentes o la existencia de tendencias y comportamientos sistemáticos en el gráfico

de scores muestra que el proceso está "fuera de control", es decir, que ha ocurrido una ruptura en la estructura de correlación del modelo estimado (Costa, Pedroza, Porto, Amorim & Lima, 2015).

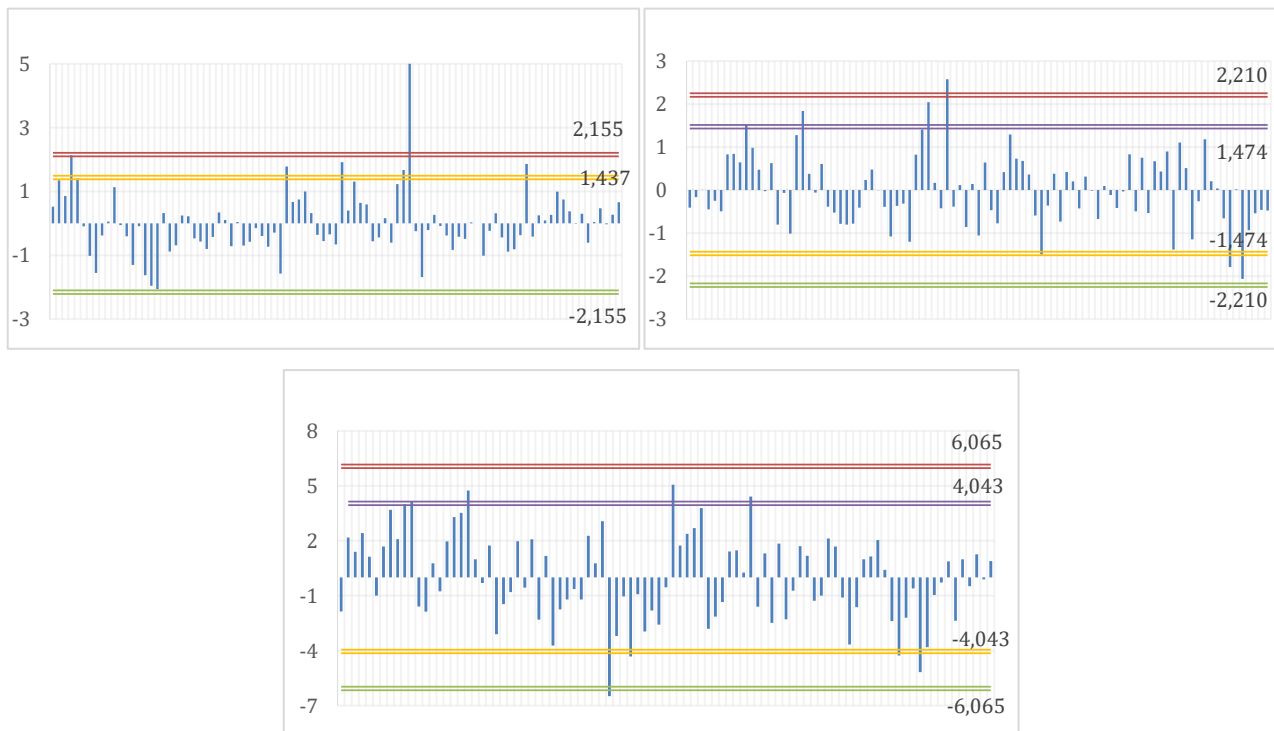
Ahora bien, puede esbozarse un análisis auxiliar fundamentado en los resultados provistos por las cartas de control univariadas construidas a partir de los *t-scores* de los componentes individuales, en las que se exhibe el comportamiento de las variables contribuyentes a la generación de señales alarmantes. Ello se percibe en la Figura 5. Bajo la asunción de normalidad, los límites de control para un nuevo \vec{t} -score en un intervalo de tiempo k y a un nivel de significancia α vienen dados por la expresión:

$$\pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} S_{ref} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{1/2}$$

Siendo S_{ref} la desviación estándar estimada para la muestra de \vec{t} -scores en un intervalo de tiempo denotado por k . La expresión $t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}$ es el valor crítico de la variable estudentizada con $n - 1$ grados de libertad y nivel de significancia $\frac{\alpha}{2}$ (Zude, 2008).

Es posible detectar en la Figura 5 que emergen señales fuera de control en las cartas de monitorización asociados a los componentes 1, 2 y 3. Por consiguiente, se afirma que el proceso está contaminado por la presencia de outliers, originando la ruptura temporal de la estabilidad del proceso. Se percibe que en ciertos intervalos de tiempo el proceso regresa a un estado donde sólo operan causas comunes de variabilidad. Empero, la existencia de comportamientos anómalos sigue siendo persistente. Esto permite concluir que los comovimientos de las variables contenidas en las sub-dimensiones halladas transgreden los límites naturales de variación para todos los casos evaluados. Por tal razón, convendría utilizar gráficos de control univariados que permitirían identificar plenamente las variables que contribuyen a la irrupción de anomalías en el proceso.

Figura 5. Carta de control para Scores.



Fuente: Elaboración propia.

4. Consideraciones finales.

En el presente caso de estudio se propuso un marco de monitorización para un proceso industrial de una empresa localizada en el clúster petroquímico plástico cartagenero. Se refrenda el hecho de que las cartas de control construidas a partir del análisis de componentes principales permiten evaluar el estado de sistemas productivos multidimensionales. Sin entrar en cargantes elucubraciones teóricas, se puede afirmar que el hallazgo de estas componentes permite reducir sustancialmente la dimensionalidad del problema estudiado, mediante la creación de estructuras de interdependencia que involucran las variables observadas.

Los resultados obtenidos corroboran que las tres componentes retenidas explican una fracción mayoritaria de la variabilidad original de la nube de datos y que la carta de control construida a partir de las sub-dimensiones registra la existencia de outliers o valores extremos. Se deriva entonces, la tesis de que el proceso no se halla en un estado de control estadístico, juicio revalidado al inspeccionar meticulosamente el comportamiento mostrado por los gráficos de control asociados a las componentes individuales. Por ello, es menester el direccionamiento de acciones destinadas a mejorar la consistencia del proceso productivo a fin de garantizar que las características de calidad exhiban un comportamiento relativamente homogéneo y sin traspasar los límites de variación natural. En un caso como éste sería provechosa la aplicación de herramientas de monitoreo univariadas, ya que una limitante de la metodología propuesta es su incapacidad para individualizar las variables que contribuyen sustancialmente a la generación de señales fuera de control en el corto plazo.

A la luz de los resultados hallados, puede anotarse que el abanico de posibilidades de aplicación de la metodología expuesta aquí es extenso. Se insta a abordar líneas de investigación focalizadas en la resolución de problemas investigativos no tan diferentes al aquí propuesto, en los que no se verifique íntegramente las hipótesis de partida que han de ser materializadas para garantizar una aplicabilidad óptima de las cartas de control multivariantes. Asimismo, se insta a diseñar herramientas de monitorización alternativas para el control de procesos fabriles en los que subyacen múltiples variables.

Agradecimientos

Se extiende especial agradecimiento al cuerpo científico del grupo C.I.P.T.E.C de la Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco por el apoyo técnico, financiero y académico dispensado para la consecución de los propósitos inherentes a esta investigación.

Referencias

- Bógalo, J. (2012). Componentes subyacentes comunes en series temporales. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de <http://espacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:masterMatavanz-Jvbogalo/Documento.pdf>
- Camacho, J., & Ferrer, A. (2014). *Cross-validation in PCA models with the element-wise k-fold (ekf) algorithm: Practical Aspects. Chemometrics and Intelligent. Laboratory Systems*. Valencia: Elsevier.
- Camacho, J., Pérez-Villegas, A., García-Teodoro, P., & Maciá-Fernández, G. (2016). PCA-based multivariate statistical network. *ScienceDirect*, 59, 118-137.

- Costa, F., Pedroza, R., Porto, D., Amorim, M., & Lima, K. (2015). Multivariate Control Charts for Simultaneous Quality Monitoring of Isoniazid and Rifampicin in a Pharmaceutical Formulation Using a Portable Near Infrared Spectrometer. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 26(1), 64-73.
- De Ketelaere, B., Hubert, M., & Schmitt, M. (2015). Overview of PCA-Based Statistical Process-Monitoring Methods for Time-Dependent, High-Dimensional Data. *Journal of Quality Technology*, 47(4), 318-335.
- Dias, C., & Krzanowski, W. (2006). Choosing components in the additive main effect and multiplicative interaction (AMMI) models. *Scientia Agricola*, 63(2), 169-175.
- Filho, D., & Sant'Anna, A. (2016). Principal component regression-based control charts for monitoring count data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1565-1574.
- Herrera, J., Herrera, G., & Rahmer, B. (2017). Control Estadístico de Procesos para datos Correlados Serialmente. Un Caso de Estudio. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 891-904). Bogotá.
- Jolliffe, I., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent. *The Royal Society Publishing*, 374, 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.
- Lazzarotto, E., Madalena, L., Chaves, A., & Teixeira, L. (2016). Principal components in multivariate control charts applied to data instrumentation of dams. *Independent Journal of Management & Production*, 7(1), 17-37.
- Montgomery, D. (2012). *Statistical Quality Control* (Séptima ed.). Jon Wiley & Sons.
- Owen, J.A. (2014). Principal Component Analysis: Data Reduction and Simplification. *McNair Scholars Research Journal*, 1, 1-12.
- Pérez, C. (2004). *Técnicas de Análisis Multivariante de Datos*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Phaladiganon, P., Bum, S., Chen, V., & Jiang, W. (2013). Principal component analysis-based control charts for multivariate nonnormal distributions. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 40(8), 3044-3054.
- Quaglino, M., & Vitelleschi, M. (2009). Comparación de Métodos para el Tratamiento de Información Faltante en un Análisis de Componentes Principales sobre Datos Biológicos. *Revista de la Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas*, 13, 115-124.
- Rahim, M. A., Siddiqui, Y., & Elshafei, M. (2014). Integration of Multivariate Statistical Process Control and Engineering Process Control. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 470-480). Bali.
- Severson, K., Molaro, M., & Braatz, R. (2017). Principal Component Analysis of Process Datasets with Missing Values. *Processes*, 5(3), 38.
- Slišković, D., Grbić, R., & Hocenski, Ž. (2012). Multivariate statistical process monitoring. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 19(1), 33-41.

- Vanhatalo, E., Kulahci, M., & Bergquista, B. (2017). On the structure of dynamic principal component analysis used in statistical process monitoring. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 167, 1-11.
- Zude, M. (2008). *Optical Monitoring of Fresh and Processed Agricultural Crops*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.



Productive efficiency analysis of quantitative economics journals through Stochastic Frontier Analysis using panel data

GAVILAN, JOSÉ M.

Faculty of Economics and Business Studies

University of Seville (Spain)

Correo electrónico: gavi@us.es

ORTEGA, FRANCISCO J.

Faculty of Economics and Business Studies

University of Seville (Spain)

Correo electrónico: fjortega@us.es

ABSTRACT

The main goal of a scientific journal is to diffuse new knowledge. The number of citations received by a journal can be considered as a measure of this objective and, in turn, as a measure of productivity in relation to the production process in which the journals are involved. In order to assess this production process, in this paper econometric models using data panel are employed to obtain measures of efficiency for those journals belonging simultaneously to the areas of “economics” and “social science, mathematical methods” in the Web of Science database. This efficiency is measured in terms of the distance between the actual production of the journals and their estimated maximum achievable number of citations based on their available resources.

Keywords: production, productivity, efficiency, scientific production, frontier production models, panel data models.

JEL classification: C23; C46; C51; D24.

MSC2010: 62J99; 62F10; 90B30.

Análisis de eficiencia productiva de revistas de economía cuantitativa a través del análisis de frontera estocástica utilizando datos de panel

RESUMEN

El principal objetivo de una revista científica es difundir nuevo conocimiento. El número de citas recibidas por una revista se puede considerar como una medida de este objetivo y, a su vez, como una medida de productividad en relación al proceso de producción en el que las revistas están involucradas. Para evaluar este proceso de producción, en este artículo se emplean modelos econométricos que usan datos de panel para obtener medidas de eficiencia para aquellas revistas que pertenecen simultáneamente a las áreas “economics” y “social science, mathematical methods” en la base de datos Web of Science. Esta eficiencia se mide en términos de la distancia entre la producción real de las revistas y su número de citas máximo alcanzable estimado en base a sus recursos disponibles.

Palabras clave: producción, productividad, eficiencia, producción científica, modelos de producción con frontera, modelos de datos de panel.

Clasificación JEL: C23; C46; C51; D24.

MSC2010: 62J99; 62F10; 90B30.



1. Introduction.

In general terms, any production process consists of fabricating a series of products (outputs) using certain available resources (inputs). Comparing the productivity of the different entities involved in the production process, which is the production obtained in relation to the resources used, constitutes the main goal in this framework. This comparison, or benchmarking, is usually established in terms of efficiency in the production process. The efficiency of an entity is set as the difference between its actual production and its frontier or maximum attainable production with its available resources. To this end, several mathematical and econometric models have been developed in the field of Economics.

In the setting of the process of publishing papers by the different scientific journals, it is clear that the objective is to diffuse new knowledge, whose extent of diffusion could be measured through the number of readers of such articles. Scientists reading the papers published in a journal, use the content of these papers to develop their own articles, and provide citations to the papers they have read. As a consequence, the number of citations received by the journal can be considered as a proxy of the diffusion of the knowledge (output of the production process). In order to apply the aforementioned models, a set of homogeneous journals (each of which reaching approximately the same number of potential readers) has to be selected, and several inputs have been chosen. Great care must be taken in the selection of these inputs since they determine the production frontier and, in consequence, the efficiency of each journal. Candidate inputs in the framework of this production process could include those related to the number of people involved in the process, the available budget, and the number of articles published.

Once the inputs and outputs have been selected, there are two alternative approaches to assess the efficiency of the selected group of journals: data envelopment analysis (DEA) and stochastic frontier analysis (SFA). In Coelli, Rao and Battese (1998) and Bogetoft and Otto (2011), detailed explanations of the two methodologies are shown. These two approaches establish the production frontier in terms of the selected inputs and outputs, and the efficiency is then measured. The DEA is a non-parametric non-stochastic approach based on linear programming. Therefore, in this approach, no source of randomness is taken into account. This drawback is solved in the SFA approach by the inclusion of random perturbations in econometric models.

In the specific setting of scientific documentation, the DEA approach has been widely utilised. As a matter of fact, all the following papers use this approach. Abbott and Doucouliagos (2003) carry out an analysis of the efficiency of Australian universities. Similar studies include Bonaccorsi, Daraio and Simar (2006), where Italian universities are analysed, and Bonaccorsi and Daraio (2003), who consider institutes of the French INSERM and biomedical research institutes of the Italian CNR. Ruiz et al. (2010) examine the efficiency in the scientific production of a sample of Colombian research groups. Agasisti, Catalano, Landoni and Varganti (2012) analyse the production of 69 academic departments located in Italy. The DEA approach has also been applied to studies of efficiency in scientific production in a number of countries and regions. In Rousseau and Rousseau (1998), this approach is applied to a sample of 18 countries of the world, while in Guan and Chen (2010), 30 Chinese provinces are considered. In relation to the analysis of the efficiency applied to a group of journals, Lozano and Salmeron (2005) show the results of a DEA analysis applied to a group of journals of Operations Research/Management Sciences. Petridis et al. (2013) provide an evaluation of 54 forestry journals.

In this framework of scientific documentation, the SFA approach is used in Ortega and Gavilan (2013) to benchmark a group of quantitative economics journals. In that paper, the efficiency of the considered journals is estimated for the year 2011 using a cross-section database, which provides a snapshot of the situation of that year. However, this situation could be a fluke related to that particular year. Panel data provides evidence of a more reliable nature on the performance of the journals, and also enables this performance to be tracked over time. The SFA approach using panel data has been extensively applied to many fields, as, for example, in economics (Zhou, Li, & Li 2011; Kumbhakar & Zhang, 2013), healthcare (Greene, 2004; O'Donnell & Nguyen, 2013), universities (Abbott &

Doucouliafos, 2009; Sav, 2011), sports (Barros, Garcia-del-Barrio, & Leach, 2009; Park & Lee, 2012), fishing (Melfou, Theocharopoulos, & Papanagiotou, 2009), banking (Brissimis, Delis, & Tsionas, 2010; Parinduri & Riyanto, 2014), ports (Wang, Knox, & Lee, 2013), airlines (Kumbhakar, 1991; Merkert, Odeck, Brathen & Pagliari, 2012), agriculture and biological sciences (Maietta, 2002; Kumbhakar, Lien, & Hardaker, 2014), and energy (Filippini & Hunt, 2011; Stern, 2012). However, to the best of our knowledge, no application has yet been made in the field of the scientific documentation.

The main objective of this paper is to analyse the productive efficiency of a significant group of scientific journals that belong to the field of quantitative methods applied to Economics. To this end, a SFA model using panel data is utilised. The application of this methodology to the field of scientific documentation constitutes the main innovation of this paper; this approach is applied to generalize the cross-section model considered in Ortega and Gavilan (2013).

The remainder of this paper is arranged as follows. In Section 2, the set of journals analysed and the variables included in the model are selected. In Section 3, the econometric model employed to fit the panel data is presented. Section 4 is devoted to stating the main results provided by the model, and in Section 5 the conclusions reached in this paper are briefly shown.

2. Selection of journals and variables.

As mentioned in the introduction, this paper generalizes the cross-sectional analysis carried out in Ortega and Gavilan (2013) to the case of panel data in order to attain better estimations and also to be able to follow the evolution over time of the efficiencies obtained. Therefore, for comparison purposes, the same set of journals and variables are to be considered.

With regard to the group of journals, a homogeneous group of which each has potentially the same quantity of readers is considered. Specifically, the 21 journals belonging simultaneously to the areas of “economics” and “social sciences, mathematical methods” of the JCR social sciences edition database for the analysed time span have been selected. Therefore, a group of journals relating to the field of quantitative economics has been chosen.

With respect to the output, a variable that measures the production (diffusion of the new knowledge) of the journals has to be selected. As argued in the introduction, the number of citations received can be considered as a proxy of that production (variable NC). It should be pointed out that, despite being the criteria most commonly used, this selection presents certain issues related to the fact that the number of citations received by a paper could be the consequence of reasons other than that of the value of its content (Callon, Courtial, & Penan, 1995; Ortega 2003).

In relation to the selection of the inputs, variables related to the quantity and quality of the articles published can be selected. Therefore, the total number of articles published by the journals can be considered. However, the citations received by a paper are retrospectively obtained since the citations refer to papers published before the citation is made (Basulto & Ortega, 2005; Gupta, 1997). This is the reason why the average number of articles published by the journal in the recent past (three previous years) has been selected (variable AP). Additionally, a variable related to the visibility of the journal is considered since the greater the number of people there are who read a paper, the more citations that paper will receive when these readers publish their own research. Moreover, it is clear that there is great interest in publishing in the journals with the highest levels of visibility. The impact factor of a journal can be taken as a measure of its visibility (Callon, Courtial, & Penan, 1995; Basulto & Ortega, 2005), since a better impact factor implies that the journal has been read by a greater quantity of researchers. In this sense, the act of selecting journals that cover the same subject area (quantitative economics) supports the choice of the impact factor as a visibility measure due to the similarity in the number of potential readers of these journals. As a consequence, although this selection is not standard practice, the average impact factor reached in the recent past (three previous years) by the journals is chosen

(variable IF). It could be considered that the impact factor is an output. However, it is precisely the fact of using data from the past that makes it an input for the future, since what a journal has achieved to date with respect to visibility is determinant of what it will be able to attain in the future.

The panel of data containing the values of the three aforementioned variables, NC, AP and IF, for each of the selected 21 journals and for the years 2010, 2011 and 2012, have been obtained from the JCR Social Science edition database of the Web of Science and are shown in Table 1. The journal QME-QUANT MARK ECON did not belong to the JRC database in the year 2007, and therefore its averages AP and IF for the year 2010 have been calculated using the information of only two (instead of three) previous years.

Other related inputs, for example those linked to the labour force or capital factor, could be considered. However, the variable representing the total number members of the editorial boards (as a variable representing the human factor) was found not to be of significance in Ortega and Gavilan (2013) and therefore has not been considered in the proposed model. With regard to the capital factor, it would be desirable to include reference to this in the model as, for example, the budget available for each journal. However, to date, this information has not been made available.

Table 1. Journals selected and panel of data obtained.

Abbreviated title of journal	NC ₂₀₁₀	IF ₂₀₁₀	AP ₂₀₁₀	NC ₂₀₁₁	IF ₂₀₁₁	AP ₂₀₁₁	NC ₂₀₁₂	IF ₂₀₁₂	AP ₂₀₁₂
ASTIN BULL	482	0.603	28.00	408	0.779	33.00	434	0.641	31.67
ECONOMET J	516	0.654	36.00	510	0.725	32.00	573	0.765	30.00
ECONOMET REV	666	1.225	26.67	650	1.351	25.67	701	1.204	26.00
ECONOMET THEOR	1440	0.753	61.67	1507	0.842	67.67	1739	0.871	60.33
ECONOMETRICA	19858	3.612	53.00	19659	3.683	57.67	21481	3.387	58.00
EMPIR ECON	716	0.427	58.00	783	0.571	67.67	879	0.630	75.00
INSUR MATH ECON	1572	1.004	109.00	1567	1.205	123.00	1682	1.142	101.00
INT J GAME THEORY	944	0.442	42.00	780	0.527	43.67	910	0.473	41.33
J APPL ECONOMET	2135	1.334	48.00	2315	1.417	45.00	2600	1.578	48.67
J BUS ECON STAT	2616	1.513	32.67	2919	1.701	34.33	3117	1.678	41.67
J ECONOMETRICS	8246	1.894	145.33	8523	1.836	133.00	9614	1.689	126.00
J MATH ECON	938	0.400	69.33	893	0.466	88.33	855	0.432	87.00
J PROD ANAL	1045	0.596	34.67	1101	0.643	33.33	1033	0.753	35.00
JAHRB NATL STAT	118	0.145	23.00	113	0.239	30.67	152	0.289	37.00
MATH FINANC	1184	1.145	28.33	1098	1.168	28.67	1165	1.171	30.33
OXFORD B ECON STAT	1449	0.843	38.00	1501	0.993	37.67	1677	1.091	37.67
QME-QUANT MARK ECON	197	1.167	15.00	240	1.078	15.00	294	1.200	14.67
QUANT FINANC	701	0.779	64.67	712	0.701	77.00	938	0.649	100.00
REV ECON STAT	7462	2.171	59.33	7639	2.557	66.00	8266	2.701	79.33
SOC CHOICE WELFARE	779	0.576	72.00	725	0.615	71.00	820	0.578	68.00
THEOR DECIS	569	0.563	32.33	511	0.650	43.00	570	0.588	51.67

Source: Own elaboration.

3. Model.

The origins of the SFA econometric models are set in the (almost simultaneously published) papers of Aigner, Lovell, and Schmidt (1977) and Meeusen and van den Broeck (1977), who share the composed

error structure for inefficiencies and statistical noise. The econometric model selected in this paper is a Cobb-Douglas production model where all the inputs and the output are taken in logarithmic terms.

Since one of the main objectives is to analyse the possible stability of the efficiencies over time and the changes of position of the journals in the yearly ranking, in this paper the efficiencies are left completely free and unrestricted in time instead of considering a panel data model based on the assumption of time-invariant efficiency as in the early models, or imposing any functional restriction to the time evolution of the efficiencies as in Kumbhakar (1990) or Battese and Coelli (1992). Moreover, a variable t is added to take into account the possible technological changes over time. This variable has been centred by taking the values -1 (for 2010), 0 (for 2011) and 1 (for 2012). Therefore, by considering the inputs and the output selected to assess the efficiency of the selected group of journals for the period 2010-2012, the following model is proposed:

$$\log(\text{NC}_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(\text{IF}_{it}) + \beta_2 \cdot \log(\text{NA}_{it}) + \beta_3 \cdot t + v_{it} + \varepsilon_{it}, \quad i = 1, \dots, 21; \quad t = -1, 0, 1.$$

This is a Coob-Douglas type model. The more general translog model has been considered; however, this approach is not suitable since it presents the wrong skewness problem.

The stochastic frontier is $\beta_0 + \beta_1 \cdot \log(\text{IF}_{it}) + \beta_2 \cdot \log(\text{NA}_{it}) + \beta_3 \cdot t + v_{it}$ where the stochastic part, representing the statistical noise, is described by the random variable v_{it} which, as usual, is considered to have a normal distribution with zero mean and variance σ_v^2 , that is $v_{it} \sim N(0, \sigma_v^2)$. The other part of the composite error ε_{it} is the random variable u_{it} , which represents the inefficiency of the journals (distance between the production frontier or maximum quantity of citations attainable given the levels of the inputs and the citations actually received). This variable, as a distance, has to be selected positive and, as it is commonly set, it is taken following a half-normal distribution, that is $u_{it} \sim \text{HN}(0, \sigma_u^2)$. This is a normal distribution truncated to its positive values, in other words, it is the absolute value of a normal variable, $u_{it} \sim \left| N(0, \sigma_u^2) \right|$. All the considered random variables v_{it} and u_{it} are assumed to be independent. Other possibilities considered for modelling the inefficiency are the exponential (especially in the Bayesian methodology) and gamma distributions. In this paper, the half-normal model has been selected because it is the most commonly used. Furthermore, the main results remain unchanged when considering these other options.

It is important to point out that the selected model is neutral at the stochastic frontier. The possibility of utilising a non-neutral model has been discarded since it has problems of convergence, and of validity and reliability of the statistics tests.

Once the model is estimated, the quantity u_{it} provides the levels of the inefficiency of the journals in the year t (Jondrow, Lovell, Materov, & Schmidt, 1982), that is to say, it is considered that the inefficiencies are time varying. Furthermore, the likelihood ratio test has been carried out to test whether the inefficiencies can be accepted to be constant over time, which is clearly rejected since a virtually zero p-value is obtained. When the variables are expressed in logarithmic terms, as it is the case, it is more common to consider the efficiency measures $\text{Eff}_{it} = \exp(-u_{it})$ because they take values between 0 (minimum level of efficiency) and 1 (maximum level of efficiency) and are easier to interpret than the inefficiency u_{it} .

The model considered is estimated through the maximum likelihood method by using the version 1.1-0 of the package *frontier* in the software R (Coelli & Henningsen, 2013). In Coelli (1996), a

description of the method for various kinds of models is presented. In this method, a reparameterisation of the model considered is set. Specifically, the parameters $\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$ (total variance of the composite error) and $\gamma^2 = \sigma_u^2 / (\sigma_v^2 + \sigma_u^2)$ are utilised. This last parameter is related to the proportion of the total variance of the composite error, which is due to inefficiency. This parameter is crucial in the determination of the levels of inefficiency of the journals, and clearly ranges from 0 (where the whole composite error stems from random effects and there exist no differences in efficiency in the journals) to 1 (where the whole composite error is due to inefficiency and no statistical noise exists). Therefore, its statistical significance determines the presence of different levels of efficiency in the journals considered.

4. Results.

As prior step to the estimation of the considered model, it has been checked that the wrong skewness problem is not present, since the skewness coefficient of the residuals is negative (specifically, its value is -0.2190).

The results of the maximum likelihood estimation of the parameters of the model, along with their standard errors, z-values and p-values are shown in Table 2, where the p-values have been marked according to their significance at 5% (*), 1% (**) or 0.1 (***)

Table 2. Results of the estimation of the proposed model through maximum likelihood.

Parameters	Estimations	Standard errors	Z-values	p-values
β_0	4.1944	0.5740	7.3071	0.0000***
β_1	1.4022	0.0875	16.0303	0.0000***
β_2	0.8984	0.1295	6.9352	0.0000***
β_3	-0.0927	0.0711	-1.3029	0.1927***
σ_{ε}^2	0.3895	0.1579	2.4668	0.0136***
γ	0.7061	0.2749	2.5691	0.0102***

Source: Own elaboration.

The first significant conclusion that can be drawn from these results is that the inputs chosen in the econometric model (IF and NA) are highly significant in the establishment of the frontier (maximum attainable number of citations) and, as expected, both are positive, that is, an increase in the available resources of a journal leads to an increase in its level of citations. However, the variable introduced in order to account for technological change over time remains insignificant at the usual levels. Therefore, there is no evidence of that change.

With regard to the major parameter γ , it is significant at the usual 5% level. The estimated value 0.7061 establishes that 46.61% of the composite error is due to the variations in the inefficiencies of the analysed journals and the rest is statistical noise (Coelli, 1995; Ortega & Gavilan, 2014).

Once the model has been estimated, the specific efficiencies for each considered journal and year, whose determination forms the main goal of this type of model, are obtained and presented in Table 3 together with the average efficiency of the three years studied and the corresponding ranks to these averages. In order to graphically illustrate the situation, the obtained efficiencies are also shown in Figure 1. The efficiencies estimated for the journals show great stability over time, which is the reason because their averages of the three years and the corresponding ranks have been added in Table 3, thereby representing a summary of the three years. As a consequence of this stability, the three average efficiencies for the years considered are also very stable ranging between 0.66 and 0.71.

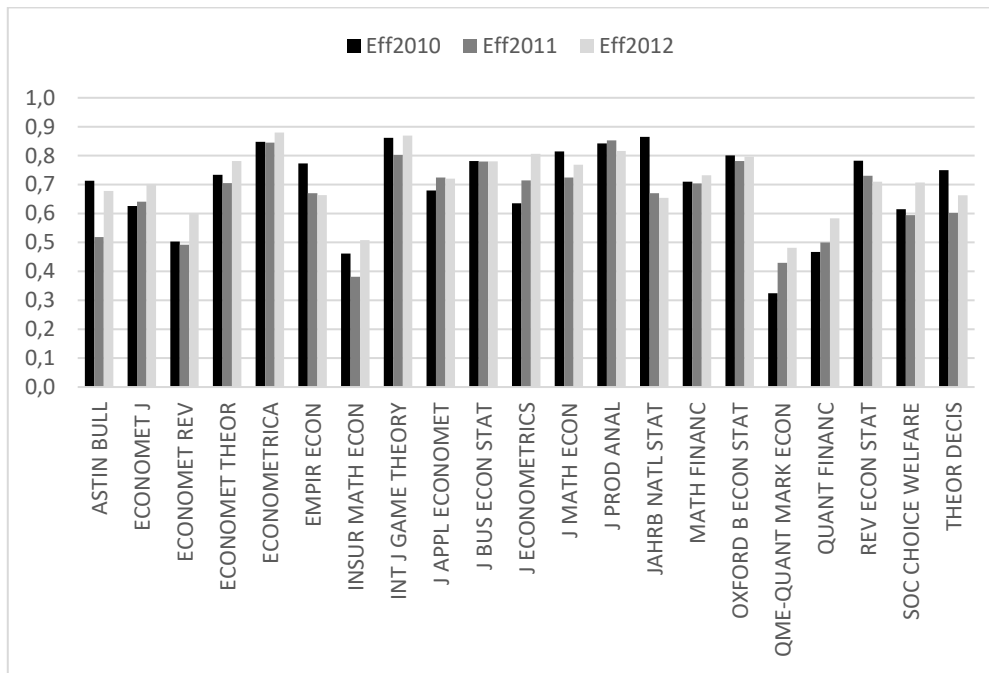
The stability of the efficiencies and their corresponding ranks can be quantified through Pearson's coefficients of correlation and Spearman's rank correlation, which are shown in Table 4. All Pearson's correlations are above 0.79 and all Spearman's rank correlations are above 0.62. As expected, the correlations between two consecutive years are greater than the correlations between 2010 and 2012.

Table 3. Estimated efficiencies, their means by journal and by year and the ranks of the average efficiencies by year.

	Eff ₂₀₁₀	Eff ₂₀₁₁	Eff ₂₀₁₂	Averages	Rank of the Averages
ASTIN BULL	0.713	0.519	0.678	0.637	17
ECONOMET J	0.626	0.641	0.702	0.656	15
ECONOMET REV	0.503	0.492	0.601	0.532	18
ECONOMET THEOR	0.734	0.705	0.781	0.740	8
ECONOMETRICA	0.848	0.845	0.880	0.857	1
EMPIR ECON	0.773	0.670	0.663	0.702	13
INSUR MATH ECON	0.462	0.381	0.508	0.450	20
INT J GAME THEORY	0.862	0.802	0.869	0.844	2
J APPL ECONOMET	0.680	0.724	0.720	0.708	12
J BUS ECON STAT	0.781	0.780	0.780	0.780	5
J ECONOMETRICS	0.635	0.714	0.806	0.719	10
J MATH ECON	0.815	0.725	0.769	0.769	6
J PROD ANAL	0.842	0.853	0.816	0.837	3
JAHRB NATL STAT	0.865	0.670	0.654	0.730	9
MATH FINANC	0.710	0.704	0.732	0.715	11
OXFORD B ECON STAT	0.801	0.781	0.796	0.793	4
QME-QUANT MARK ECON	0.324	0.430	0.481	0.412	21
QUANT FINANC	0.467	0.500	0.583	0.517	19
REV ECON STAT	0.782	0.730	0.710	0.741	7
SOC CHOICE WELFARE	0.615	0.594	0.707	0.639	16
THEOR DECIS	0.750	0.602	0.663	0.672	14
Averages	0.695	0.660	0.710	0.688	

Source: Own elaboration.

Figure 1. Estimated efficiencies of each journal for each one of the three years considered.



Source: Own elaboration.

Table 4. Correlations between the efficiencies of different years.

	2010	2011	2012		2010	2011	2012
2010	1	0.8485	0.7967	2010	1	0.8681	0.8482
2011	0.7935	1	0.9250	2011	0.8677	1	0.9257
2012	0.6260	0.9078	1	2012	0.7308	0.8902	1

Source: Own elaboration.

Pearson's correlations are above the diagonal and Spearman's rank correlations are below the diagonal. Correlations involving all 21 journals considered are shown in the left-hand-side table and the correlations excluding the journal JAHRB NATL STAT are presented in the right-hand-side table.

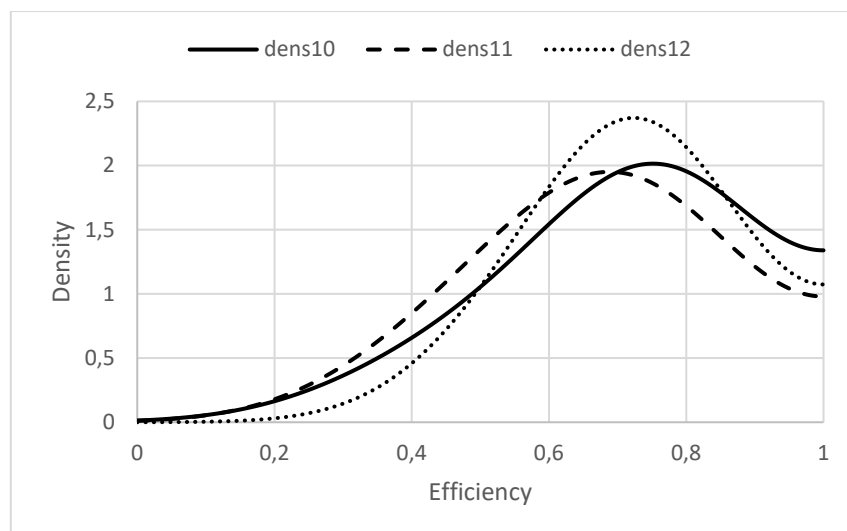
The journals ECONOMETRICA, INT J GAME THEORY, and J PROD ANAL are always ranked in the first positions. ECONOMETRICA always presents by far the greatest production (number of citations) of the group of analysed journals. However, the number of citations of INT J GAME THEORY and J PROD ANAL are not especially outstanding, although they are reached with moderate resources (visibility, IF, and number of articles published, AP), both in the recent past.

On the other hand, the journals QUANT FINANC, INSUR MATH ECON, and QME-QUANT MARK ECON always occupy the last positions. In the case of INSUR MATH ECON, although it presents a high number of citations in relation to the group of journals analysed and a visibility (IF) in the recent past near to the average of the group, it publishes a very high number of articles in relation to the group (about twice the average of the group). The journal QUANT FINANC has much fewer citations than INSUR MATH ECON and, although its IF is below the average of the group, it publishes a number of articles far above the average of the group. As for the journal QME-QUANT MARK, it presents one of the lowest number of citations (the second minimum) and, although it has the lowest number of articles published it presents an IF near to the average of the group.

The greatest exception to the aforementioned stability in the efficiencies reached for the analysed journals over time is the journal JAHRB NATL STAT, which presents the highest efficiency in 2010 and falls to the positions 13 in 2011 and 17 in 2012. This journal always has the lowest number of citations and IF. However, in 2010 it publishes the lowest number of articles of the group, while reaching the first position in the rank of that year. Nevertheless, as time goes on, this journal maintains the level of citations in 2011 and increases it by 29% in 2012 but doubles its IF and publishes 61% more articles than in 2010, which is why it does not maintain the level of efficiency reached in 2010 and loses numerous positions in the rankings of 2011 and 2012. These are precisely the kind of conclusions that can be drawn using a panel data approach, and cannot be observed through a cross-sectional analysis for a particular year. Specifically, if a cross-sectional analysis for 2010 is carried out, a misleading conclusion for the journal JAHRB NATL STAT could be reached, since its high efficiency is a fluke related to that particular year, which is not maintained over time. If this journal is removed from the sample, then the stability of the efficiencies increases significantly since all Pearson's correlations remain above 0.84, and all Spearman's rank correlations are above 0.73, and the correlations involving the year 2010 are now greater (Table 4).

In order to have a general overview of the efficiencies reached for the journals as a group, the densities fitted to all 21 journals for each of the three years considered is shown in Figure 2. These densities have been fitted while bearing in mind that the efficiencies range from 0 (minimum level efficiency) to 1 (maximum level of efficiency) (Silverman, 1986). In 2010, the average efficiency of the group is 0.695 and the mode 0.751 with 62% of the journals (13 out of 21) having a level of efficiency above 0.70. With regard to 2011, the average efficiency is 0.660 and the mode 0.689 with 52% (11 out of 21) of the journals whose efficiency is above 0.70, thereby indicating a slight decrease in relation to 2010. As for 2012, the average efficiency is 0.710 and the mode 0.724 with 62% of the journals (13 out of 21) having a level of efficiency above 0.70, which constitute very similar figures to those of 2010. Therefore, a great stability in time is observed and the group of journals operates at a high level of efficiency during the period of time analysed, whereby its global efficiency for the three years considered stands at 0.688.

Figure 2. Densities fitted to the estimated efficiencies of the journals for each of the three years considered.



Source: Own elaboration.

On the other hand, Table 2 shows that the two inputs considered (IF and AP) in the process of producing citations (diffusion of knowledge, NC) are highly significant, that is to say, the journals having, in the recent past, a greater number of articles published and higher levels of visibility measured through the impact factor are, potentially, able to reach a greater number of citations (production frontier). This is reinforced by the fact that the coefficient of linear correlation between each input (IF and AP) and the estimated frontier is high and significantly different from 0 (Table 5). However, unlike the production frontier, the level of efficiency is not determined by the two inputs considered, as the low coefficients of linear correlation and non-significantly different from zero in Table 5 show. There is a minor direct relationship between the levels of efficiency of the journals and their actual production in the form of NC, the output considered, since their linear correlation takes the value 0.3551, with a *p*-value for the significance test equal to 0.0043.

Table 5. Linear correlation between the explanatory variables and: (i) the estimated frontier, (ii) the efficiency.

	Frontier		Efficiency	
	Correlation	p-value	Correlation	p-value
IF	0.8870	0.0000	0.1607	0.2082
AP	0.5365	0.0000	-0.0927	0.4699

Source: Own elaboration.

5. Conclusions.

In this paper, the process of diffusing new knowledge by means of scientific journals through the publication of papers is set as an input-output process in order to assess the efficiency in that process of a homogeneous set of journals. These 21 journals belong simultaneously to the areas of “economics” and “social sciences, mathematical methods” for the years 2010, 2011 and 2012. The output and the inputs of that process have been carefully selected. The output, a proxy of the diffusion of new knowledge, consists of the number of citations received by the journal in a specific year (NC). Two inputs have been included in the model: one to take into account the number of articles published by the journal in the recent past (NA), and the other measures the visibility reached by the journal through the average of its impact factor in the recent past (IF). Other candidate inputs include the total number of members of the editorial boards of the journals as a representation of the labour force, which has not been included in this model since it yielded insignificant results (Ortega & Gavilan, 2013), and an input related to the capital factor as the budget available for the journal, which has also been left out of the model due to the unavailability of that information.

Once the inputs and outputs have been selected, the SFA approach is carried out to benchmark the selected group of journals. To this end, a Cobb-Douglas econometric model is applied to a panel of data, and a variable is also added to take into consideration the possible technological changes over time. This panel data approach, in which the inefficiencies are left completely free and unrestricted over time, generalizes the cross-sectional approach established in Ortega and Gavilan (2013), thereby providing better estimations and enabling the efficiency of the journals to be tracked over time.

The maximum likelihood estimation of the proposed model shows that the two selected inputs are highly significant in the determination of the production frontier (the maximum attainable number of citations by the journals). However, there is no evidence of technological change over time (Table 2).

The efficiencies obtained for the journals and for each of the years analysed, show great stability across time, and present high correlations between the years considered (Pearson's correlations above 0.79 and Spearman's rank correlations above 0.62). The journals *ECONOMETRICA*, *INT J GAME THEORY* and *J PROD ANAL* are always ranked in the first positions. On the other hand, the journals *QUANT FINANC*, *INSUR MATH ECON* and *QME-QUANT MARK ECON* are always in the last positions. The greatest exception to the aforementioned stability in the efficiencies over time is the journal *JAHRB NATL STAT*, which presents the highest efficiency in 2010 and falls to position 13 in 2011, and 17 in 2012. It should be borne in mind that this conclusion can be drawn using a panel data approach but cannot be observed through a cross-sectional analysis for a particular year.

The densities, fitted to all 21 journals for each of the years considered (Figure 2) in order to attain a general overview of the journals as a group, again show great stability over time and also show that the group of journals operates at a high level of efficiency during the period of time analysed: the global efficiency for the three years under consideration is of 0.688.

As aforementioned, the two inputs (IF and AP) considered in the process of diffusing new knowledge are highly significant. However, unlike the production frontier, the level of efficiency is not determined by the two inputs considered, as the low coefficients of linear correlation and non-significantly different from zero show (Table 5). A slight direct relation between the levels of efficiency of the journals and their number of citations is observed.

The study carried out in this paper could be extended to benchmark several sets of journals across time, and could also be extended through the inclusion of further relevant inputs in the econometric model.

References

- Abbott, M., & Doucouliagos, C. (2003). The efficiency of Australian universities: A data envelopment analysis approach. *Economics of Education Review*, 22, 89-97.
- Abbott, M., & Doucouliagos, C. (2009). Competition and efficiency: overseas students and technical efficiency in Australian and New Zealand universities. *Education Economics*, 17, 31-57.
- Aigner, D.J., Lovell, C.A.K., & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6, 21-37.
- Agasisti, T., Catalano, G., Landoni, P., & Varganti, R. (2012). Evaluating the performance of academic departments: an analysis of research-related output efficiency. *Research Evaluation*, 21, 2-14.
- Barros, C.P., Garcia-del-Barrio, P., & Leach, S. (2009). Analysing the technical efficiency of the Spanish Football League First Division with a random frontier model. *Applied Economics*, 41, 3239-3247.
- Basulto, J., & Ortega, F.J. (2005). Modelling citation age data with right censoring. *Scientometrics*, 62, 329-342.

- Battese, G.E., & Coelli, T.J. (1992). Frontier production functions, technical efficiency and panel data: With application to paddy farmers in India. *Journal of Productivity Analysis*, 3, 153-169.
- Bogetoft, P., & Otto, L. (2011). *Benchmarking with DEA, SFA, and R*. Springer-Verlag.
- Bonaccorsi, A., & Daraio, C. (2003). A robust nonparametric approach to the analysis of scientific productivity. *Research Evaluation*, 12, 47-69.
- Bonaccorsi, A., Daraio, C., & Simar, L. (2006). Advanced indicators of productivity of universities. An application of robust nonparametric methods to Italian data. *Scientometrics*, 66, 389-410.
- Brissimis, S.N., Delis, M.D., & Tsionas, E.G. (2010). Technical and allocative efficiency in European banking. *European Journal of Operational Research*, 204, 153-163.
- Callon, M., Courtial, J.P., & Penan, H. (1995). *Cienciometría. La medición de la actividad científica: de la Bibliometría a la vigilancia tecnológica*. Gijón: Ediciones Trea (in Spanish).
- Coelli, T.J. (1995). Estimators and hypothesis tests for a stochastic frontier function: A Monte Carlo analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 6, 247-268.
- Coelli, T.J. (1996). *A guide to FRONTIER version 4.1: a computer program for frontier production function estimation*. CEPA Working Paper 96/07, Department of Econometrics, University of New England, Armidale, Australia.
- Coelli, T.J., & Henningsen, A. (2013) *Frontier: Stochastic Frontier Analysis. R package version 1.1-0*. <http://CRAN.R-Project.org/package=frontier>.
- Coelli, T.J., Rao, D.S.P., & Battese, G.E. (1998). *An introduction to efficiency and productivity analysis*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Filippini, M., & Hunt, L.C. (2011). Energy Demand and Energy Efficiency in the OECD Countries: A Stochastic Demand Frontier Approach. *The Energy Journal*, 32, 59-80.
- Greene, W. (2004). Distinguishing between heterogeneity and inefficiency: stochastic frontier analysis of the World Health Organization's panel data on national health care systems. *Health Economics*, 10, 959-980.
- Guan, J., & Chen, K. (2010). Modeling macro-R&D production frontier performance: an application to Chinese province-level R&D. *Scientometrics*, 82, 165-173.
- Gupta, B.M. (1997). Analysis of distribution of the age of citations in theoretical population genetics. *Scientometrics*, 40, 139-162.
- Jondrow, J., Lovell, C.A.K, Materov, I.S., & Schmidt, P. (1982). On the estimation of technical inefficiency in the stochastic frontier production function model. *Journal of Econometrics*, 19, 233-238.

- Kumbhakar, S.C. (1990). Production frontiers, panel data, and time-varying technical inefficiency. *Journal of Econometrics*, 46, 201-211.
- Kumbhakar, S.C. (1991). Estimation of technical inefficiency in panel data models with firm- and time-specific effects. *Economics Letters*, 36, 43-48.
- Kumbhakar, S.C., Lien, G., & Hardaker, J.B. (2014). Technical efficiency in competing panel data models: A study of Norwegian grain farming. *Journal of Productivity Analysis*, 41, 321-337.
- Kumbhakar, S.C., & Zhang, R. (2013). Labor-use efficiency and employment elasticity in Chinese manufacturing. *Economia e Politica Industriale*, 40, 5-24.
- Lozano, S., & Salmeron, J.L. (2005). Data Envelopment Analysis of OR/MS journals. *Scientometrics*, 64, 133-150.
- Maietta, O.W. (2002). The decomposition of cost inefficiency into technical and allocative components with panel data of Italian dairy farms. *European Review of Agricultural Economics*, 27, 473-495.
- Meeusen, W., & van den Broeck, J. (1977). Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. *International Economic Review*, 18, 435-444.
- Melfou, K., Theocharopoulos, A., & Papanagiotou, E. (2009). Assessing productivity change with SFA in the sheep sector of Greece. *Operational Research*, 9, 281-292.
- Merkert, R., Odeck, J., Brathen, S., & Pagliari, R. (2012). A Review of Different Benchmarking Methods in the Context of Regional Airports. *Transport Reviews*, 32, 379-395.
- O'Donnell, C.J., & Nguyen, K. (2013). An econometric approach to estimating support prices and measures of productivity change in public hospitals. *Journal of Productivity Analysis*, 40, 323-335.
- Ortega, F.J. (2003). Propuesta de mejora del índice agregado de impacto. Aplicación a la valoración de sexenios de investigación. *Revista Española de Documentación Científica*, 26, 403-417 (in Spanish).
- Ortega, F.J., & Gavilan, J.M. (2013). The measurement of production efficiency in scientific journals through stochastic frontier analysis models: application to quantitative economics journals. *Journal of Informetrics*, 7, 959-965.
- Ortega, F.J., & Gavilan, J.M. (2014). A comparison between maximum likelihood and Bayesian estimation of stochastic frontier production models. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 43, 1714-1725.
- Parinduri, R.A., & Riyanto, Y.E. (2014). Bank Ownership and Efficiency in the Aftermath of Financial Crises: Evidence from Indonesia. *Review of Development Economics*, 8, 93-106.

- Park, I., & Lee, Y.H. (2012). Efficiency Comparison of International Golfers in the LPGA. *Journal of Sports Economics*, 13, 378-392.
- Petridis, K., Malesios, C., Arabatzis, G., & Thanassoulis, E. (2013). Efficiency analysis of forestry journals: Suggestion for improving journals' quality. *Journal of Informetrics*, 7, 505-521.
- Rousseau, S., & Rousseau, R. (1998). The scientific wealth of European nations: Taking effectiveness into account. *Scientometrics*, 42, 75-87.
- Ruiz, C. F., Bonilla, R., Chavarro, D., Orozco, L. A., Zarama, R., & Polanco X. (2010). Efficiency measurement of research groups using Data Envelopment Analysis and Bayesian networks. *Scientometrics*, 83, 711-721.
- Sav, G.T. (2011). Cost Efficiencies and Rankings of Flagship Universities. *American Journal of Economics and Business Administration*, 3, 596-603.
- Silverman, B. W. (1986). *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman and Hall: London.
- Stern, D.I. (2012). Modeling international trends in energy efficiency. *Energy Economics*, 34, 2200-2208.
- Wang, G.W., Knox, K.J., & Lee, P.T.-W. (2013). A study of relative efficiency between privatised and publicly operated US ports. *Maritime Policy and Management*, 40, 351-366.
- Zhou, X., Li, K.-W., & Li, Q. (2011). An analysis on technical efficiency in post-reform China. *China Economic Review*, 22, 357-372.



Capital Social como factor de emprendimiento en los países de la OCDE: implementación de un modelo con datos de panel

MARTÍNEZ SIDÓN, GILBERTO

Universidad Autónoma de Baja California (Méjico)

Correo electrónico: gilberto.mtzs88@gmail.com

SAAVEDRA LEYVA, RAFAEL EDUARDO

Universidad Autónoma de Baja California (Méjico)

Correo electrónico: eduardo.saavedra@uabc.edu.mx

MORONES CARRILLO, ANA LOURDES

Universidad Autónoma de Baja California (Méjico)

Correo electrónico: lourdes_mc39@hotmail.com

RESUMEN

En el presente artículo se analiza el capital social como factor de emprendimiento en los países de la OCDE. Se utilizan las bases de datos del Global Entrepreneurship Monitor (GEM) y la World Values Survey (WVS). De la primera se obtiene la variable de emprendimiento y de la segunda se obtienen variables de capital social, como la confianza y la pertenencia a un grupo del tejido social. Se utiliza un modelo de panel con efectos aleatorios. Los resultados sugieren que las variables de capital social impactan positivamente en la actividad de emprendimiento, incrementando su probabilidad de éxito, no solo en la fase inicial sino también en el largo plazo.

Palabras clave: emprendimiento, capital social, confianza, empresas.

Clasificación JEL: C13; M13.

MSC2010: 91B38; 91D30; 91G70.

Social Capital as an Entrepreneurship Factor in OECD Countries: Implementation of a Model with Panel Data

ABSTRACT

In the present article, social capital is analyzed as entrepreneurship factor across OECD countries. The databases of Global Entrepreneurship Monitor (GEM) and the World Values Survey (WVS) are used. Entrepreneurship variable is obtained from GEM, and social capital variables are obtained from WVS. Confidence and to belong a social group are considerate as social capital variables. A panel model with random effects is used. The results suggest that social capital variables have a positive impact on entrepreneurial activity, increasing their probability of success, not only in the initial phase but also in the long term.

Keywords: entrepreneurship, social capital, trust, enterprise.

JEL classification: C13; M13.

MSC2010: 91B38; 91D30; 91G70.



1. Introducción.

En la teoría económica se reconoce que el emprendimiento es una de las principales formas de creación de empleo, generación de mayor crecimiento y desarrollo económico, así como un factor clave en la redistribución del ingreso. El emprendimiento se ha analizado desde distintos enfoques. El primero de ellos, se centra en el papel del emprendedor-que destaca las cualidades personales. De acuerdo con esta visión, un emprendedor se caracteriza por la necesidad de logros, el deseo de ser independiente, la tolerancia al riesgo, la perseverancia, la autoconfianza y el aprendizaje constante (Kantis, 2004). En este sentido, diversos autores han definido el concepto de emprendedor dentro del contexto empresarial como aquel que funda una empresa.

Este enfoque ha sido criticado en el sentido de que estas características también pueden observarse en otras personas que no emprenden un negocio, como deportistas, políticos, actores, activistas, entre otros. Lo anterior llevó a redefinir el enfoque, centrándose ahora en el proceso de creación de empresas y no en las cualidades del emprendedor.

De esta forma, se consideró que el proceso de creación de empresas o actividad emprendedora, es un fenómeno vinculado a factores sociales, culturales y económicos (Kantis, 2004). Shapero (1984) considera que la creación de una empresa requiere de cuatro condiciones. La primera es la existencia de factores de desplazamiento, que es lo que lleva a una persona a inclinarse por la decisión de emprender. Pueden ser positivos, como la identificación de una oportunidad o el deseo de realización; o negativos, como la salida del desempleo o la incomodidad con el empleo actual. La segunda condición es la disposición a actuar por parte del emprendedor; la tercera, la credibilidad en el proyecto y, finalmente, la disponibilidad de recursos.

Desde el punto de vista económico, factores como los niveles de beneficio esperados y las barreras de entrada son lo que definen a la actividad emprendedora, por su impacto en la entrada y salida de las empresas a los distintos mercados (Geroski & Murfin, 1991; Kantis, 2004). Rees y Shah (1986) y Evans y Jovanovic (1989) destacan que variables de capital humano como educación y experiencia laboral incrementan los ingresos esperados, mientras que características personales y aspectos demográficos como la edad o estado civil influyen en la actitud hacia el riesgo.

Otro enfoque que ha ganado especial atención es el que centra su atención en el papel de las redes en el proceso de emprendimiento. De acuerdo con este enfoque, la interacción del emprendedor con otros actores como familiares, amigos, instituciones, empresarios es un aspecto crucial en el proceso de creación de empresas (Johannison, 1996).

Los enfoques mencionados anteriormente no son mutuamente excluyentes y el fenómeno del emprendimiento es complejo, por lo que para tener un análisis más adecuado es necesaria la adopción de un enfoque multidisciplinario.

En lo que respecta al capital social, éste se reconoce como un factor intangible que contribuye a la cooperación y la toma de decisiones en la actividad económica. Si bien es cierto que son múltiples estudios los que abordan los temas anteriores, son pocos los que prueban empíricamente una relación entre éstos. Lo anterior se debe quizás a las múltiples definiciones que se tiene sobre capital social.

El concepto de capital social tomó especial relevancia con los trabajos de Coleman (1988) y Putnam (1995). De sus trabajos se define tal concepto como los aspectos de estructura social que facilitan la toma de decisiones de los agentes dentro de la estructura. Son aspectos de las organizaciones sociales, como las redes, normas y la confianza que permiten la acción y cooperación para el beneficio mutuo.

Sin embargo, el concepto fue criticado por Robert Solow (2000) quien argumenta que el capital implica tres aspectos: 1) extensión en el tiempo, 2) sacrificio deliberado en el presente para el beneficio

humano y 3) alinealidad. De acuerdo con lo planteado, el capital social no cumple con dichos atributos, en gran medida porque el capital representa un stock productivo o factores naturales de producción.

A pesar de las críticas, y en ocasiones la poca aceptación de este concepto especialmente en la economía, diversos trabajos se han realizado respecto al capital social y su relación con variables económicas. Por ejemplo, Portela y Neyra (2002) relacionan el incremento del Producto Interno Bruto (PIB) con el capital social como variable explicativa para el caso de España. Encuentran una relación positiva y significativa entre el capital social y el PIB. Barrutia y Echebarria (2010) relacionan la investigación, desarrollo e innovación con el capital social para algunas regiones de Italia y España. Encuentran una relación positiva y significativa entre las variables.

Así pues, el capital social se puede asociar con la actividad de emprendimiento. Por ejemplo, Castellano (2005) argumenta que el capital social afecta a las empresas de cuatro formas: 1) *dentro de la empresa*, promueve una mejor coordinación entre individuos y departamentos, el trabajo en equipo puede mejorar la eficiencia y la calidad, con lo que es probable que trabajadores y accionistas sientan crecer un sentido de orgullo en su trabajo, siendo parte de una entidad que hace una contribución positiva a su comunidad. 2) *entre empresas*, la confianza es el fundamento de la cooperación, y afrontar negocios en conjunto desarrolla relaciones más profundas que pueden servir en el futuro para otros proyectos. 3) *entre sectores*, reconocer la importancia de las asociaciones intersectoriales, tanto para negocios sostenibles como para el desarrollo sostenible, promueve sinergias, independencia y capital social entre el sector público, el sector privado y la sociedad civil. 4) *dentro de la sociedad*, el capital social afecta a los tipos de empresas que son exitosas, creando un ambiente positivo para el desarrollo del sector privado.

Unido a lo anterior, el capital social se puede ligar al emprendimiento de diversas formas. Una de ellas tiene que ver con la oportunidad de reconocer el momento adecuado para emprender, dada la información obtenida a través de la interacción (Ramos et al., 2010). Es aquí donde se pone de manifiesto la necesidad de interactuar con el tejido social, crear vínculos de cooperación, establecer acuerdos y sobre todo generar y transmitir confianza. Pues como en su momento sugirió Fukuyama (1995), solo las sociedades con un alto nivel de confianza social tendrán la capacidad de crear empresas flexibles y de gran escala, necesarias para competir exitosamente en la economía global.

Ante dicho contexto el objetivo del presente documento es explorar el efecto que tiene el capital social como factor explicativo del emprendimiento en los países asociados a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), que define al capital social como las redes, normas, valores y opiniones compartidas que facilitan dentro y entre grupos una mejor manera en el actuar económico. Dicha organización tiene por objetivo el de promover políticas que mejoren el bienestar económico y social de las personas, y es precisamente el emprendimiento una forma de lograr dicho objetivo. La hipótesis sugerida es que el capital social contribuye de manera positiva al emprendimiento, incrementando la probabilidad de iniciar un negocio, dada la pertenencia de las personas a grupos del tejido social y la confianza existente.

El documento se compone de cinco apartados. En el apartado 2 se presenta la literatura empírica y teórica. En el apartado 3 se muestra la metodología a utilizar y se hace una descripción de los datos; en el apartado 4 se muestran los resultados y en el apartado 5 se concluye.

2. Literatura asociada al tema.

Como se señaló en la introducción, los estudios sobre cómo influye el capital social en el emprendimiento son relativamente pocos. Tal como señalan Castillo y Smida (2009), el capital social ha sido ampliamente estudiado en su calidad de factor dinamizador de la construcción de tejido social, y por el contrario la exploración de la naturaleza y aplicaciones de este concepto en el contexto empresarial son menos numerosas. La principal limitación se debe quizás a lo complicado que es la

cuantificación del capital social, ya que no es un elemento tangible, por lo que no existen elementos claros e identificativos para disponer de una medida exacta. En la literatura se considera a la confianza y la pertenencia a grupos en el tejido social como aproximaciones de ésta (Ramos et al., 2010; Barrutia & Echebarria, 2010; Portela & Neira, 2002).

En la misma línea North (1981) y Stiglitz (1999) aproximan el concepto de confianza al de capital social. Se argumenta que la confianza es un requisito previo e importante para el buen funcionamiento de los mercados. Asimismo, se reconoce que ésta reduce los costos de transacción y facilita la cooperación entre los agentes económicos, especialmente en los lugares donde las instituciones, leyes y reglamentos carecen de una creencia básica de honestidad.

De acuerdo con Macauley (1963) la confianza se puede construir con base en la contratación relacional, esto es, mediante la creación de relaciones comerciales con socios o conocidos a través de mecanismos informales. En este sentido, la reciprocidad en las interacciones repetidas permite a las empresas mantener una cooperación. Asimismo, Hornungová (2014) argumenta que la cooperación es esencial en el rendimiento empresarial, y por ello es necesario mantener este factor clave en el desarrollo de las empresas.

Asimismo, Woodruff (2004) sugiere que la confianza se puede construir mediante la reputación, la recopilación de información sobre los nuevos socios comerciales y compartición de información con las redes empresariales. La existencia de redes resulta esencial para el tránsito de información sobre la conducta empresarial.

Strandholm, Marino, Steensma y Weaver (2002) examinaron los efectos de la orientación emprendedora y la cultura nacional sobre la formación de alianzas estratégicas que incluyen acuerdos cooperativos. Los resultados mostraron que a medida que crece la pequeña y mediana empresa se incrementa la necesidad de tener socios confiables y competentes para facilitar el alcance de sus objetivos. Asimismo, Raiser, Rouso, Steves y Teksoz (2007) asocian a la actividad empresarial con el tema de la confianza. Argumentan que para que una empresa pueda subsistir por mucho tiempo, es necesario crear un ambiente de confianza entre sus clientes y proveedores, pues a medida que existe una mayor confianza los servicios se vuelven más eficientes.

Así pues, una de las formas más comunes de cómo se relaciona el capital social con el emprendimiento resulta a partir de cómo una persona puede identificar una oportunidad de abrir un negocio. Sirva de ejemplo lo planteado por Ramos, Medina, Lorenzo y Ruiz (2010), quienes argumentan que la oportunidad de emprender un negocio puede originarse a partir del capital social con el que cuenta el emprendedor. Señalan que el capital social es un factor que ayuda a explicar el emprendimiento desde que se hace posible reconocer una oportunidad, dado que las relaciones del emprendedor con el resto de la sociedad le permiten captar información de mercado que le es útil en la toma de decisión.

En esta misma línea Castillo-Vergara, Álvarez-Marín, Alfaro-Castillo, Sánchez y Pizarro (2018) determinan cuáles son los principales factores de emprendimiento universitario. En primer lugar, identifican un grupo de factores internos y externos y posteriormente aplican el proceso analítico jerárquico para ponderar cada factor. Los resultados muestran a la experiencia laboral y la realización de cursos específicos como los factores internos más importantes para la capacidad emprendedora; mientras que los factores externos más relevantes son el ámbito de desarrollo, las redes y amigos, estos dos últimos relacionados con el capital social.

Gedajlovic, Honig, Moore, Payne y Wright (2013) abogan por la inclusión del capital social dentro de la teoría del emprendimiento, proponiendo un modelo esquemático. En este modelo, el primer esquema a considerar son los antecedentes, en donde los eventos del pasado crean y desarrollan las relaciones y redes. Por consiguiente, el segundo esquema del modelo son las relaciones y las redes, que consiste en un proceso de creación y desarrollo de relaciones y redes que dará origen al capital social. El tercer esquema es el capital social, que dicta la formación de las relaciones y la estructura de las

redes del presente. Finalmente, el esquema de emprendimiento, donde el capital social será aprovechado individualmente o colectivamente para generar nuevos negocios. Dentro de este último esquema cabe el estudio de Neira et al. (2013) quienes analizan el caso de España, utilizando un modelo de elección discreta tipo *logit* para determinar la probabilidad de emprender, y que incluye variables de capital social. Los resultados sugieren que las redes sociales son explicativas para el emprendimiento.

Por otra parte, Acs, Audretsch y Lehmann (2013) exponen la teoría de *knowledge spillover entrepreneurship*, que explica cómo el conocimiento no comercializado se concibe como un área de oportunidad, y que solamente al ser explotado por un emprendedor influirá en la economía y sociedad. La teoría mencionada propone la existencia de un filtro del conocimiento, argumentando que el conocimiento es incapaz de expandirse de manera automática. No obstante, se sugiere que las conexiones sociales evaden el filtro del conocimiento, de tal forma que los individuos puedan aprovechar y emprender utilizando el conocimiento generado (Audretsch & Keilbach, 2005). A causa de la poca atención que poseen las redes en la teoría de *knowledge spillover entrepreneurship*, Huggins y Thompson (2015) retoman esta teoría para proponer y enfatizar la introducción del papel de las redes y capital *network* como fuente de innovación y emprendimiento regional. Por lo tanto, esto incluye que las sociedades con conocimiento, que además presenten capital social, visto como una fluida difusión y confianza entre sus individuos, deberán de presentar mayor actividad emprendedora que se traduciría en mayor crecimiento y bienestar social.

Dentro de los trabajos más recientes sobre el tema de capital social, visto éste desde la perspectiva de la creación de redes, y el emprendimiento, se tiene el de Lamine (2017) donde se aplica la teoría actor-red dentro del proceso emprendedor para comprender la dinámica de las redes empresariales. El autor manifiesta que la teoría actor-red es adecuada para describir la creación de negocios puesto que da seguimiento a las relaciones sociales empresariales, examina profundamente el complejo fenómeno empresarial, contextualiza la situación empresarial, e identifica conexiones sociales y políticas. Asimismo, esta teoría no discrimina entre los factores humanos y no humanos, que tienen un impacto importante en el proceso emprendedor y que a menudo se analizan de forma aislada.

Así pues, la relación que existe entre el emprendedor y el capital social puede brindar una oportunidad a las personas inmigrantes. Bizri (2017) analiza este fenómeno. En su argumento se destaca que una inmigrante puede utilizar el capital social (como las redes) para emprender y prosperar. A través del análisis cualitativo, se identifican cinco elementos relevantes en la puesta en marcha del negocio: actitud unidireccional, percepción del negocio familiar, impulso colectivo, estructura de red distinta y proliferación por tomar oportunidades. A su vez, estos elementos se relacionan con tres dimensiones del capital social: cognitiva, estructural y relacional. Concluye que los emprendedores inmigrantes acuden a una estructura de red local para prestarse apoyo mutuo.

Finalmente, el trabajo de Williams, Huggins y Thompson (2018) examina la relación entre emprendimiento y capital social, conceptualizando este último como un fenómeno de carácter espacial. Los autores analizaron esta relación dentro de comunidades deprimidas, aplicando entrevistas a emprendedores de dichas comunidades. Encontraron que el capital social es un elemento importante en la iniciativa emprendedora de este tipo de comunidades. Adicionalmente se destaca que los emprendedores de estas comunidades ostentan vínculos fuertes con otros individuos de la misma comunidad, pero también presentan débiles relaciones con personas externas a ella, por lo que tienden a generar actividad emprendedora informal.

Cabe señalar que una vez que se generó un emprendimiento a partir del capital social, entendido éste como las redes de cooperación y confianza entre empresas, éstas deben alcanzar un desarrollo óptimo que les permita afrontar los diversos riesgos del mercado. Pues como mencionan Rodríguez et al. (2017) donde las redes y confianza se ha extendido, a tal punto que algunas empresas son totalmente dependientes una de otra, la quiebra de una de ellas desencadenaría un efecto dominó, ocasionando pérdidas económicas en las otras empresas de la comunidad y su salida del mercado si esta situación severa continúa. O bien, en una industria donde las empresas vecinas comparten información y cooperan entre ellas, la debacle de una puede afectar a los colindantes de alrededor.

En suma, la literatura empírica que relaciona el capital social como factor de emprendimiento es poca, y en cada caso se intenta cuantificar el capital social utilizando desde los conceptos de confianza, cooperación y redes, hasta agrupaciones sociales. En cada caso los resultados fueron favorables a dicha hipótesis de relación directa entre ambas variables.

3. Metodología y datos.

Los datos respecto de la variable dependiente como explicativas se presentan a continuación.

- Como variable dependiente se utilizó la TEA (*Total Early-Stage Entrepreneurial Activity*), que mide el porcentaje de la población de 18-64 años, que es emprendedor naciente o propietario-gerente de un nuevo negocio. La base de datos de donde se obtuvo la información fue del *Global Entrepreneurship Monitor* (GEM).

Para la variable de capital social se proponen dos concepciones. Ambas se obtuvieron de la *World Values Survey* (WVS). La WVS es una encuesta que comenzó en 1981 a recabar información respecto de valores y creencias humanas en países de Europa. Al día de hoy se aplica en casi 100 países de los diferentes continentes, recabando datos respecto de temas sociales, políticos, económicos, culturales, religiosos, demográficos, entre otros. Asimismo, se reconoce a la WVS como el único estudio académico que recoge información respecto de los temas anteriores de las principales zonas culturales del mundo. La información es de carácter público y gratuito (Para una mayor información respecto de la WVS se puede consultar la página electrónica <http://www.worldvaluessurvey.org/wvs.jsp>). Las variables propuestas son:

- Cs1: Considera el porcentaje de encuestados que responde que se puede confiar en las personas, al momento de cuestionarle lo siguiente: Generalmente hablando, ¿cree usted que la mayoría de la gente puede ser confiada o hay que tener cuidado con el trato con la gente? Dicha pregunta es utilizada ampliamente para hacer referencia al nivel de confianza existente en la sociedad, que se ajusta en gran medida al concepto de capital social.
- Cs2: Porcentaje de personas que son miembros activos o inactivos de algún tipo de asociación, tales como: iglesia u otras organizaciones religiosas; asociaciones deportivas o de recreo; organizaciones de arte, música o educativas; sindicatos; partidos políticos; organizaciones medioambientales; asociaciones profesionales; organizaciones de caridad; otras organizaciones voluntarias. Esta variable obedece al capital social que se vincula con la definición de redes sociales.

Asimismo, se utilizan variables de control que de acuerdo con la teoría económica también son explicativas del emprendimiento. Éstas son:

- gdpccp: Producto Interno Bruto (PIB) per cápita, medido en miles de dólares a precios constantes de 2005, en paridad de poder adquisitivo. Obtenido de la base de datos de la OCDE. La variable del PIB ha sido utilizada como explicativa del capital social en algunas investigaciones, sirva de ejemplo el realizado por Portela y Neira (2002). Se espera una relación directa entre las variables.
- dsemp: Desempleo. Porcentaje de personas en edad de trabajar que se encuentran desocupadas. La relación entre las variables puede ser en ambos sentidos. Si el signo del coeficiente resulta positivo y estadísticamente significativo, se estará en una situación donde las personas que no

tienen empleo tienden a encontrar en el emprendimiento una solución al problema del desempleo. Si el signo del coeficiente resulta negativo y estadísticamente significativo, se estará en una situación donde parte del desempleo se debe al fracaso de un emprendimiento. Esta variable ha sido utilizada como explicativa del emprendimiento en algunos trabajos, por ejemplo, en el de Gawel (2010). Los datos se obtuvieron de la OCDE.

- t_int : Tasa de interés de largo plazo. Se espera una relación inversa y, por tanto, un coeficiente negativo, es decir, cuanto mayor es la tasa de interés, menor es la posibilidad de que las personas emprendan, ya que a mayor tasa de interés, los créditos son más caros y, por otro lado, el costo de oportunidad de emprender se vuelve mayor si se considera que se puede invertir el dinero. En el análisis realizado por Bawuah et al. (2014), se muestra evidencia empírica entre la relación de esta variable con el emprendimiento. Los datos se obtuvieron de la OCDE.
- inf : Inflación. Medida por el Índice de Precios al Consumidor. Dicha variable representa la estabilidad de la economía. De acuerdo con lo expuesto en la teoría del emprendimiento por oportunidad o necesidad, en época de crisis suele haber despidos y las personas tienden a emprender, mientras que en época de estabilidad económica, el emprendimiento que se realiza suele ser por oportunidad, es decir, con conciencia plena y conocimiento del mercado, porque se visualizó una oportunidad de crecimiento y es más probable que los emprendedores por necesidad salgan del mercado para incorporarse nuevamente al mercado laboral (Galindo et al., 2012). De esta forma, un signo positivo del IPC indicaría que ante un periodo de inflación se produce un incremento de la TEA; por lo que, de acuerdo con la idea anteriormente expuesta, se puede inferir que el número de emprendedores por necesidad fue mayor al número de emprendedores por oportunidad y a la salida de emprendedores del mercado si las hubiera. De manera opuesta, un signo negativo del IPC indicaría que ante un periodo de reducción de inflación (o estabilidad) se produce un aumento de la TEA; con lo que se puede inferir que la cantidad de emprendimientos por oportunidad es mayor a la cantidad de emprendimientos por necesidad y a la salida de emprendedores por necesidad del mercado. Por lo tanto, en este caso, el sentido del impacto de esta variable indicaría el tipo de emprendimientos que prevalece. La información se obtuvo de la base de datos de Banco Mundial.

Los países de la OCDE seleccionados fueron aquellos de los que se tiene información tanto de la GEM como de la WVS. La muestra se acotó a 19 países: Australia, Canadá, Estonia, Francia, Alemania, Hungría, Italia, Japón, Corea del sur, México, Holanda, Nueva Zelanda, Noruega, Polonia, Eslovenia, España, Suecia, Turquía y Estados Unidos.

Los años considerados son cuatro, 2001, 2004, 2009 y 2014 (se comienza en el año 2001 dado que GEM empezó a reportar datos a partir de esa fecha. Además, para este año se tomó como referencia el periodo 1994-1998 para aproximar los valores de las variables de capital social), mismos que contemplan los últimos cuatro periodos en que se aplicó la WVS, estos son, 1994-1998, 1999-2004, 2005-2009, 2010-2014 (cabe señalar que la encuesta para el periodo 2015-2018 aún no cuenta con el total de datos recabados de los países donde se aplica). Lo anterior da un total de 76 observaciones.

Dado que la información combina series de tiempo y de corte transversal, se optó por aplicar un modelo con datos de panel. La estructura general del modelo de panel se puede expresar de la siguiente manera:

$$Y_{it} = \alpha_{it} + \beta x_{i,t} + u_{i,t}, \quad u_{i,t} \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

donde:

Y = Variable dependiente.

α = Intercepto

β = Coeficientes a estimar

x = Vector de variables explicativas

u = Término de error

i = Número de individuos

t = Numero de periodos

Un modelo de panel puede variar dependiendo de la estructura de los datos, esto es:

- Modelo agrupado. Se presenta cuando la estructura de datos tiene el mismo intercepto para todos los individuos, esto es: $Y_{it} = \alpha + \beta x_{i,t} + u_{i,t}, \quad u_{i,t} \sim N(0, \sigma^2)$ (2)
- Modelo de panel con efectos fijos. Varía dependiendo del intercepto, esto es:

- Efectos fijos individuales.

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta x_{i,t} + u_{i,t}, \quad u_{i,t} \sim N(0, \sigma^2) \quad (3.1)$$

- Efectos fijos temporales

$$Y_{it} = \alpha_t + \beta x_{i,t} + u_{i,t}, \quad u_{i,t} \sim N(0, \sigma^2) \quad (3.2)$$

- Efectos fijos individuales y temporales:

$$Y_{it} = \alpha_{it} + \beta x_{i,t} + u_{i,t}, \quad u_{i,t} \sim N(0, \sigma^2) \quad (3.3)$$

- Modelo de panel con efectos aleatorios. Se presenta cuando el intercepto es totalmente aleatorio, es decir, se descompone en su parte estocástica correspondiente al individuo (ε_i) y su parte constante (α), esto es:

- $\alpha_{it} = \alpha + \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ (4.1)

Lo que da paso a la siguiente estructura de panel:

- $Y_{it} = \alpha + \beta x_{i,t} + v_{i,t}, \quad v_{i,t} \sim N(0, \sigma^2)$ (4.2)

donde: $v_{i,t} = u_{i,t} + \varepsilon_i$ (4.3)

Expuesto lo anterior, para determinar la especificación adecuada del modelo se recurrió a distintas pruebas. En primer lugar, se calculó el estadístico F, que evalúa si el modelo corresponde a una especificación de efectos fijos como en la ecuación 3.1, o si el modelo corresponde a datos agrupados como en la ecuación 2, en cuyo caso su estimación sería con Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). La prueba se especifica como:

$$F_{N-1, NT-K-N} = \frac{(R_{nr}^2 - R_r^2)/(N-1)}{(1 - R_u^2)/(NT - N - K)} \quad (5)$$

donde R_{nr}^2 indica el coeficiente de determinación del modelo general de la forma *no restringida* (ecuación 3.1), R_r^2 indica el coeficiente de determinación del modelo *restringido* (ecuación 2). “N” indica el número de observaciones (individuos), “T” el número de periodos, y “K” el total de variables

explicativas. La hipótesis nula (H0) de la prueba es la existencia de intercepto común ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \dots = \alpha_{n-1}$). Si se acepta la H0, entonces la estructura de panel no aporta información relevante, por lo que estimar el modelo de panel con MCO resulta adecuado.

Si la hipótesis es rechazada, entonces se debe realizar la prueba de Breusch y Pagan (1980), en cuyo caso se evalúa si el modelo corresponde a una especificación de efectos aleatorios (ecuación 4.2) o de datos agrupados (ecuación 2). El estadístico de prueba se presenta a continuación:

$$LM = \frac{NT}{2(T-1)} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\sum_{t=1}^T e_{i,t})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T e_{i,t}^2} \right]^2 \quad (6)$$

donde $e_{i,t}$ corresponde a los residuos de la estimación con MCO de la ecuación 2. La H0 indica que la varianza del error no cambia, esto es: $\text{Var}(u_i) = 0$. Por lo tanto, de aceptarse la H0, la estructura de panel de efectos aleatorios no aporta información.

Si se rechaza la H0 en ambas, o una de las pruebas anteriores, se recurre a la prueba de Hausman (1978), que ayuda a evaluar si la mejor especificación del modelo es con efectos aleatorios o fijos. El estadístico de prueba es:

$$H = (\widehat{\beta}_f - \widehat{\beta}_a)' (\widehat{\sigma}_{\beta_f}^2 - \widehat{\sigma}_{\beta_a}^2)^{-1} (\widehat{\beta}_f - \widehat{\beta}_a) \quad (7)$$

donde $\widehat{\beta}_f$ corresponde a los estimadores del modelo de efectos fijos, y $\widehat{\beta}_a$ corresponde a los estimadores del modelo con efectos aleatorios calculados por Mínimos Cuadrados Generalizados (MCG). La H0 del estadístico indica que los estimadores de MCG son consistentes, pues $[\text{Cov}(X_{i,t}, u_{it})] = 0$. Si la H0 no se rechaza, entonces la mejor especificación es un modelo de panel con efectos aleatorios. Cabe señalar que es muy común no rechazar la H0 cuando la temporalidad de los datos es muy corta.

4. Resultados.

Los resultados del modelo se presentan en la Tabla 1. De acuerdo con las pruebas de especificación, la mejor estructura es la que contempla efectos aleatorios, esto es:

$$TEA_{it} = \alpha + \beta_1 Cs1_{i,t} + \beta_2 Cs2_{i,t} + \beta_3 gdppcp_{i,t} + \beta_4 dsemp_{i,t} + \beta_5 t_int_{i,t} + \beta_4 inf_{i,t} + v_{i,t} \quad (8)$$

donde: $v_{i,t} = u_{i,t} + \varepsilon_i$, $v_{i,t} \sim N(0, \sigma^2)$; $i = \text{país}$, $t = \text{año}$

De acuerdo con los resultados, la inflación ($inf_{i,t}$) tiene un signo positivo, lo que sería indicativo de que los movimientos de la TEA ante la inflación son mayoritariamente influenciados por el emprendimiento por necesidad; sin embargo, la variable no resultó estadísticamente significativa. El resto de variables resultaron con el signo esperado y estadísticamente significativas.

Las variables de capital social que se utilizaron en el modelo resultaron estadísticamente significativas. La variable de capital social que hace referencia a la confianza ($cs1_{i,t}$) indica que ante un incremento en un punto porcentual en la confianza en otras personas el emprendimiento se incrementa en 0.084 puntos porcentuales. Por su parte, la variable de capital social referente a los grupos sociales o redes ($cs2_{i,t}$) indica que ante un incremento en un punto porcentual en la pertenencia a un grupo social el emprendimiento se incrementa en 0.911 por ciento. Con lo anterior se demuestra que el capital social, visto como nivel de confianza y pertenencia a grupos sociales, potencializa la capacidad de emprender en mayor medida que el resto de las variables explicativas del emprendimiento.

La variable de desempleo ($dsemp_{i,t}$) resultó con un coeficiente positivo y estadísticamente significativo. Lo que implica que abrir una empresa es una de las principales opciones para combatir la problemática de la falta de empleo. Ante un incremento de un punto porcentual en el nivel de desempleo, el emprendimiento se incrementa en 0.3895 puntos porcentuales.

Tabla 1. Resultados del modelo.

Variable Endógena: $TEA_{i,t}$		
Variables Exógenas	Coeficientes	
C	1.1078 (0.5405)	*
$cs1_{i,t}$	0.0843 (0.0335)	**
$cs2_{i,t}$	0.9112 (0.2205)	***
$dsemp_{i,t}$	0.3895 (0.1201)	**
$t_int_{i,t}$	-0.0177 (0.0021)	**
$inf_{i,t}$	0.0024 (0.0016)	
$gdppcp_{i,t}$	-0.0988 (0.0494)	*
Núm. Observaciones	76	
R-2 ajustado	0.8002	
D.T. de la variable dependiente.	0.0265	
D.T. de la regresión	0.0077	
Valor p (del estadístico F)	0.0013	

Notas: un asterisco *, dos asteriscos ** y tres asteriscos *** denotan la significancia al 10, 5 y 1% respectivamente. El valor en el paréntesis denota el error estándar.

Contraste F (diferentes interceptos por grupos):

H0 = los grupos tienen un intercepto común.

Valor p de Estadístico F = 0.0027

Contraste de Breusch-Pagan (efectos grupales):

H0 = Varianza del error igual a cero, $Var(u_i) = 0$

Valor p de Estadístico Chi cuadrado $X^2 = 0.0000$

Contraste de Hausman (efectos aleatorios vs efectos fijos):

H0 (efectos aleatorios) = Estimadores de MCG son consistentes, $[Cov(X_{i,t}, u_{it})] = 0$

Valor p de Estadístico Chi cuadrado $X^2 = 0.8990$

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la variable de ingreso per cápita, que en la literatura se asocia como una medida de desarrollo, ésta resultó significativa y con signo negativo. Lo anterior coincide con lo propuesto por Schultz (1991), quien señala que existe una relación negativa entre el nivel de desarrollo económico y la evolución del factor emprendedor. Kuznets (1971) se apoya en las consecuencias del cambio tecnológico, para justificar el desplazamiento de la actividad económica desde los sectores estancados o en declive hacia otros en crecimiento y una relación negativa entre el empleo por cuenta propia y la tasa de desarrollo.

Asimismo, el coeficiente de la tasa de interés cumple con lo esperado, dado que un aumento de un punto porcentual en dicha variable disminuirá la actividad emprendedora en 0.0177 puntos porcentuales. Por lo tanto, la tasa de interés incrementa los costos de oportunidad de emprender, dificultando la obtención de financiación e impidiendo la generación de nuevos negocios.

5. Conclusiones.

El factor del emprendimiento es de especial importancia en la actividad económica por ser una fuente empleo y una manera de generar mejores condiciones y bienestar económico. En este sentido, la OCDE ha reconocido esta actividad como una estrategia para alcanzar mejores niveles de desarrollo económico. Por otro lado, se ha reconocido que el capital social puede potenciar muchas actividades y reducir los costos asociados. Por ejemplo, en el caso de la toma de decisiones colectivas, el compartir información, la difusión de innovaciones y, por supuesto, el emprendimiento.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se sugiere una relación positiva entre el nivel de emprendimiento y el capital social. Las variables propuestas para medir el capital social a través de la confianza y la pertenencia a un grupo del tejido social, resultaron buenos parámetros. En este sentido, es importante que se puedan formar relaciones confiables y duraderas entre los distintos grupos sociales, de manera que esto influya positivamente en el emprendimiento, y éste a su vez, en el crecimiento y posteriormente en el desarrollo económico.

Con las variables explicativas de control como el PIB per cápita, se comprueba la relación inversa entre el grado de emprendimiento y el desarrollo económico. Esto dada la relación directa obtenida entre el nivel de desempleo y el emprendimiento. Por lo anterior, es importante poner especial atención y focalizar políticas de apoyo a la apertura de empresas, pues éstas surgen como una muy buena alternativa a la generación de empleo durante las épocas de recesión y crisis económica.

Asimismo, es importante poner atención en las tasas de interés, pues tasas de interés altas hacen más difícil la actividad de emprendimiento al encarecer la inversión. Dirigir políticas gubernamentales de apoyo al emprendedor con tasas de interés preferenciales, es deseable como apoyo al emprendimiento.

Finalmente, y a manera de retomar el efecto del capital social sobre el emprendimiento, se hace necesaria una mayor participación de los agentes económicos con el tejido social, pues esto se traduciría en beneficios para toda la red, debido al incremento del conocimiento sobre el entorno, las fortalezas, debilidades, así como oportunidades y amenazas, de tal forma que se encuentren nichos y oportunidades de mercado en las que incursionar con mayor probabilidad de éxito y asegurar la permanencia en el largo plazo, pues es muy común que las empresas no logren sobrevivir por mucho tiempo.

Referencias

- Acs, Z., Audretsch D., & Lehmann E. (2013). The Knowledge Spillover Theory of Entrepreneurship. *Small Business Economics*, 41(4), 757-774.
- Audretsch, D., & Keilbach M. (2005). Entrepreneurship Capital and Regional Growth. *The Annals of Regional Science*, 39(3), 457-469.
- Barrutia, J.M., & Echebarria C. (2010). Social Capital, Research and Development, and Innovation: An Empirical Analysis of Spanish and Italian Regions. *European Urban and Regional Studies*, 17(4), 371-385.
- Bawuah, B., Sare Y., & Musah A. (2014). The effect of Interest Rate on Micro, Small and Medium Enterprises Financing Decision in Wa Municipality of Ghana. *International Journal of Business, Humanities and Technology*, 4(4), 81-90.
- Bizri, R. (2017). Refugee-Entrepreneurship: a Social Capital Perspective. *Entrepreneurship and Regional Development*, 29, 847-868.

- Breusch, T.S., & Pagan A.R. (1980). The Lagrange multiplier test and its applications to model specification in econometrics. *Review of Economic Studies*, 47, 239-253.
- Castellano, H. (2005). La planificación del desarrollo sostenible: Contenidos, entorno y método. Caracas: Cendes.
- Castillo, R., & Smida, A. (2009). El rol del capital social del emprendedor en la expansión exitosa de una Start-up. El caso de hipertexto LTDA. La librería de la U. *Estudios Gerenciales*, 25(113), 15-36.
- Castillo-Vergara, M., Álvarez-Marín A., Alfaro-Castillo M., Sánchez, J., & Pizarro I. (2018). Factores Clave en el Desarrollo de la Capacidad Emprendedora de Estudiantes Universitarios. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 25, 111-129.
- Coleman, J.S. (1988). Social capital in the creation of human capital. *American Journal of Sociology*, 94, 95-120. DOI: 10.1086/228943.
- Evans, D., & Jovanovic, B. (2018). An Estimated Model of Entrepreneurial Choice Under Liquidity Constraints. *Journal of Political Economy*, 97(4), 808-827.
- Fukuyama, F. (1995). *Trust: The Social Virtues and the Creation of Prosperity*. New York: Free Press.
- Galindo, M., & Méndez T. (2012). Innovación y crecimiento económico: Factores que Estimulan la innovación, *Cuadernos de Gestión*, 12, 51-58.
- Gawel, A. (2010). The Relationship between Entrepreneurship and Unemployment in the Business Cycle. *Journal of international Study*, 4(1), 59-69. DOI: 10.14254/2071-8330.2010/3-1/7.
- Gedajlovic, E., Honig B., Moore, C., Payne, G., & Wright, M. (2013). Social Capital and Entrepreneurship: a Schema and Research Agenda. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 37(3), 455-478.
- Geroski, P.A., & Murfin, A. (1991). Entry and Intra-Industry Mobility in the UK Car Market. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 53(4), 341-359.
- Hausman, J.A. (1978). Specification tests in econometrics. *Econometrica*, 46(6), 1251-1271.
- Hornungová, J. (2014). Factor Analysis: An Instrument for Selection of Performance Factors. *Revista Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 17, 121-136.
- Huggins, R., & Thompson P. (2015). Entrepreneurship, Innovation and Regional Growth: a Network Theory. *Small Business Economics*, 45(1), 103-128.
- Johanninson, B. (1996). The Dynamic of Entrepreneurial Networks. En P.S. Reynolds (ed.), *Frontiers of Entrepreneurship* (pp. 253-267), Babson College.
- Kantis, H. (2004). Un enfoque sistémico de la creación de empresas. En H. Kantis, P. Angelelli, V. Moori Koenig (Eds.), *Desarrollo Emprendedor: América Latina y la experiencia Internacional*, (pp. 21-34). Banco Interamericano de Desarrollo. Fundes Internacional.
- Knack, S., & Keefer, P. (1997). Does Social Capital Have an Economic Payoff? A Cross-Country Investigation. *Quarterly Journal of Economics*, 112(4), 1251-1288. DOI: 10.1162/003355300555475.

- Kuznets, S. (1971). *Economic growth of nations, total output and production structure*. Massachusetts: Harvard University Press.
- Lamine, W. (2017). The Social Network and Entrepreneurial Process: A Sociotechnical Approach. *Thunderbird International Business Review*, 59(5), 623-633.
- Macauley, S. (1963). Non-Contractual relationship in business: A preliminary study. *American Sociological Review*, 28(1), 55-70.
- Neira, I., Portela, M., Cancelo, M., & Calvo, N. (2013). Social and human capital as determining factors of entrepreneurship in the Spanish Region. *Investigaciones Regionales*, 26, 115-139.
- North, D. (1981). *Structure and Change in Economic History*. New York: Norton.
- Portela M., & Neira I. (2002). Capital social: concepto y estudio econométrico sobre capital social en España. *Estudios Económicos de Desarrollo internacional*, 2(2), 25-52.
- Putnam, R. (1995). Bowling alone: American's declining social capital. *Journal of Democracy*, 6(1), 65-78. DOI: 10.1353/jod.1995.0002.
- Raiser, M., Rousso, A., Steves F., & Teksoz, U. (2007). Trust in Transition: Cross-country and firm evidence. *The Journal of Law, Economics, and Organization*, 24(2), 407-433. DOI: 10.1093/jleo/ewm060.
- Ramos, A.R., Medina, J.A., Lorenzo, J.D., & Ruiz, J. (2010). What you know or who you know? The role of intellectual and social capital in opportunity recognition. *International Small Business Journal*, 18(6), 566-582.
- Rees, H., & Shah, A. (1986). An Empirical Analysis of Self-Employment in the U.K. *Journal of Applied Econometrics*, 1(1), 95-108.
- Rodríguez, C., Maté, M., & López, F. (2017). El Contagio en el Fracaso Empresarial como Consecuencia de la Proximidad Geográfica: un Análisis con los Estadísticos Join-Count Aplicado al Sector Servicios. *Revista Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 23, 75-97.
- Schultz, D.E. (1991). Integrated marketing communications: the status of integrated marketing communications programs in the US today. *Journal of Promoting Management*, 1(1), 98-104.
- Shapero, A. (1984). The Entrepreneurial Event. En C. A. Kent (Ed), *The environment for Entrepreneurship*, (pp. 21-40). Toronto, Canada: Lexington Books.
- Solow, R. (2000). Notes on social capital and economic performance. En, Dasgupta P., & Sarageldin, *Social capital: A multifaceted perspective*, World Bank, pp. 6-10.
- Stiglitz, J. (1999). Wither Reform? Ten Years of Transition. Keynote Adress, World Bank, Annual Conference on Development Economics, pp. 32.
- Strandholm, K., Marino, L., Steensma, H.K., & Weaver, K.M. (2002). Harnessing Complexity: The Moderating Effect of National Culture on the Relationship Between Entrepreneurial Orientation and Strategic Alliance Portfolio Complexity. *Journal of Entrepreneurship: Theory and Practice*, 26, 145-161.

Williams, N., Huggins, R. & Thompson, P. (2018). Entrepreneurship and Social Capital: Examining the Association in Deprived Urban Neighborhoods, *International Journal of Urban and Regional Research*, 44(2), 289-309. DOI: 10.1111/1468-2427.12589.

Woodruff, C. (2004). Establishing confidence in business partners: courts, networks and relationship and pillars of support. En J. Kornai, B. Rothstein, S. Rose-Ackerman (eds.), *Creating Social Trust in Post-Socialist Transition* (111-125). New York: Palgrave Macmillan. DOI: 10.1057/9781403980663_7.



Probabilidad de incumplimiento en inversiones de infraestructura: análisis a partir de modelos estructurales de riesgo de crédito

ZAPATA QUIMBAYO, CARLOS ANDRÉS

Observatorio de Economía y Operaciones Numéricas - ODEON

Universidad Externado de Colombia

Correo electrónico: carlosa.zapata@uexternado.edu.co

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo estimar las probabilidades de incumplimiento en proyectos de infraestructura. Para ello, se analiza la exposición que tienen los prestamistas frente a un estado de incumplimiento. Esta aplicación se realiza al asumir dinámica propia del ratio de cobertura del servicio de la deuda (DSCR) y el perfil de pago determinado por el flujo de efectivo disponible del proyecto, donde estos se modelan estocásticamente siguiendo los mismos supuestos de la teoría de valoración de opciones desarrollado por Black y Scholes (1973) y Merton (1973). De esta forma, mediante la adaptación de modelos estructurales desarrollados para activos ilíquidos, como extensión de los modelos de riesgo de crédito de Merton (1974) y KMV de Moody's, se analizan los componentes de probabilidad, exposición y pérdidas de los prestamistas en escenarios de incumplimiento.

Palabras clave: riesgo de crédito, probabilidad de incumplimiento, proceso estocásticos.

Clasificación JEL: C14; C63; G13.

MSC2010: 60H30; 68U20.

Probability of default in infrastructure projects: analysis from structural models of credit risk

ABSTRACT

The purpose of this paper is to estimate the default probabilities in infrastructure projects. For that, we analyze the exposure of the lenders to a state of default. This application is made by assuming the debt service coverage ratio (DSCR) dynamic itself and the payment profile determined by the available cash flow of the project, where these are stochastically modeled following the same assumptions of the valuation theory of options developed by Black and Scholes (1973) and Merton (1973). In this way, through the adaptation of structural models developed for illiquid assets, as an extension of the credit risk models of Merton (1974) and KMV of Moody's, the probability, exposure and loss components of the lenders are analyzed in scenarios of default.

Keywords: credit risk, default probability, stochastic processes.

JEL classification: C14; C63; G13.

MSC2010: 60H30; 68U20.



1. Introducción.

La financiación de proyectos o Project Finance (PF) corresponde a una técnica de financiación estructurada utilizada ampliamente en países desarrollados y en desarrollo a través de esquemas de asociación público-privada (APP) e iniciativas de financiación privada (IFP). Las limitaciones de los recursos y/o restricciones en la capacidad de endeudamiento, junto con la necesidad de mejorar y ampliar la provisión de bienes y servicios públicos (Boussabaine, 2013), así como la transferencia de riesgos y su adecuada gestión (Grimsey y Lewis, 2002; Gatti, 2008; Gatti et al., 2007), ha generado una necesidad creciente para que los gobiernos acudan ante inversionistas privados para participar en estos esquemas de financiación a largo plazo. Para ello, el gobierno (o la autoridad pública) concede a un grupo de inversionistas privados (consorcios o concesiones) el diseño, construcción, operación y mantenimiento de grandes proyectos de infraestructura dentro de un acuerdo contractual de largo plazo (Gatti, 2008; Buscaino et al., 2012).

De esta forma, la financiación de proyectos se ha venido consolidado como una práctica de mayor intensidad y representa una herramienta útil para ayudar a reducir las brechas que presentan los países en materia de infraestructura. Según Della y Yermo (2013), el sector de infraestructura ha representado más del 60% de los préstamos globales de financiación de proyectos. Bajo este esquema se crea un vehículo de propósito especial (SPV, por su sigla en inglés) sobre una base ad hoc (Yescombe, 2002) y representa una compleja estructura de financiación con carácter independiente respecto a los inversionistas y con recursos limitados de estos (Gatti, 2008), los cuales determinan un esquema de financiación fuera de balance con un alto nivel de apalancamiento y largos periodos para recuperar la inversión. Este tipo de financiación también puede incorporar derechos de control (significativos y extensos) para los prestamistas (Borgonovo y Gatti, 2013; Blanc-Brude, Hasan e Ismail, 2014), así como covenants y cláusulas restrictivas (Gatti, 2008; Blanc-Brude, Hasan y Whittaker, 2016), los cuales limitan los intereses de los inversionistas.

A diferencia de la financiación corporativa tradicional, todas las consecuencias económicas del proyecto son atribuidas directamente al *SPV* (Gatti, 2008). Por tal motivo, la dirección del proyecto debe orientar gran parte de sus esfuerzos a la generación del flujo de efectivo, buscando así cubrir las obligaciones contraídas, es decir el reembolso de la deuda y para remunerar el capital invertido, una vez el proyecto ha cubierto sus requerimientos operativos (costos, mantenimiento, gastos, impuestos, entre otros).

Además, la capacidad que tiene el proyecto para generar flujo de efectivo determina su capacidad crediticia. Sin embargo, el análisis crediticio en los proyectos de infraestructura termina siendo mucho más complejo, en comparación con el sector corporativo. El problema radica en la incertidumbre futura sobre el éxito del proyecto, dado los diferentes riesgos que están presentes en sus fases del ciclo de vida, por ejemplo, una demora en la terminación de la construcción por eventos naturales o sociales, una reducción de su demanda o de sus ingresos, un aumento de los costos operativos, entre otros (Cartea y Figueroa, 2005; Boussabaine, 2013). Además, cualquier incumplimiento de las obligaciones contractuales de las contrapartes puede interrumpir el correcto funcionamiento del proyecto. Esta incertidumbre se traduce en la probabilidad de incumplir los pagos acordados en el contrato de financiación (Borgonovo y Gatti, 2013). A esto se suma la ausencia de antecedentes crediticios del proyecto que sirvan como base para una decisión de financiación (Yescombe, 2002).

Blanc-Brude y Strange (2007) señalan que este tipo de financiamientos presentan una mezcla de diferentes tipos de deuda como deuda senior, mezzanine y subordinada, además de préstamos puente e instalaciones de reserva, cada una con diferentes vencimientos y ordenes de prelación de pago. Es necesario aclarar que el análisis correspondiente debe realizarse para cada uno de los diferentes niveles de deuda: senior, mezzanine y subordinada; dada las características de estos y la prelación de pago. Al respecto, Freydefont (2001) encuentra que el riesgo de crédito en un componente de deuda, por ejemplo, deuda senior, es particular e independiente de los demás componentes (mezzanine y/o subordinada) de un orden, pero estos últimos están determinados por la deuda con prelación de pago. Aunque su

representación puede ser compleja, la construcción de un modelo financiero que defina la cascada de pagos correspondiente puede llevar a una implementación intuitiva y práctica, como indica Gatti (2008).

Un análisis riguroso del riesgo de crédito requiere, por tanto, reflejar estas características. A pesar de la importancia práctica que representa para la banca, el análisis y evaluación crediticia de los proyectos ha recibido poca atención en la literatura financiera. Además, los modelos tradicionales de evaluación crediticia: i) modelos de forma reducida; ii) modelos basados en calificaciones y, iii) modelos estructurales, no pueden aplicarse directamente o presentan serias limitaciones para este tipo de financiaciones (Klompjan & Wouters, 2002; Gatti et al., 2007; Kong et al., 2008; Dong et al., 2012; Karminsky & Morgunov, 2016). A pesar de la ventaja que ofrecen los modelos estructurales, donde se modela el mecanismo por el que ocurren los incumplimientos en contraste con la ocurrencia de eventos predeterminados como ocurre en los primeros dos enfoques, estos no pueden aplicarse directamente y, por tanto, deben ajustarse para incorporar las características distintivas de los proyectos de infraestructura.

Klompjan y Wouters (2002) y Karminsky y Morgunov (2016) encontraron limitaciones asociadas a la poca disponibilidad de datos sobre incumplimientos (históricos) y/o a las dificultades de acceso a esta información, así como a la diversidad en el propósito de cada proyecto y de sus riesgos, lo que dificulta la determinación de las variables explicativas dentro del modelo. Klompjan y Wouters (2002), a partir de información interna de ING sobre financiaciones de proyectos realizadas entre 1995 y 1997, desarrollan un modelo Logit para identificar los factores que están fuertemente asociados con el riesgo de incumplimiento de un proyecto. Los autores encontraron que el uso de tecnología no probada, la presencia de patrocinadores inexpertos, los bajos niveles de cobertura del servicio de la deuda están asociados a un mayor riesgo de incumplimiento. De forma similar, Karminsky y Morgunov (2016) utilizaron la información interna de ING durante el periodo 2007-2013 para evaluar aquellos factores que determinan la probabilidad de incumplimiento.

Kong et al. (2008) proponen un modelo de estimación la probabilidad de incumplimiento y de la pérdida crediticia a partir del uso de matrices de transición condicionales de calificación crediticia para proyectos de autopista. Para cuantificar el riesgo de crédito, los autores asumieron que solo hay cuatro factores de crédito y que la tasa de recuperación era nula en caso de incumplimiento. Además, ellos asumieron que los prestamistas solo inviertan en un solo proyecto a la vez, lo que es inconsistente con la práctica. Estas limitaciones son señaladas por Dong et al. (2012) quienes argumentan que los prestamistas están dispuestos a participar simultáneamente en diferentes proyectos con el objetivo de diversificar los riesgos idiosincrásicos de cada uno. Dong et al. (2012) proponen un modelo basado en copulas para portafolios de proyectos correlacionados junto con la técnica de simulación de Monte Carlo. Su aplicación busca extender el modelo desarrollado por Gatti et al. (2007) utilizado para estimación del valor en riesgo (VaR) de un acuerdo de financiación de proyectos.

Desde el enfoque de modelos estructurales, Freydefornt (2001) desarrolla un modelo de estimación del riesgo de crédito para proyectos de infraestructura, como una extensión del modelo de Merton (1974), al asumir que los pasivos del proyecto pueden considerarse como reclamaciones contingentes sobre los activos. De esta forma, estima la pérdida esperada y las primas de riesgo para todas las categorías de deuda. Por su parte, Aragones, Blanco e Iniesta (2009) adoptan el modelo KMV de Moody's, para estimar el riesgo de crédito en proyectos de infraestructura. Sin embargo, los autores realizan una estimación directa de este buscando diferenciarlo del enfoque denominado por ellos como *project finance*, que se centra en determinar si la generación de los flujos de efectivo del proyecto es capaz de asegurar el pago de la deuda.

Aunque los modelos estructurales de Merton (1974) y KMV de Moody's, como muestran Freydefornt (2001) y Aragones, Blanco e Iniesta (2009), tienen una ventaja frente a los enfoques anteriores aún persisten limitaciones fuertes en su implementación como señalan Blanc-Brude y Hasan (2016). Para superar las dificultades anteriores, Blanc-Brude y Hasan (2016) proponen para estimar la probabilidad de incumplimiento en proyectos de infraestructura a partir de un modelo estructural desarrollado para deuda ilíquida, como una extensión de modelo KMV de Moody's al redefinir la

distancia al incumplimiento. A diferencia de las dos aplicaciones anteriores, ellos estiman la probabilidad de incumplimiento a partir de un tratamiento estocástico en la dinámica del perfil pago del proyecto, que se determina a través del flujo de efectivo disponible. Además, su modelo incorpora no solo los efectos de los *covenants* de deuda sino también la naturaleza dinámica de la capacidad de pago del proyecto al asumir una dinámica estocástica de los ratios de cobertura del servicio de la deuda.

La principal innovación de este enfoque se debe a la incorporación de una dinámica propia de la ratio de cobertura del servicio de deuda (*DSCR*, por su sigla en inglés), donde éste se modela estocásticamente siguiendo los mismos supuestos de la teoría de valoración de opciones desarrollado por Black y Scholes (1973) y Merton (1973). Este modelo fue extendido por Blanc-Brude et al. (2018) para estimar la probabilidad condicional de transición entre estados (de un estado de riesgo a uno seguro y, viceversa) al integrar técnicas de inferencia bayesiana.

Partiendo de los modelos estructurales de riesgo de crédito, este trabajo tiene como objetivo estimar las probabilidades de incumplimiento en proyectos de infraestructura y se analiza la exposición y pérdidas que tendrían los prestamistas frente a un incumplimiento. Para ello, al igual que Blanc-Brude y Hasan (2016) y Blanc-Brude et al. (2018), se asume una dinámica estocástica del perfil de pago del proyecto determinado por el flujo de efectivo disponible. De esta forma, se adopta un modelo estructural de riesgo de crédito desarrollado para deuda ilíquida. Esta metodología representa una extensión de los modelos tradicionales de riesgo de crédito de Merton (1974) y KMV de Moody's.

A parte de esta introducción, este trabajo está organizado de la siguiente forma. En la segunda sección se ofrece una breve descripción del riesgo de crédito en proyectos de infraestructura, su definición y naturaleza. En la tercera sección se presentan los modelos estructurales de estimación del riesgo de crédito y su adaptación al campo de los proyectos de infraestructura basado en la propuesta de Blanc-Brude y Hasan (2016). Luego, se presenta una aplicación sencilla y se analizan los resultados. Finalmente, se presenta una discusión final y conclusiones.

2. Riesgo de crédito y modelos estructurales de estimación.

La definición de la probabilidad de incumplimiento, así como la cuantificación del riesgo de crédito en el sector corporativo, han sido ampliamente estudiadas en la teoría financiera, donde la evaluación crediticia se realiza a partir de la información financiera que proveen las hojas de balance y los estados financieros, así como su desempeño histórico y el éxito de financiaciones previas (Gatti et al., 2007). De esta forma, la información disponible es suficiente para estimar la pérdida esperada por riesgo de crédito (*EL*, por su sigla en inglés), a partir de los tres componentes definidos por el Comité de Basilea en el acuerdo de Basilea II, como indica la ecuación (1):

$$EL = DP \times LGD \times EAD \quad (1)$$

donde, *DP* es la probabilidad de incumplimiento, *LGD* es la pérdida dado el incumplimiento y *EAD* la exposición al incumplimiento. Cabe resaltar que gran parte de los desarrollos teóricos se han enfocado en la estimación del primer componente, es decir, la *DP*, en este campo los modelos estructurales han ofrecido una ventaja considerable (ver Freydefornt, 2001; Aragonés, Blanco & Iniesta, 2009; Blanc-Brude & Hasan, 2016; Blanc-Brude, Hasan & Whittaker, 2018). Sin embargo, los demás componentes de estimación de la *EL*, pueden tener limitaciones que son importantes y merecen una atención especial. Por lo general, los prestamistas, en su esfuerzo de reducir su exposición al riesgo, exigen al *SPV* la creación de cuentas de reserva de efectivo para cubrir parte del servicio de deuda futura (Gatti, 2008), buscando aumentar su tasa de recuperación y reducir la exposición total en caso de un evento de incumplimiento.

A partir de los trabajos seminales de Black y Scholes (1973) y Merton (1973), los modelos de valoración de opciones financieras han sido adaptados para el tratamiento de problemas corporativos,

entre ellos la evaluación del riesgo de crédito. Este campo comprende un enfoque de estimación a partir de modelos estructurales iniciado por Merton (1974) y, sus posteriores desarrollados presentados por Black y Cox (1976) e Ingersoll (1977), este enfoque se conoce como “el modelo de Merton”. Este modelo ha sido ampliamente utilizado para estimar la probabilidad de incumplimiento (*DP*).

Merton (1974) extendió la fórmula de Black-Scholes al análisis de reclamaciones contingentes (*CCA*, por su sigla en inglés) para el tratamiento de problemas corporativos, donde asume que la deuda de una empresa puede ser considerada como una reclamación sobre los activos de la misma, con un precio de ejercicio igual a su valor nominal y una fecha de vencimiento determinada. De esta forma, propone una relación entre la estructura de capital y la capacidad que tiene la empresa para pagar su deuda. Para ello, asume que la evolución del valor de mercado de los activos de la empresa (V_A) sigue un proceso estocástico del tipo movimiento geométrico browniano (*MGB*) como indica la ecuación (2):

$$dV_A = \mu_A V_A dt + \sigma_A V_A dW_t \quad (2)$$

donde, μ_A representa a la tasa de deriva del valor de los activos de la empresa, σ_A su volatilidad, y $W_{t \in [0, T]}$ es un proceso estándar de Wiener definido sobre un espacio de probabilidad (Ω, \mathcal{F}, P) con una filtración $(\mathcal{F}_t)_{t \in [0, T]}$. Ahora, si el valor de los activos de la empresa (V_A) sigue un proceso log-normal como indica la ecuación (2), se tiene entonces:

$$\ln V_A = \ln V_0 + \left(\mu - \frac{1}{2} \sigma_A^2 \right) t + \sigma_A Z \sqrt{T} \quad (3)$$

donde, V_0 representa el valor actual de los activos de la empresa y $Z \sim N(0,1)$. Además, el valor de sus activos, está determinado por $V_A = V_E + V_D$ en un momento inicial $t = 0$, donde V_E es el valor de mercado de las acciones de la empresa y V_D es el valor de su deuda.

El modelo asume que V_D está representada por la emisión de un bono cero cupón, con vencimiento en T y valor $B(t, T)$. Entonces, si $V_T < V_D$ la empresa incumple con el pago de su deuda, en este caso $V_E = 0$, mientras que, si $V_T \geq V_D$, la empresa paga su deuda en T y, por tanto $V_E = V_T - V_D$. Esta lógica se puede representar como una función de pagos dada por

$$V_E = \max (V_T - V_D ; 0) \quad (4)$$

De esta forma, V_E se asimila a una opción de compra de tipo europea con precio de ejercicio igual V_D . Lo anterior indica que si el valor de los activos es insuficiente para cumplir con los pasivos, entonces los accionistas, titulares de la opción de compra, no ejercerán su derecho y dejarán la empresa a sus acreedores.

Por su parte, la probabilidad de incumplimiento de la empresa ($Prob(0, T)$) definida entre $t=0$ y T , está determinada por:

$$Prob(0, T) = Pr [V_A \leq V_D] = Pr [\ln V_A \leq \ln V_D] \quad (5)$$

Entonces, en un mundo riesgo-neutral el valor de V_E está determinado por la fórmula de Black-Scholes:

$$V_E = V_A N(d_1) - V_D e^{-rT} N(d_2) \quad (6)$$

donde r representa la tasa de interés libre de riesgo y $N(\cdot)$ indica la función de distribución normal acumulada de los parámetros d_1 y d_2 , que vienen dados por:

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{V_A}{V_D}\right) + \left(r + \frac{1}{2}\sigma_A^2\right)T}{\sigma_A \sqrt{T}} \quad (7a)$$

$$d_2 = \frac{\ln\left(\frac{V_A}{V_D}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma_A^2\right)T}{\sigma_A\sqrt{T}} = d_1 - \sigma_A\sqrt{T} \quad (7b)$$

Finalmente, la probabilidad de incumplimiento (en un mundo riesgo-neutral) es la probabilidad de que V_A en T se encuentre por debajo de V_D :

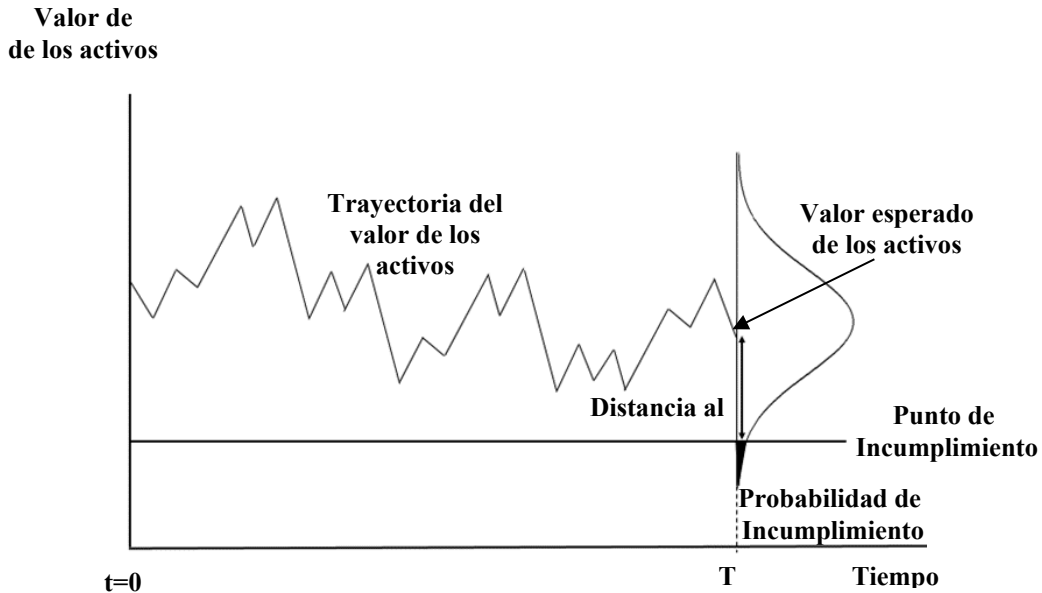
$$P [V_A \leq V_D] = N(-d_2) \quad (8)$$

Una limitación importante del modelo de Merton (1974) es que los parámetros del proceso determinado por la ecuación (2), es decir, μ_A y σ_A , no son directamente observables, lo que dificulta su aplicación. Como propuesta para superar esta limitación, Vasicek (1984) adoptó un enfoque novedoso para la implementación del modelo de Merton, conocido actualmente como modelo KMV de Moody's, que ha demostrado tener un éxito considerable en la medición del riesgo de crédito (Kealhofer, 1993).

El modelo KMV, como extensión del modelo Merton, busca estimar la probabilidad de incumplimiento de una empresa basado en la noción de distancia al incumplimiento (DD , por su sigla en inglés), al asumir que la empresa está en situación de incumplimiento cuando el valor de sus activos está por debajo de un umbral definido por el valor de su deuda (Figura 1). Esta diferencia se fundamenta en la definición del punto de incumplimiento (DP , por su sigla en inglés).

La Figura 1 muestra que si el valor de los activos cae por debajo del punto de incumplimiento, entonces la empresa incumple el pago de su deuda. Por lo tanto, la probabilidad de incumplimiento es la probabilidad de que el valor del activo se encuentre por debajo de este punto. Esta probabilidad esta representada en el área sombreada de la función de distribución debajo del punto de incumplimiento.

Figura 1. Estimación de la probabilidad incumplimiento.



Fuente: Elaboración propia, basado en Kealhofer (2003).

Como resultado, el modelo estima la distancia al incumplimiento definido como el número de desviaciones estándar en que el valor de los activos supera el punto de incumplimiento. Entonces, la distancia al incumplimiento (DD) se calcula como:

$$DD = \frac{V_A - DP}{\sigma_A V_A} \quad (9)$$

donde, V_A representa el valor de los activos y σ_A su volatilidad. Para una empresa con responsabilidad limitada, su patrimonio el cual está determinado por el valor de mercado de las acciones (V_E), tiene el derecho residual sobre los activos después de que se hayan cumplido todas las demás obligaciones. De esta forma, una opción de compra sobre los activos con precio de ejercicio igual a la deuda, tiene las mismas propiedades indicadas en el modelo de Merton. Al tomar los mismos supuestos sobre V_A , V_E y V_D , dados por las ecuaciones (2) y (6), DD se podría estimar usando la ecuación (7b) como:

$$DD = \frac{\ln\left(\frac{V_A}{V_D}\right) + \left(r - \frac{1}{2}\sigma_A^2\right)T}{\sigma_A\sqrt{T}} \quad (10)$$

donde el numerador de la ecuación (10) determina el nivel de apalancamiento financiero, que está asociado al nivel de riesgo financiero que tiene la empresa, mientras que el denominador refleja su nivel de riesgo de mercado. Sin embargo, como σ_A no es observable, DD se aproxima mediante la ecuación (9). Mientras que la probabilidad de incumplimiento (riesgo-neutral) en un vencimiento T , está determinada por la ecuación (11):

$$P [V_A \leq V_D] = N(-DD) \quad (11)$$

Como resultado, este modelo establece que DD es suficiente para estimar la probabilidad de incumplimiento. Sin embargo, se debe tener presente que, en proyectos de infraestructura, el tratamiento del riesgo de crédito es mucho más complejo. Estas diferencias fueron señaladas por el Comité de Basilea desde su primera versión (Gatti, 2008). A partir de la distinción entre la financiación corporativa y la financiación estructurada de proyectos, el Comité de Basilea recomendó la implementación de metodologías diferentes para determinar la EL tanto para el modelo estándar como para los modelos internos (IRB , por su sigla en inglés). Desde entonces se han hecho pocos esfuerzos para definir una metodología estándar que permita hacer frente a este problema; sin embargo, en gran parte de éstas no se han marcado las diferencias entre los tipos de financiación; i) financiación tradicional o corporativa y ii) financiación estructurada de proyectos.

A pesar de los desarrollos recientes de la teoría financiera en la evaluación del riesgo de crédito para el sector corporativo, el desarrollo y aplicación de modelos para proyectos de infraestructuras ha sido muy escaso. Cabe tener presente que, en estos proyectos, el flujo de efectivo del proyecto es el factor determinante de su valor y la determinación de su capacidad de pago, por tanto, éste es el único referente para su aplicación (Gatti, 2008). En este ámbito, la propuesta de Blanc-Brude y Hasan (2016) en la que proponen estimar la probabilidad de incumplimiento a través de un modelo estructural desarrollado para deuda ilíquida, como una extensión de modelo KMV de Moody's, representa una propuesta innovadora al redefinir los parámetros del modelo teniendo en cuenta las características distintas de los proyectos de infraestructura.

De esta forma, el riesgo de crédito está asociado a la incertidumbre futura de los flujos de efectivo del proyecto, por lo que su dinámica determina la capacidad de pago y la probabilidad de entrar en una situación de incumplimiento. Por tanto, la evaluación del riesgo de crédito en proyectos está determinado por la posibilidad de que, en un momento dado, los flujos de efectivo sean suficientes o no para pagar el servicio de la deuda.

3. Estimación de la probabilidad de incumplimiento en proyectos de infraestructura.

Blanc-Brude et al. (2014) y Blanc-Brude y Hasan (2016) demostraron que los modelos estructurales pueden utilizarse para estimar el riesgo de crédito en proyectos de infraestructura; sin embargo, estos modelos merecen un tratamiento especial y algunos ajustes. Por ejemplo, la incorporación de derechos de control para los prestamistas, así como *covenants* de deuda, incorporan un efecto importante en la

estimación de los componentes de estimación del riesgo de crédito. De igual forma, es necesaria una redefinición del punto de incumplimiento.

Mientras los modelos de Merton y KMV definen el incumplimiento a partir del valor de los activos y de la deuda en un horizonte de tiempo determinado (T), para un proyecto el incumplimiento debe estimarse para cada periodo (t). Lo anterior indica que el modelo debe definirse en términos del flujo de efectivo y éste a su vez determina la capacidad de pago al compararse directamente con el servicio de la deuda en cada instante. Esto implica trabajar directamente con la ratio de cobertura del servicio de deuda ($DSCR$, por su sigla en inglés). A partir de este ajuste, Blanc-Brude y Hasan (2016) demostraron que comprender la dinámica del $DSCR$, junto con el perfil de amortización de la deuda y las garantías disponibles son suficientes para implementar un modelo estructural de riesgo de crédito. Según los autores, la presencia de estas características distintivas hace que los modelos estructurales de riesgo de crédito sean una opción natural. Su implementación puede hacerse mediante tres pasos:

1. modelación de los flujos de efectivo y del $DSCR$ para cada momento t ,
2. ajuste riesgo-neutral y estimación de la probabilidad de incumplimiento,
3. incorporación de escenarios de reestructuración y/o refinanciación de la deuda.

El primer paso para estimar el riesgo de crédito corresponde a la modelación de los flujos de efectivo para cada momento t , donde el incumplimiento se da en aquellos escenarios cuando este es insuficiente para pagar el servicio de deuda (capital e intereses). Así, la determinación de la capacidad de pago del proyecto a partir del $DSCR$ es fundamental para su aplicación. El $DSCR$ mide la cantidad de efectivo disponible para realizar el pago del servicio de la deuda ($CFADS$, por su sigla en inglés) en un período t , y se estima como:

$$DSCR_t = CFADS_t / DS_t \quad (12)$$

donde DS_t representa el servicio de deuda en cada t . Cuanto más alto sea el $DSCR$, más efectivo disponible tendrá el proyecto para cumplir con sus obligaciones de deuda. La dinámica de $DSCR$ permite la implementación del modelo estructural de riesgo de crédito, ya que los niveles de $DSCR$ determinan los umbrales de incumplimiento por definición. De esta forma se puede dar una definición inequívoca del punto de incumplimiento (estricto), determinado en $DSCR = 1$; o una definición del punto de incumplimiento (técnico), determinado en $DSCR = 1, x$. Por tanto, un proyecto puede considerarse en incumplimiento 'estricto' si su $DSCR$ cae por debajo de 1. De esta forma, el conocimiento de la dinámica de $DSCR$ es suficiente para estimar la distancia al incumplimiento (DD).

Dado que el perfil del $DSCR$ está fuertemente relacionado con el riesgo (total) del proyecto, el conocimiento de la distribución del $DSCR$, junto con el servicio de deuda y la volatilidad de los flujos de efectivo son suficientes para la cuantificación del riesgo de crédito. Si se asume un proceso log-normal que caracteriza la dinámica estocástica del $DSCR$ en cada t , se tiene:

$$dDSCR_t / DSCR_t = \mu dt + \sigma dW_t \quad (13)$$

donde μ y σ representan la tasa de deriva del $DSCR$ y su correspondiente volatilidad, y se asume que estas son conocidas, por su parte, $W_{t \in [0, T]}$ es un proceso estándar de Wiener. Ahora, como el punto de incumplimiento (estricto) está determinado por:

$$DSCR_t \equiv CFADS_t / DS_t < 1,0 \quad (14)$$

Por su parte, la implementación a partir de la definición de incumplimiento técnico solo requiere ajustar la ratio de cobertura en $DSCR=1,x$.

Entonces, de forma análoga al modelo KMV, la distancia al incumplimiento en cada t es:

$$DD_t = \frac{CFADS_t - DS_t}{\sigma_{CFADS} CFADS_t} \quad (15)$$

donde σ_{CFADS} es la volatilidad de los $CFADS$. Este parámetro comprende un insumo importante para la implementación del modelo. Sin embargo, su estimación puede realizarse utilizando las mismas técnicas impregnadas en la teoría de opciones reales.

Ahora, con el propósito de evitar cualquier problema debido a la dependencia de escala del $CFADS$, el flujo de efectivo se reexpresa en términos de $DSCR$:

$$CFADS_t = DSCR_t \times DS_t \quad (16)$$

Al usar esta definición del $CFADS$, la distancia al incumplimiento se puede expresar como:

$$DD_t = \frac{1}{\sigma_{CFADS}} \left(1 - \frac{1}{DSCR_t} \right) \quad (17)$$

De igual forma, la ecuación (17) se puede reescribir como una función exclusiva del $DSCR$ expresando la volatilidad de los $CFADS$ en función de la volatilidad del $DSCR$ (σ_{DSCR}):

$$DD_t = \frac{1}{\sigma_{DSCR}} \frac{DS_{t-1}}{DS_t} \left(1 - \frac{1}{DSCR_t} \right) \quad (18)$$

donde $\sigma_{CFADS} = \left(\frac{DS_{t-1}}{DS_t} \right) \sigma_{DSCR}$. Cabe resaltar que sí, dadas las condiciones del crédito, se adopta un esquema de amortización con cuota fija, entonces: $\sigma_{CFADS} = \sigma_{DSCR}$, dado que $DS_{t-1} = DS_t$, para todo el periodo.

De igual forma, la probabilidad de incumplimiento $[P(t, T)]$ viene determinada por DD_t :

$$P(t, T) = N(-DD_t) \quad (19)$$

Sin embargo, esta medida incorpora las preferencias de riesgo de los inversionistas. Dado que la ecuación (13) muestra la dinámica del $DSCR$ en términos de la tasa de deriva (μ_t), la definición de la probabilidad de incumplimiento requiere incorporar un ajuste riesgo-neutral determinado por la prima por riesgo (λ). Este ajuste riesgo-neutral tiene como objetivo incorporar las preferencias de riesgo de los inversionistas en la modelación del $CFADS$, pero el desarrollo de una valoración usando la tasa libre de riesgo. Lo anterior indica que si los flujos de efectivo reflejan la naturaleza de riesgo de la inversión, éstos deben ser descontados a la tasa libre de riesgo en el modelo de valoración. De esta forma se tiene:

$$Q(t, T) = N(N^{-1}[P(t, T) + \lambda]) \quad (20)$$

donde $Q(t, T)$ ahora es la probabilidad de incumplimiento riesgo-neutral y λ es la prima por riesgo, conocida como coeficiente de Sharpe para un horizonte T : $\lambda = \frac{\mu - r}{\sigma} \sqrt{T}$. Este ajuste riesgo-neutral tiene como objetivo incorporar las preferencias de riesgo de los inversionistas en la modelación del $CFADS$, pero el desarrollo de una valoración usando la tasa libre de riesgo. Lo anterior indica que, si los flujos de efectivo reflejan la naturaleza de riesgo de la inversión, estos deben ser descontados a la tasa libre de riesgo en el modelo de valoración.

4. Aplicación.

Con el propósito de implementar la metodología presentada en este documento se propone un proyecto hipotético sencillo de concesión vial (una carretera de peaje) en Colombia bajo un esquema *BOMT* (*build-operate-maintenance-transfer*, por su sigla en inglés) que se detalla a continuación. A través del esquema *BOMT*, el gobierno otorga el permiso a los inversionistas privados para financiar, construir, operar, mantener la infraestructura durante un periodo de tiempo determinado y luego, al final del periodo de concesión, estos transfieren la infraestructura sin contraprestación alguna.

4.1. Acerca del proyecto de concesión, supuestos y resultados financieros.

El proyecto de concesión involucra la construcción, operación, mantenimiento y transferencia de una carretera de doble calzada con longitud de 80 km al norte del país por un periodo de tiempo total de 15 años. Los primeros 2 años representan la fase de diseño y construcción y los próximos 13 años la fase de operación y mantenimiento. Al finalizar el periodo, la infraestructura es devuelta a la autoridad pública sin contraprestación alguna. Todas las cifras están expresadas en pesos colombianos (COP) al año 2018.

La construcción de la carretera comprende una inversión total de \$287,825 mil millones y será ejecutada a través de un contrato llave en mano. Esta inversión requerirá unos desembolsos anuales de 40% (año 1) y 60% (año 2). La inversión será financiada mediante un aporte de capital por parte de los inversionistas que comprende el 40% del monto total y un crédito sindicado con bancos locales por valor de \$ 196,145 mil millones a un plazo de 10 años. El valor total del crédito incorpora la actualización de los desembolsos por IPC durante los años de la construcción más los intereses de la fase de construcción. La tasa de interés del crédito tiene como base el índice de precios al consumidor (IPC) más un margen de 5%, determinando así una tasa estimada a la fecha del 9%. Además, la amortización del crédito se realiza bajo esquema de cuota fija que se empezará a pagar desde el primer año de operación. Las condiciones del crédito exigen una ratio mínima de cobertura de la deuda (*DSCR*) equivalente a 1.3.

A partir del tercer año (primer año de operación del proyecto), la concesión tendrá a su cargo el funcionamiento de las casetas de cobro de peajes. La tarifa de peaje (promedio ponderado por categoría vehicular) autorizada a la fecha por la autoridad pública, la agencia nacional de infraestructura (*ANI*) corresponde a \$ 17,691, mientras el tráfico vehicular promedio (diario) estimado actualmente es de 4.080 vehículos en todas sus categorías (promedio ponderado). La Tabla 1 resume esta información y los demás supuestos del modelo financiero del proyecto.

Tabla 1. Supuestos del modelo financiero.

Duración	15 años
Moneda	COP
Inflación (IPC):	4%
Inversión total ^{i, ii}	\$272.825
Costos de operación ⁱⁱⁱ	\$4.407
Gastos de administración ^{iv}	10%
Tarifa de peaje	\$17.691
Trafico promedio diario (<i>TPD</i>)	4.080
Crecimiento anual del tráfico	6%
Impuesto a la renta	33%
Financiación	
Equity ^v	40%
Deuda ^v	60%

- i. La inversión total representa los recursos que necesita la infraestructura e incluye costos pre-operativos, estudios y diseños, compra de predios, capital de trabajo, costos financieros, interventoría, entre otros.
 ii-iii. Cifras en miles de millones de pesos.
 iv. Se estiman sobre los ingresos brutos de recaudo de peaje.
 v. Representa el aporte de los inversionistas privados e incorpora una tasa de rentabilidad mínima requerida del 12% (MARR).

Fuente: Elaboración propia.

Con estos supuestos, se procede a construir el modelo financiero del proyecto. La Tabla 2 resume los principales resultados del modelo financiero del proyecto, así como las estimaciones e indicadores de bondad (evaluación financiera), al igual que los ratios de cobertura (capacidad de pago) del proyecto.

Tabla 2. Estimaciones del proyecto.

Año	Tráfico vehicular esperado	CFADS ⁱ	Servicio de deuda	DSCR
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	1,674,686	40,362	30,564	1.32
4	1,775,167	44,226	30,564	1.45
5	1,881,677	48,501	30,564	1.59
6	1,994,578	53,230	30,564	1.74
7	2,114,253	58,460	30,564	1.91
8	2,241,108	64,244	30,564	2.10
9	2,375,574	70,638	30,564	2.31
10	2,518,108	77,706	30,564	2.54
11	2,669,194	85,518	30,564	2.80
12	2,829,346	94,150	30,564	3.08
13	2,999,107	103,688	30,564	-
14	3,179,053	114,225	30,564	-
15	3,369,796	125,865	30,564	-

i. Representa el flujo de efectivo disponible para cubrir el pago del servicio de la deuda.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta información, se estima el *VPN* del proyecto utilizando una tasa de descuento ajustada por riesgo, es nuestro caso el *WACC*: 8,42%, que refleja su estructura financiera. El *WACC* representa el costo promedio ponderado de capital del proyecto, a partir de la ponderación de los recursos de los inversionistas y la deuda contraída. Por simplicidad se asume una tasa de descuento constante para todo el periodo de evaluación. Como resultado se obtiene un *VPN* de \$19.297 y una *TIR* de 8,6%, lo que indica que el proyecto es viable financieramente y, por tanto, los inversionistas, así como los prestamistas, estarán dispuestos a participar en su financiación. De igual forma, el proyecto muestra una capacidad de pago del servicio de deuda al encontrar un *DSCR* mínimo de 1,32 para todo el periodo, mientras su promedio asciende a 2,08. Aunque el modelo financiero del proyecto en su presentación determinista muestra resultados favorables, es necesario realizar un análisis estocástico de esté enfocado en la estimación de las probabilidades de incumplimiento.

4.2. Estimación de la probabilidad de incumplimiento.

El primer paso para la estimación de la probabilidad de incumplimiento corresponde a la estimación de la volatilidad del (σ_{DSCR}). Dada las dificultades que se presentan en su estimación se recomienda adoptar un enfoque similar al aplicado en la teoría de opciones reales (para más detalles ver Copeland & Antikarov, 2001; Brandão, Dyer & Hahn, 2012). Para ello, se asume que $\sigma_{DSCR} = \sigma_{CFADS}$ según lo indicado en la sección 3. De esta σ_{DSCR} reflejará la volatilidad total del proyecto. Bajo este enfoque se genera el mayor número posible de trayectorias de los flujos de efectivo del proyecto.

Al modelar los flujos de efectivo es posible reflejar si se puede generar un evento de incumplimiento, al incorporar las distintas fuentes de riesgo del proyecto, asociados a incertidumbres tanto operativas como de mercado, a partir de diversos supuestos probabilísticos que reflejen su propia naturaleza, así como sus correlaciones. Una ventaja de este enfoque, como indica Gatti (2008), corresponde a la representación de todas las fuentes de incertidumbre del proyecto. Por tanto, la volatilidad permite reflejar aquellos escenarios críticos. Esta misma se aplica en la teoría de opciones reales. Para ello, se debe adoptar un modelo adecuado de evaluación de riesgos, por ejemplo, se puede adoptar una estructura de desglose de riesgos. Al aplicar, por ejemplo, el modelo de Copeland y Antikarov (2001) se obtiene una volatilidad del 15%.

Una vez se tiene la volatilidad (σ_{DSCR}) se procede a estimar la prima por riesgo ($\lambda = \frac{\mu-r}{\sigma} \sqrt{T}$), que al asumir una tasa libre de riesgo de 6% es equivalente a 0.2274. El siguiente paso corresponde a la estimación de la distancia al incumplimiento (DD) usando las ecuaciones (15) y (17) para cada año del periodo de amortización de la deuda. De igual forma, se define el punto de incumplimiento en sus dos versiones (estricto y técnico) según la ecuación (14), correspondientes a $DSCR_t < 1$ y $DSCR_t < 1.3$ (a partir de los supuestos del crédito sindicado acordado para el proyecto), respectivamente. La Tabla 3 resume los resultados obtenidos.

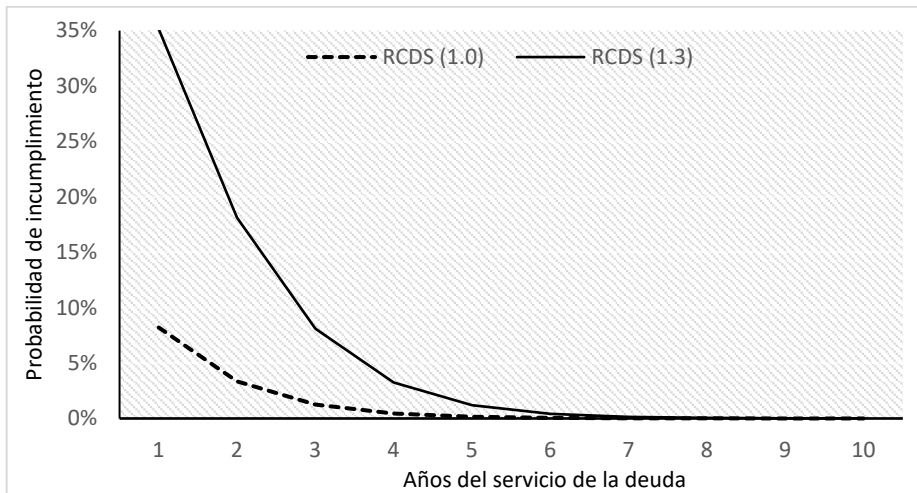
Tabla 3. Estimación de la probabilidad de incumplimiento.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<i>DSCR</i>	1.32	1.45	1.59	1.74	1.91	2.10	2.31	2.54	2.80	3.08
<i>DSCR < 1,0</i> <i>DD</i>	1.62	2.06	2.47	2.84	3.18	3.50	3.78	4.04	4.28	4.50
<i>Q(t,T)</i>	8.21%	3.35%	1.26%	0.45%	0.16%	0.05%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%
<i>DSCR < 1,3</i> <i>DD</i>	0.61	1.14	1.63	2.07	2.48	2.86	3.21	3.52	3.81	4.07
<i>Q(t,T)</i>	35.14%	18.12%	8.11%	3.25%	1.20%	0.42%	0.15%	0.05%	0.02%	0.01%

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 presenta dos resultados interesantes. En primer lugar, la diferencia entre utilizar un punto de incumplimiento estricto ($DSCR_t < 1$) y un incumplimiento técnico ($DSCR_t < 1.3$) dada la presencia de cláusulas restrictivas y *covenants* de la deuda. Estas diferencias se identifican mejor en la Figura 2.

Figura 2. Estimación de la probabilidad incumplimiento.



Fuente: Elaboración propia.

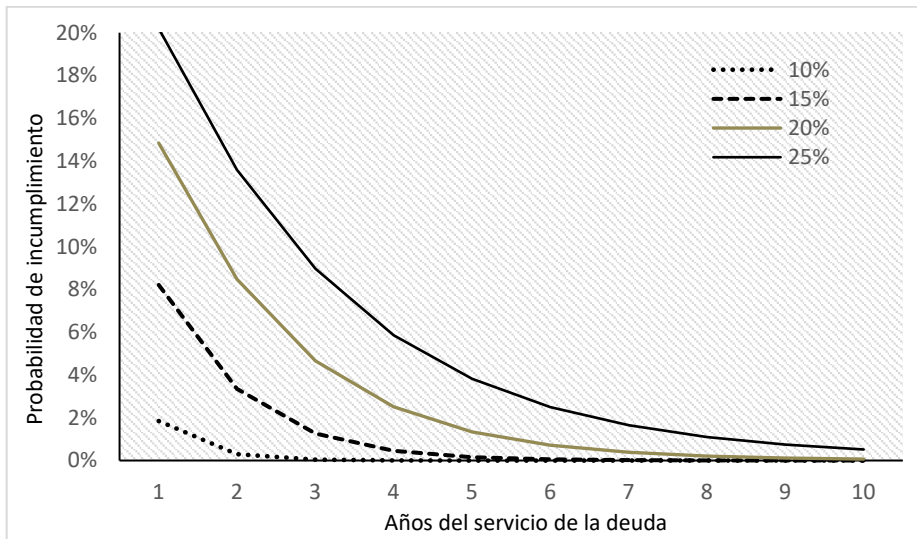
En su primer año, el proyecto alcanza el *DSCR* más bajo de todo el periodo (1.32), por lo tanto, la probabilidad de incumplimiento en este año va a ser la más alta, mientras que a medida que mejora su capacidad de pago, es decir, aumenta la relación entre *CFADS* y el servicio de deuda para cada año (t), la probabilidad va descendiendo gradualmente. Sin embargo, las diferencias que presenta el punto de incumplimiento (estricto: 1.0; técnico: 1.3) determinan diferentes niveles de probabilidad, con una diferencia de casi 27 puntos porcentuales. Esta diferencia se hace mínima al final del periodo de amortización cuando el *DSCR* es superior a 2.5. El resultado también puede analizarse desde la *DD*, valores de este cercanos a cero reflejan una mayor probabilidad de incumplimiento.

De igual forma, la estimación de la *EL* toma una dinámica similar a lo largo del periodo de amortización de la deuda, dada su relación directa con la probabilidad de incumplimiento. El hecho de que esta probabilidad descienda a niveles casi nulos al final del periodo indica que la *EL* cae considerablemente. En otras palabras, sin tener en cuenta los otros dos componentes, el comportamiento asintótico que toma la probabilidad se refleja directamente en la *EL*. Sin embargo, este análisis está incompleto, dado que tanto la *LGD* como la *EAD*, aunque están relacionados con la probabilidad, también tienen dinámicas propias como se analiza en la sección 5.

Finalmente, con el propósito de mostrar un análisis de sensibilidad de la probabilidad incumplimiento frente al parámetro de volatilidad, se realiza la estimación para todo el periodo de amortización del crédito, tomando diferentes volatilidades (10%, 15%, 20% 25%), las cuales son asignadas hipotéticamente (solo con propósitos comparativos). Para ello, se parte solo de la definición del incumplimiento estricto ($DSCR_t < 1$). La Figura 3 muestra las estimaciones correspondientes para cada caso.

Lo anterior confirma la relación directa entre volatilidad y la probabilidad incumplimiento. Relación que es notable para los *DSCR* más bajos. A partir de estos resultados, se encuentra que la propuesta de Blanc-Brude y Hasan (2016) en la que proponen estimar la probabilidad de incumplimiento a través de un modelo estructural como una extensión de modelo KMV de Moody's representa una propuesta práctica y sencilla de aplicar con grandes aplicaciones en todos los sectores de infraestructura.

Figura 3. Estimación de la probabilidad de incumplimiento.



Fuente: Elaboración propia.

5. Discusión final y conclusiones.

Los modelos estructurales de riesgo de crédito para deuda corporativa asumen que el valor de la empresa es observable y que el incumplimiento ocurre cuando el valor de los activos cae por debajo del valor de la deuda. Éste es el principal insumo en el modelo de Merton (1974). Este desarrollo ha sido adaptado al tratamiento de riesgo de crédito en el campo de la financiación proyectos, especialmente inversiones en infraestructura, con resultados sorprendentes. Sin embargo, su aplicación merece un tratamiento cuidadoso, dado que el riesgo debe estimarse periódicamente durante toda la vida de la deuda, con el propósito de evaluar la dinámica de pago (capacidad de pago del servicio de la deuda) del proyecto a través del flujo de efectivo disponible.

Además, dada la naturaleza compleja de un evento de incumplimiento en campo de los proyectos, el tratamiento del riesgo de crédito está fundamentado en los umbrales definidos por la ratio de cobertura del servicio de deuda (*DSCR*). Sin embargo, cuando se incumple este umbral (el nivel mínimo preestablecido), se debe tener presente que el evento no implica necesariamente un incumplimiento en sentido 'estricto', dada la presencia de *covenants* que llevan a la definición del incumplimiento 'técnico'. Por tal motivo, la definición de un umbral superior ($1.x$) puede utilizarse como un desencadenante para que, tanto prestamistas como patrocinadores, tomen las medidas necesarias para evitar el deterioro de las condiciones crediticias.

El análisis anterior debe extenderse para incorporar el efecto de una reestructuración del contrato de deuda en caso de un evento de incumplimiento. Dado que los prestamistas pueden aceptar una reestructuración en lugar de permitir que el proyecto incumpla el pago de la deuda, dadas las consecuencias adversas que esto produce. Estos efectos adversos incluyen la pérdida de calidad crediticia, el aumento de los costos de financiación y, por ende, una caída en el valor del proyecto. Según Gatti (2008), el contrato de deuda puede incorporar cláusulas que les permite a los prestamistas tomar medidas de control para evitar que la capacidad pago del proyecto se vea afectada. Por tanto, en un evento de incumplimiento, los prestamistas estarán dispuestos a tomar medidas correctivas para mantener el proyecto en normal funcionamiento, medida que incluso, puede generar una pérdida para ellos, dado que la re-estructuración puede extender los plazos de amortización, reducir el pago de intereses y honorarios o, por el contrario, acelerar su tasa de recuperación. Por tal razón, los componentes del riesgo de crédito (*LGD* y *EAD*) pueden cambiar en un escenario de este tipo, por lo

que los modelos de estimación deben incorporar estos ajustes. Es común que estas medidas correctivas les permita renegociar las condiciones actuales de la deuda, cambiando los plazos de amortización, el pago de intereses, la incorporación de créditos subordinada. Incluso, los prestamistas pueden llegar a sustituir a los contratistas, operadores y proveedores, cuando las condiciones lo merecen.

La incorporación de eventos de re-estructuración requiere determinar, en caso de un incumplimiento, cómo los factores desencadenantes afectan la estimación de los componentes de *LGD* y *EAD*. Con respecto a la *LGD*, se sabe que la tasa de recuperación depende claramente de los *CFADS* futuros y, por tanto, del valor del proyecto en caso de incumplimiento. Aunque su aplicación puede ser compleja, estos se pueden incorporar a partir de la descomposición de *Black-Cox* en el modelo estructural propuesto por Blanc-Brude y Hasan (2016). La descomposición de *Black-Cox*, propuesta por Black y Cox (1976), comprende un método utilizado para valorar deuda corporativa en escenarios de reestructuración o refinanciación cuando el valor de los activos de la empresa alcanza un límite (inferior o superior). De esta forma, el modelo de estimación debe requerir de un ajuste adicional, dado que solo contempla la dinámica que proporciona el flujo de efectivo.

Este ajuste se presenta a partir de una descomposición que incorpora cuatro funciones de pago dadas a continuación:

1. $P(T_D, CFADS_{T_D})$: pago final al vencimiento de la deuda, donde T_D representa el vencimiento de la deuda.
2. $\underline{P}(\tau, CFADS_\tau)$: valor de los activos si el *CFADS* alcanza el límite inferior, es decir, un incumplimiento, en el tiempo τ , llevando a un estado de reestructuración.
3. $\overline{P}(\tau, \overline{CFADS}_\tau)$: valor de los activos si el *CFADS* alcanza el límite superior en el tiempo τ y corresponde a un estado de refinanciación, debido a que permite acelerar el pago de la deuda, junto con una reducción en sus costos.
4. $p'(t, CFADS_t)$: pago de la deuda realizado antes del vencimiento o la reestructuración.

Así, el valor total de los activos corresponde al valor presente (esperado) de la suma de las cuatro funciones de pago, bajo la medida de probabilidad riesgo-neutral. Si se define $h(V_t, t)$ como el valor de los activos en un momento t y $K(\cdot)$ denota el intervalo $(CFADS_\tau(\cdot), \overline{CFADS}_\tau(\cdot))$, y V_t es el valor de todos los flujos de efectivo futuros, entonces para cada función de pagos se tiene:

$$\begin{aligned} h_1(V_t, t) &= E \left[e^{-r_{T_D, t}(T_D - t)} P(T_D, CFADS_{T_D}) \right] \\ &= e^{-r_{T_D, t}(T_D - t)} \int_{K(T)} (T_D, CFADS_{T_D}) dF^* \end{aligned} \quad (20)$$

$$h_2(V_t, t) = \int_t^T e^{-r_{CFADS, t}(T_{CFADS} - t)} \times \underline{P}(CFADS_{T_{CFADS}}, T_{CFADS}) dF_{T_{CFADS}}^* \quad (21)$$

$$h_3(V_t, t) = \int_t^T e^{-r_{\overline{CFADS}, t}(T_{\overline{CFADS}} - t)} \times \overline{P}(CFADS_{T_{\overline{CFADS}}}, T_{\overline{CFADS}}) dF_{T_{\overline{CFADS}}}^* \quad (22)$$

$$h_4(V_t, t) = \int_t^{T_D} e^{-r_{s, t}(s - t)} \times \left[\int_{K(T)} p'(CFADS_s, s) dF^*(CFADS_s, s) \right] ds \quad (23)$$

donde dF^* es la probabilidad de que *CFADS* descienda del umbral durante T_D , $F_{T_{CFADS}}^*$ define la función de densidad cuando el *CFADS* alcanza el límite de incumplimiento, mientras $F_{T_{\overline{CFADS}}}^*$ define la función de densidad cuando alcanza el límite superior (re-financiación).

De esta forma, el valor total de los activos ($V^s(V_t, t)$) será determinado por:

$$V^s(V_t, t) = \sum_{i=1}^{i=4} h_i(V_t, t) \quad (24)$$

donde $h_i(V_t, t)$ es el valor determinado por la i -ésima función de pagos.

Dada la complejidad en la implementación en la descomposición de *Black-Cox*, Gatti (2008) propone un enfoque alternativo a partir de la técnica de simulación de Monte Carlo. Sin embargo, esta requiere una aplicación de varios niveles o etapas de simulación. Una vez se obtienen los resultados del modelo de Monte Carlo (en su primera etapa), para estimar la probabilidad de incumplimiento, se debe ejecutar un conjunto de simulaciones para cada escenario por incumplimiento, con el objetivo de obtener la distribución de los valores de *LGD*. Gatti (2008) también señala que se puede emplear un ejercicio más simple de estimación para evitar la complejidad computacional. En este caso, se puede asumir un valor fijo de la *LGD* mientras se modela el valor del proyecto en caso de incumplimiento (etapas 1 y 2). Sin embargo, esta alternativa genera un problema de subestimación en el riesgo, dado que omite la correlación positiva que existe entre la probabilidad de incumplimiento y la *LGD*: una caída de los flujos de efectivo aumenta directamente la probabilidad de incumplimiento, al tiempo que reduce la tasa de recuperación para los prestamistas. Además, como señala Gatti (2008), este ejercicio puede proveer información adicional relevante para el análisis de riesgos del proyecto, como lo es el *VaR* definido a un nivel de confianza (por ejemplo, 99.9%) y un horizonte de tiempo determinado, o para cada año de vida de la deuda.

Este tipo de aplicaciones usando la técnica de simulación de Monte Carlo es utilizada por Gatti et al. (2007) para la estimación del valor en riesgo (*VaR*, por su sigla en inglés) del proyecto. Sin embargo, el lector debe tener presente que la modelación de factores de riesgo representa un tema crítico, donde los juicios y criterios propios tienen un gran efecto en la evaluación de riesgo y, por ende, en la estimación de la probabilidad de incumplimiento.

Referencias

- Aragones, J., Blanco, C., & Iniesta, F. (2009). Modelización del riesgo de crédito en proyectos de infraestructuras. *Innovar*, 19(35), 65-80.
- Basel Committee on Banking Supervision (2004). *Basel II: International Convergence of Capital Measurement and Capital Standards: a Revised Framework*. Bank for International Settlements, Basel.
- Black, F., & Cox, J. (1976). Valuing corporate securities: Some effects of bond indenture provisions. *The Journal of Finance*, 31(2), 351-367.
- Black, F., & Scholes, M. (1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *The Journal of Political Economy*, 81(3), 637-654.
- Blanc-Brude, F., & Hasan, M. (2016). A Structural Model of Credit Risk for Illiquid Debt. *The Journal of Fixed Income*, 26(1), 6-19.
- Blanc-Brude, F., Hasan, M., & Ismail, R (2014). Unlisted Infrastructure Debt Valuation & Performance Measurement. *EDHEC-Risk Institute Publications*.
- Blanc-Brude, F., Hasan, M., & Whittaker, T. (2016). Cash Flow Dynamics of Private Infrastructure Project Debt: Empirical evidence and dynamic modelling. *EDHEC-Risk Institute Publications*.

- Blanc-Brude, F., Hasan, M., & Whittaker, T. (2018). Calibrating credit risk dynamics in private infrastructure debt. *The Journal of Fixed Income*, 27(4), 54-71.
- Blanc-Brude, F., & Strange, R. (2007). How Banks Price Loans to Public-Private Partnerships: Evidence from the European Markets. *Journal of Applied Corporate Finance*, 19(1), 94-106.
- Borgonovo, E., & Gatti, S. (2013). Risk analysis with contractual default. Does covenant breach matter? *European Journal of Operational Research*, 230(2), 431-443.
- Boussabaine, A. (2013). *Risk pricing strategies for public-private partnership projects*. New York: John Wiley & Sons.
- Brandão, L., Dyer, J., & Hahn, W. (2012). Volatility estimation for stochastic project value models. *European Journal of Operational Research*, 220(3), 642-648.
- Buscaino, V., Caselli, S., Corielli, F., & Gatti, S. (2012). Project finance collateralised debt obligations: An empirical analysis of spread determinants. *European Financial Management*, 18(5), 950-969.
- Cartea, Á., & Figueroa, M. (2005). Pricing in Electricity Markets: A Mean Reverting Jump Diffusion Model with Seasonality. *Applied Mathematical Finance*, 12(4), 313-335.
- Copeland, T., & Antikarov, V. (2001). *Real Options: A practitioner's guide*. New York: Texere Publishing Limited.
- Della, R., & Yermo, J. (2013). Institutional investors and infrastructure financing. *OECD Working Papers on Finance, Insurance and Private Pensions*, No. 36, OECD Publishing.
- Dong, F., Chiara, N., Kokkaew, N., & Xu, A. (2012). Copula-Based Portfolio Credit Risk Assessment in Infrastructure Project Financing. *Journal of Private Equity*, 15(2), 31-40.
- Freydefont, M. (2001). An Approach to Credit Risk Valuation for Structured and Project Finance Transactions. *Journal Of Project Finance*, 6(4), 53-67.
- Gatti, S. (2008). *Project finance in theory and practice: designing, structuring, and financing private and public projects*. Oxford: Academic Press.
- Gatti, S., Rigamonti, A., Saita, F., & Senati, M. (2007). Measuring Value-at-Risk in project finance transactions. *European Financial Management*, 13(1), 135-158.
- Grimsey, D., & Lewis, M. (2002). Evaluating the risks of public private partnerships for infrastructure projects. *International Journal of Project Management*, 20(2), 107-118.
- Ingersoll, J. (1977). A contingent-claims valuation of convertible securities. *Journal of Financial Economics*, 4(3), 289-321.
- Karminsky, A., & Morgunov, A. (2016). The assessment of the credit risk of investment projects. *XVI прельская международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества*. Moscú, National Research University Higher School of Economics, 721-731.
- Kealhofer, S. (1993). Portfolio management of default risk. *KMV Corporation*.
- Klompjan, R., & Wouters, M. (2002). Default Risk in Project Finance. *The Journal of Structured Finance*, 8(3), 10-21.

- Kong, D., Tiong, R., Cheah, C., Permana, A., & Ehrlich, M. (2008). Assessment of Credit Risk in Project Finance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(11), 876-884.
- McQuown, J. (1993). Market vs. accounting based measures of default risk. *KMV Corporation*.
- Merton, R. (1973). Theory of Rational Option Pricing. *Bell Journal of Economics and Management Science*, 4(1), 141-183.
- Merton, R. (1974). On the Pricing of Corporate Debt: The Risk Structure of Interest Rates. *The Journal of Finance*, 29(2), 449-470.
- Vasicek, O. (1984). The philosophy of credit valuation: the credit valuation model. *KMV Corporation*.
- Yescombe, E. (2002). *Principles of Project Finance*. San Diego: Academic Press.



Modelo de ecuaciones estructurales para determinar la intención de emprendimiento de estudiantes de posgrado

IDROVO POVEDA, FERNANDA KATHERINE
Universidad Técnica de Ambato (Ecuador)
Correo electrónico: ferkath@hotmail.com

VERDESOTO VELÁSTEGUI, OSWALDO SANTIAGO
Universidad Técnica de Ambato (Ecuador)
Correo electrónico: oswaldosverdesoto@uta.edu.ec

VALENCIA NÚÑEZ, EDISON ROBERTO
Universidad Técnica de Ambato (Ecuador)
Correo electrónico: edisonrvalencia@uta.edu.ec

CÓRDOVA, VÍCTOR HUGO
Universidad Técnica de Ambato (Ecuador)
Correo electrónico: victorhcordova@uta.edu.ec

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se aborda, a través de la utilización de estadísticos y la revisión de literatura científica, el estudio de los determinantes de la intención de emprendimiento, tomando como caso de estudio a los estudiantes de posgrado de la Facultad de Ciencias Administrativas de la Universidad Técnica de Ambato, basándose en la Teoría del Comportamiento Planificado propuesto por Ajzen en el año 1991. De esta manera, se identifica cómo en el ámbito formativo, ciertos factores influyen de diferente manera, para generar la intención emprendedora. El estudio realizado permite conocer además las distintas percepciones que tienen los estudiantes acerca del emprendimiento y su tendencia a generar o no, un negocio propio.

Palabras clave: actitud emprendedora, conducta emprendedora, control del comportamiento, determinantes de la intención, emprendimiento, espíritu emprendedor, estudiantes de posgrado, intención de emprendimiento, teoría del comportamiento planificado.

Clasificación JEL: C12; I23; M13; M16.

MSC2010: 03F65; 34F05.

Structural equation model to determine the entrepreneurship intention of graduate students

ABSTRACT

In this research work, through the use of statistics and the review of scientific literature, the study of the determinants of entrepreneurship intention is approached, taking as a case study the postgraduate students of the Faculty of Administrative Sciences from the Technical University of Ambato, based on the Theory of Planned Behavior proposed by Ajzen in 1991. In this way, it is identified how in the training field, certain factors influence in different ways, to generate entrepreneurial intention. The study also allows to know the different perceptions that students have about entrepreneurship and their tendency to generate or not, a business of their own.

Keywords: entrepreneurial attitude, entrepreneurial behavior, behavior control, determinants of intention, entrepreneurship, entrepreneurial spirit, graduate students, entrepreneurial intention, theory of planned behavior.

JEL classification: C12; I23; M13; M16.

MSC2010: 03F65; 34F05.



1. Introducción.

El emprendimiento es considerado como un aspecto fundamental para el desarrollo económico de un país. Por ello, en los últimos años, se ha tomado un especial interés en su estudio y los factores que lo generan. La comprensión de la conducta emprendedora está relacionada con la intención de emprendimiento y, además, muchos estudios han revelado que la intención, precede al comportamiento emprendedor.

La generación de la conducta emprendedora, se considera esencial para el desarrollo de una nación, ya que, a través de la creación de empresas y fuentes de empleo, se facilita el crecimiento económico. Para que se suscite esta conducta, es necesario que el individuo cuente con la intención y, además, esté centrado en el cumplimiento de un objetivo, lo que influye en las acciones que realice para concretar ese fin.

Para la presente investigación, se tomó como base a la Teoría del Comportamiento Planificado, creada por Ajzen en el año de 1991, que predice adecuadamente las intenciones emprendedoras, analizando la influencia de tres factores: la actitud hacia la conducta, la norma subjetiva y el control sobre la conducta. En el estudio realizado y a través del análisis de estos factores, se pretende conocer cuáles son los determinantes, que influyen en la intención de emprendimiento de estudiantes de posgrado.

El estudio de las variables de actitud, normas subjetivas y control del comportamiento, permite conocer las apreciaciones de los estudiantes sobre la factibilidad de emprender. El presente trabajo tiene como objetivo determinar cuál de las variables independientes, tiene mayor influencia sobre la intención de emprendimiento. A su vez, se busca conocer los dos principales indicadores de cada una de ellas, que contribuirán posteriormente a generar la conducta emprendedora. Para este fin, se utilizará un modelo de ecuaciones estructurales por el método de mínimos cuadrados parciales.

Con los resultados que se obtengan, se diseñará un modelo de determinantes de la intención de emprendimiento que muestre los principales factores que influyen sobre la misma, con la finalidad de potenciarlos en una población determinada.

2. Antecedentes.

Para muchas personas la palabra emprendimiento es considerada como un nuevo concepto; sin embargo, ha estado presente a lo largo de la historia de la humanidad. El emprendimiento es la capacidad que tienen los seres humanos de crecer y autosustentarse de una manera novedosa y con ideas renovadas. Ser emprendedor requiere de habilidades no solamente a nivel individual, sino también a nivel colectivo (Jaramillo, 2008).

David McClelland (citado por Marulanda Montoya & Vélez, p.211), en el año de 1961 expresó que la necesidad de logro es lo que motiva realmente a una persona a convertirse en emprendedor y a su vez, este factor, es en parte el responsable del crecimiento económico. Este autor demuestra en sus investigaciones que este rasgo no es obligatoriamente innato, sino que se puede desarrollar en la persona (Marulanda, Montoya, & Vélez, 2014).

La diferencia entre un emprendedor y un individuo común la establece su actitud. El emprendedor es la persona capaz de crear, concretar sus ideas, innovar, asumir riesgos y enfrentar problemas. Posee iniciativa propia y sabe crear la estructura necesaria para emprender su proyecto, se comunica y genera redes de comunicación, tiene capacidad convocatoria y de liderazgo (Formichella & Massigoge, 2004).

Las intenciones de comportamiento constituyen un paso previo a la conducta real, es por ello que se busca explicar la intención de emprender (González et al., 2016). Este análisis se vuelve fundamental

ya que, según la intencionalidad, se ejecutará el comportamiento emprendedor o creación de una empresa.

Albert Shapero considera que la necesidad de emprender es el resultado de la acción humana y es propia de cada contexto. Identifica una variable independiente, referida al empresario, y una dependiente denominada evento empresarial, que hace referencia a las siguientes características: administración, autonomía, recursos, toma de iniciativa y riesgos. En su modelo, plantea que existen dos grandes percepciones: de conveniencia, que se refiere a las experiencias, valores y son el resultado de la posición de la persona en la matriz de cultura, educación y posición socioeconómica, y la segunda, de factibilidad, considerada como una amalgama de conocimientos, recursos y garantías obtenidos en un negocio o educación formal. Ambas dan origen al proceso de emprendimiento (Parra & Fleitas, 2010).

Por otro lado, la Teoría de la Expectativa/Valoración atribuida a Víctor Vroom (citado por Marulanda, Montoya & Vélez, p.212) en 1964, se desarrolló con la finalidad de predecir los niveles de motivación de los individuos. Esta teoría explica la motivación basada en tres tipos de relaciones: (1) probabilidad de que el esfuerzo conducirá a un resultado, (2) lo atractivo de los resultados previstos y (3) la creencia de que un nivel de rendimiento se traducirá en el resultado deseado (Marulanda, Montoya, & Vélez, 2014)

Por otra parte, en cuanto a las motivaciones para emprender, se destaca el deseo de independencia. El factor económico también es un aspecto determinante (Marulanda & Morales, 2016). Las tendencias que estimulan al emprendimiento por necesidad son fundamentalmente tres: la necesidad de buscar empleo, la temporalidad del empleo conseguido y la búsqueda de independencia (Morales & Ariza, 2012). La iniciativa empresarial involucra un cambio cultural que impacta de dos formas: mejorando competencias como liderazgo y comunicación y, a través de un incremento en la innovación y motivación (Leite, Sánchez-Fernández, Leite & Bezerra, 2015). Para muchos, el espíritu emprendedor depende de la formación que tiene lugar en el hogar durante los primeros años de vida. Ahí, las personas perciben de mejor manera la motivación para autoemplearse en el futuro (Carlos, Contreras, Silva & Liquidano, 2015).

La Teoría de la Acción Razonada (TRA) constituye un modelo de gran relevancia dentro de la literatura sobre el comportamiento de los sujetos. Se explica sobre la base de la relación entre la actitud y norma subjetiva, lo cual influye en la intención y a su vez, esta última en la conducta. Esta teoría desarrollada por Ajzen y Fishbein (citado por Rueda, Fernandez-Laviada & Herrero, p.144), en el año de 1980, considera la intención del comportamiento como el mejor predictor de la conducta. De acuerdo con la TRA, el antecedente directo del comportamiento emprendedor, será su intención de desarrollar dicha conducta en el futuro (Rueda, Fernández-Laviada, & Herrero, 2013). En el año de 1991, Icek Ajzen desarrolla una nueva teoría a partir de la propuesta, complementándola con un nuevo factor y la denomina Teoría del Comportamiento Planificado.

Basado en el modelo de la Teoría del Comportamiento Planificado, la intención de emprendimiento se puede explicar por las actitudes personales y la percepción del control del comportamiento. Como muchos estudios plantean, para los estudiantes la intención está determinada por la percepción de la conveniencia de desarrollar una carrera empresarial. Según otras investigaciones, dicha percepción no viene dada por las normas subjetivas. Ajzen (citado por Osorio & Londoño, p. 123), en el año de 1987 explicó que este resultado se puede dar cuando las personas tienen un alto nivel de control interno. La búsqueda de independencia y el desarrollo personal también están asociados a la intención de emprendimiento. También puede determinarse por la confianza que tienen los estudiantes en su capacidad de emprender nuevas acciones (Osorio & Londoño, 2015).

En otros estudios también se han encontrado asociaciones entre la conveniencia percibida, la viabilidad y la tolerancia al riesgo. Estos factores no son independientes entre sí, sino que se encuentran relacionados, como lo propone la TCP (Valencia, Cadavid, Ríos & Awad, 2012). Tanto la actitud hacia la creación de empresas como la deseabilidad de este comportamiento dependen de la viabilidad

percibida, mientras que ésta, dependería de la norma subjetiva asociada a un contexto familiar (López & Ruiz-Ruano, 2014). La educación emprendedora universitaria puede tener efectos significativos en la intención emprendedora. Sin embargo, se desarrolla en estudiantes que poseen ciertas características (Soria-Barreto, Zuniga-Jara & Ruiz-Campo, 2016).

Para la presente investigación se utilizará el modelo propuesto en la Teoría del Comportamiento Planificado, la cual está científicamente comprobada y ha sido el punto de partida para el desarrollo de estudios a nivel mundial. Los investigadores Krueger y Carsrud, y Krueger y Brazeal (citado por Marulanda, Montoya & Vélez, p.220) en los años de 1993 y 1994 respectivamente, coincidieron en que la TCP constituye una base sólida en la investigación del emprendimiento. Dos de sus antecedentes actitudinales reflejan la deseabilidad percibida en la realización de una conducta y el control del comportamiento, denota la factibilidad de ejecución de la misma (Marulanda, Montoya, & Vélez, 2014).

3. Población y variables.

Población

Las unidades de estudio que se utilizarán corresponden a los estudiantes de posgrado de la Facultad de Ciencias Administrativas de la Universidad Técnica de Ambato.

Para la presente investigación se ha considerado necesario trabajar con la totalidad de las unidades de estudio anteriormente descritas, es decir, con la población de estudiantes de posgrado de la Facultad de Ciencias Administrativas, considerando para el efecto a 122 estudiantes que se encuentran matriculados y asistiendo a clases.

Variables

El proyecto de investigación va a hacer uso de las variables actitud, norma subjetiva, control del comportamiento e intención de emprendimiento. La actitud que tiene una persona hacia una conducta determinada, refleja el grado en que está valorada de manera positiva o negativa. La actitud se determina por las creencias que la unen con resultados y la evaluación de los mismos. Se adquieren cuando se genera una creencia hacia una persona o un objeto. Las actitudes influyen directamente en la toma de decisiones ya que denotan una acción del individuo ante una oportunidad o estímulo (Guzmán, García, Rodríguez & Alonso, 2014).

Un segundo elemento expone que el individuo se ve condicionado por las expectativas que existen por parte de las demás personas, en relación a su comportamiento. Las normas sociales generan ciertos sentimientos en el sujeto, que impulsan o reducen el deseo de realizar una conducta (Ventura & Quero, 2013). La norma subjetiva es un razonamiento que pone de manifiesto la presión social percibida por el sujeto que se dispone a ejecutar una conducta. Está determinada por dos componentes: la percepción de aprobación de personas importantes para el individuo y la motivación de éste para acomodarse a los deseos de esas personas (Guzmán, García, Rodríguez & Alonso, 2014).

Como tercer factor, el control del comportamiento se define como la percepción que tiene una persona sobre la capacidad de controlar las dificultades que se presentan al momento de realizar una determinada conducta (Guzmán, García, Rodríguez & Alonso, 2014). Depende de la percepción que tiene un individuo sobre su habilidad para llevarla a cabo. El control conductual está determinado por otros factores como son la autoeficacia, los recursos y las creencias de control. Ellos son determinantes para la consecución de un determinado comportamiento u objetivo (Osorio & Londoño, 2015).

La intención se puede definir como la inclinación de la voluntad hacia un determinado propósito. La intención de emprendimiento consiste en el auto-reconocimiento de la convicción de crear un negocio y la planificación consciente para su realización en un tiempo futuro. La cultura del individuo,

el sistema de valores y su entorno social pueden conformar el deseo o no, de crear un negocio propio, es decir, de emprender (Soria-Barreto, Zuniga-Jara & Ruiz-Campo, 2016). La existencia de la intencionalidad de emprendimiento constituye un elemento principal para que se produzca el comportamiento emprendedor. Esto conlleva a la creación de empresas y al crecimiento económico.

4. Metodología.

Los modelos de ecuaciones estructurales (Structural Equation Modeling, SEM) son una rama de los modelos estadísticos multivariantes y permiten estimar las relaciones entre múltiples variables (Ruiz, Pardo & San Martín, 2010). Ayudan a examinar simultáneamente una serie de relaciones de dependencia y los efectos de unas variables sobre otras (Cupani, 2012). Estos modelos tratan de integrar una serie de ecuaciones lineales y establecer cuáles son dependientes o independientes de otras.

La técnica SEM surge de la necesidad de encontrar flexibilidad en los modelos de regresión (Escobedo, Hernández, Estebané & Martínez, 2016). Son menos restrictivos, ya que permiten incluir errores de medida tanto en las variables de criterio (dependientes) como en las variables predictoras (independientes). Matemáticamente, estos modelos son más complejos que otras técnicas multivariantes como el análisis factorial exploratorio o la regresión (Ruiz, Pardo & San Martín, 2010).

De manera general, los SEM permiten inicialmente crear modelos del error de medida. Posteriormente, incorporan constructos inobservables (variables latentes y variables teóricas no observadas). Además, confronta el conocimiento a priori e hipótesis con datos empíricos, por lo que estos modelos son más confirmatorios que exploratorios (Escobedo, Hernández, Estebané & Martínez, 2016).

Con respecto a su estimación, la técnica SEM se basa en la correlación existente entre las variables medidas de una muestra o población, en un momento dado. Los puntos fuertes de estos modelos son: haber desarrollado criterios que permiten su representación gráfica, la posibilidad de concatenar efectos entre variables, permitir relaciones de reciprocidad entre ellas y la posibilidad de confirmar y confrontar hipótesis (Ruiz, Pardo & San Martín, 2010). Existen dos tipos de indicadores dentro de este modelo: (1) indicadores reflectivos, que dependen de la variable latente y (2) indicadores formativos, que causan a la variable latente (Leyva & Olague, 2014).

Los especialistas en los modelos SEM coinciden en que, para aplicar esta técnica, se deben cumplir seis fases: (1) la especificación, en donde el investigador establece la relación hipotética entre las variables, (2) la identificación, en la que se determina si un modelo está identificado por una expresión algebraica que lo demuestre, (3) la estimación de parámetros, en donde se determinan los valores de parámetros desconocidos y su error de medición, (4) evaluación del ajuste, que se refiere a la exactitud en los datos del modelo para determinar si es correcto, (5) reespecificación del modelo, para lo que es necesario buscar métodos para mejorar el ajuste del mismo, cambiando los parámetros del original y (6) interpretación de resultados, en donde se aceptan o rechazan las hipótesis planteadas (Escobedo, Hernández, Estebané & Martínez, 2016).

El principal aporte que realiza SEM es que ayuda al investigador a evaluar modelos teóricos, siendo una de las herramientas más potentes para el estudio de relaciones causales. Estos modelos contribuyen a seleccionar hipótesis causales relevantes, eliminando aquellas no sustentadas por la evidencia empírica (Cupani, 2012).

Para la presente investigación se utiliza el modelo de ecuaciones estructurales por el método de mínimos cuadrados parciales (Partial Least Squares-PLS), teniendo en cuenta que los indicadores son de tipo formativo. La regresión por mínimos cuadrados parciales se utiliza para reducir las dimensiones del conjunto de variables explicativas. Este modelo busca específicamente predecir variables dependientes, por lo que resulta de utilidad para propósitos de análisis causal predictivo. La regresión

PLS identifica los componentes de la variable dependiente que son los más adecuados para explicar la variable dependiente (Leyva & Olague, 2014).

Recolección de datos

El método de la encuesta ha sido aplicado a preguntas que fueron respondidas por los estudiantes de posgrado de la Facultad de Ciencias Administrativas de la Universidad Técnica de Ambato. Se distribuyeron las encuestas a los estudiantes durante sus clases. Se solicitó a los mismos que completaran los cuestionarios en presencia de la investigadora y los devolvieran sin dejar preguntas sin responder. Los encuestados fueron informados sobre el propósito de la investigación y se les aseguró el completo anonimato.

Es importante mencionar que, para la presente investigación, se utilizó el cuestionario de intención emprendedora diseñado y probado por Liñán y Chen, entre los años 2006 y 2009 (citado por Malebana, p.134). El cuestionario fue diseñado exclusivamente para la teoría del comportamiento planificado tal como se aplica al emprendimiento. Esta encuesta se ha aplicado y validado en diversos países desarrollados y en desarrollo (Malebana, 2014).

La encuesta consiste en preguntas basadas en la escala Likert de cinco puntos (1=Totalmente de acuerdo y 5=Totalmente en desacuerdo), una pregunta nominal y una cuantitativa. Las preguntas de tipo escala Likert se usan para la intención empresarial (cuatro ítems), la actitud para convertirse en emprendedor (cinco ítems), el control conductual percibido (siete ítems) y las normas subjetivas (tres ítems), mientras que la escala nominal se utiliza para el sexo (1=Femenino y 2=Masculino) y finalmente la pregunta de tipo cuantitativo, en donde se solicita información sobre el rango de edad del sujeto. Para el análisis de la relación causal entre variables por el método de ecuaciones estructurales por mínimos cuadrados parciales, se utiliza el programa SmartPLS. Los indicadores aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Indicadores.

INTENCION_1	Estoy listo para hacer cualquier cosa para ser un emprendedor.
INTENCION_2	Mi objetivo profesional es ser un emprendedor.
INTENCION_3	Haré todo lo posible para comenzar y dirigir mi propio negocio.
INTENCION_4	Estoy decidido a crear una empresa en el futuro.
ACTITUD_1	Ser emprendedor implica más ventajas que desventajas para mí.
ACTITUD_2	Una carrera como emprendedor es totalmente atractiva para mí.
ACTITUD_3	Si tuviera la oportunidad y los recursos, me gustaría comenzar un negocio.
ACTITUD_4	Entre varias opciones, prefiero ser un emprendedor.
ACTITUD_5	Ser emprendedor me daría una gran satisfacción.
CCP_1	Comenzar un negocio y mantenerlo funcionando sería fácil para mí.
CCP_2	Puedo controlar el proceso de creación de un nuevo negocio.
CCP_3	Tendría un control completo sobre la situación si empiezo y dirijo un negocio.
CCP_4	Estoy dispuesto a hacer cualquier cosa para ser un emprendedor.
CCP_5	Conozco todos los detalles prácticos necesarios para comenzar un negocio.
CCP_6	Si quisiera, podría comenzar y dirigir un negocio fácilmente.
CCP_7	Si tratara de comenzar un negocio, tendría muchas posibilidades de tener éxito.
NS_1	Mis amigos aprobarían la decisión de comenzar un negocio.
NS_2	Mi familia cercana aprobaría la decisión de comenzar un negocio.
NS_3	Mis colegas aprobarían la decisión de comenzar un negocio.

Fuente: Elaboración propia.

5. Resultados.

Tabla 2. Resultados del modelo estructural.

	Estadísticos t	P Valores
ACTITUD → INTENCIÓN	5.643	0.000
CONTROL DEL COMPORTAMIENTO → INTENCIÓN	2.514	0.012
NORMAS SUBJETIVAS → INTENCIÓN	0.318	0.751

Fuente: SmartPLS.

Se analizó el modelo utilizando la técnica *bootstrapping*, con la que se determina si las relaciones entre variables son o no significativas; se calcula el estadístico t de *Student*, que debe ser superior a 1,96 para ser considerado válido, al trabajar con un nivel de confianza de 95%. El estudio revela que únicamente dos de las tres variables independientes propuestas influyen sobre la intención de emprendimiento. Para la variable normas subjetivas, los resultados obtenidos a través del software SmartPLS, demuestran que no posee un alto impacto sobre la intención, es decir, no influye en el estado mental del sujeto en el que se encuentra enfocado en dirigir toda su experiencia y acción hacia la creación de un negocio o empresa.

Al evaluar las variables de actitud y control del comportamiento, se observa que las mismas sí influyen directamente sobre la intención de emprendimiento. Por lo tanto, los juicios evaluadores que tienen las personas antes de desarrollar determinado comportamiento, son determinantes al momento de emprender, ya que reflejan la creencia favorable o desfavorable del individuo para crear una empresa. Además, la percepción sobre el grado de control que tiene una persona sobre la disponibilidad de factores que pueden facilitar o impedir el inicio de un negocio, es importante para generar la intención y, por lo tanto, la conducta emprendedora.

Por otra parte, se pudo identificar que la variable normas subjetivas, no posee influencia sobre la variable dependiente, es decir, las creencias que tienen las personas de que otros individuos aprueben o no la realización de un determinado comportamiento, no es relevante al momento de crear un negocio propio, lo que deja de manifiesto que las personas permanecen pendientes de otros factores, antes que de la opinión de terceros.

En concordancia con el resultado obtenido, en otras investigaciones alineadas a la Teoría del Comportamiento Planificado, se reporta un efecto nulo de las normas subjetivas y se demuestra que las actitudes personales y la percepción del control del comportamiento, explican la intención emprendedora en los estudiantes (Osorio & Londoño, 2015).

Modelo de determinantes de la intención de emprendimiento

Para el modelo que se propone a continuación, se utilizaron las dos variables independientes que según se demostró, sí tienen influencia sobre la intención de emprendimiento. Además, se tomaron en consideración los dos indicadores con el valor de estadístico t más alto, de los factores de actitud y control del comportamiento y de la intención o variable dependiente.

Para el desarrollo del modelo se utiliza el programa SmartPLS en donde, mediante el análisis de ecuaciones estructurales, se obtienen nuevamente los valores del estadístico t, para comprobar la influencia de las variables.

Los dos indicadores que obtuvieron el valor más alto en cada variable son:

Actitud:

- ACTITUD_4: Entre varias opciones, prefiero ser un emprendedor.
- ACTITUD_5: Ser emprendedor me daría una gran satisfacción.

Control del comportamiento:

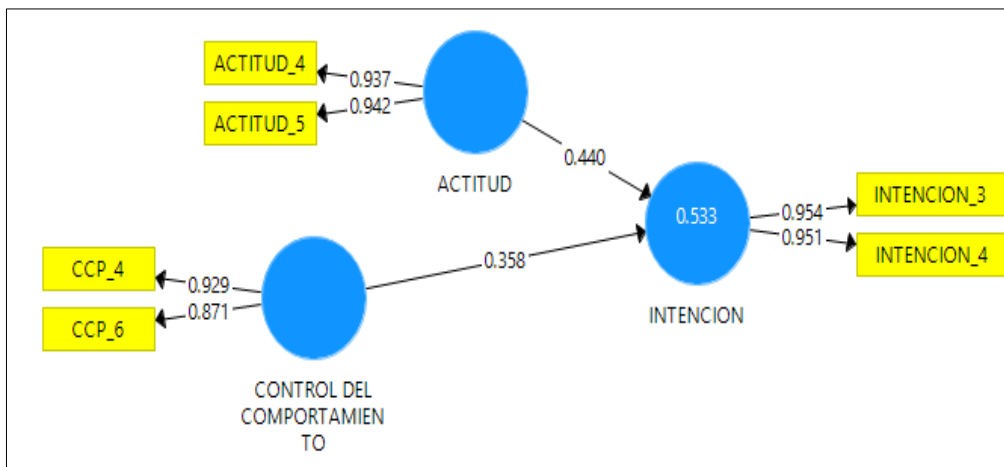
- CCP_4: Estoy dispuesto a hacer cualquier cosa para ser un emprendedor.
- CCP_6: Si quisiera, podría comenzar y dirigir un negocio fácilmente

Intención:

- INTENCION_3: Haré todo lo posible para comenzar y dirigir mi propio negocio.
- INTENCION_4: Estoy decidido a crear una empresa en el futuro.

Tomando como base el estudio realizado, a continuación, se expone el modelo generado. La variable Actitud, es más cercana a la Intención, dado que tiene mayor peso en el confidente de trayectoria, mientras que la variable Control del comportamiento, tiene un valor menor del coeficiente, pero sigue siendo igualmente importante.

Gráfico 1. Modelo estructural propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Resultados del modelo estructural propuesto.

	Estadísticos t	P Valores
ACTITUD → INTENCION	4.331	0.000
CONTROL DEL COMPORTAMIENTO → INTENCION	3.654	0.000

Fuente: SmartPLS.

Utilizando los mismos criterios expuestos en el primer resultado, en las dos variables independientes, el valor calculado del estadístico t de *Student* es superior a 1,96, lo que indica que el efecto de la actitud y el control del comportamiento sobre la intención es alto.

6. Conclusiones.

Analizando los indicadores que más influyen sobre las variables, se determina lo siguiente:

La afirmación “ser emprendedor me daría una gran satisfacción” (ACTITUD_5), es el indicador que posee mayor peso sobre la variable Actitud, por lo que se concluye que el nivel de satisfacción es importante en la actitud emprendedora.

La afirmación “entre varias opciones, prefiero ser un emprendedor” (ACTITUD_4), es el segundo indicador más influyente sobre la variable Actitud, por lo que se concluye que el grado de inclinación hacia el emprendimiento es importante para generar una actitud de emprendimiento.

La afirmación “estoy dispuesto a hacer cualquier cosa para ser un emprendedor.” (CCP_4), es el indicador más relevante sobre la variable Control del comportamiento, por lo que se concluye que la disposición del individuo para empezar una empresa es significativa al momento de evaluar si es o no factible emprender.

La afirmación “si quisiera, podría comenzar y dirigir un negocio fácilmente” (CCP_6), es el segundo indicador más importante sobre la variable Control del comportamiento, por lo que se concluye que el nivel de confianza de una persona es decisivo para que surja la conducta emprendedora.

La afirmación “haré todo lo posible para comenzar y dirigir mi propio negocio” (INTENCION_3) es el indicador más influyente sobre la variable Intención, por lo que se concluye que la perseverancia del individuo es importante para desarrollar la intención emprendedora.

La afirmación “estoy decidido a crear una empresa en el futuro” (INTENCION_4), es el segundo indicador más influyente sobre la variable Intención, por lo que se concluye que el nivel de decisión de una persona influye directamente sobre la intención de generar un negocio propio.

Por otra parte, como se puede apreciar en la tabla, existe una influencia directa de la actitud y el control del comportamiento sobre la intención de emprendimiento.

Para los estudiantes de posgrado de la Facultad de Ciencias Administrativas de la Universidad Técnica de Ambato, la intención está determinada por la percepción de independencia al emprender un negocio propio, la que no está originada en las normas subjetivas. En esta investigación, salen a relucir aspectos actitudinales propios de la etapa en la que se encuentran los estudiantes, como los deseos de desarrollo personal y autonomía laboral. Además, se observan algunos patrones de pensamiento, relacionados con la confianza, perseverancia y predisposición para generar un emprendimiento, mismos que demuestran que las actitudes personales tienen un mayor grado de influencia sobre la intención, antes que el control del comportamiento.

Referencias

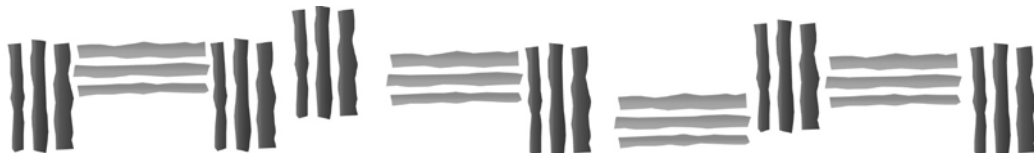
- Carlos, C., Contreras, L., Silva, M., & Liquidano, M. (2015). El Espíritu Emprendedor y un Factor que Influencia su Desarrollo Temprano. *Conciencia Tecnológica*, 49, 46-51.
- Cupani, M. (2012). Análisis de Ecuaciones Estructurales: conceptos, etapas de desarrollo y un ejemplo de aplicación. *Tesis*, 1, 186-199.
- Escobedo, M., Hernández, J., Estebané, V., & Martínez, G. (2016). Modelos de Ecuaciones Estructurales: Características, Fases, Construcción, Aplicación y Resultados. *Ciencia & Trabajo*, 18(55), 16-22.
- Formichella, M., & Massigoge, J.I. (2004). El concepto de emprendimiento y su relación con la educación, el empleo y el desarrollo local. *VII Congreso de Administración*.
- González, M., Valantine, I., Pérez, C., Aguado, S., Calabuig, F., & Crespo, J. (2016). La influencia del género y de la formación académica en la intención de emprender de los estudiantes de ciencias de la actividad física y el deporte. *Intangible Capital*, 12(3), 759-788.
- Guzmán, F., García, B., Rodríguez, L., & Alonso, M. (2014). Actitud, norma subjetiva y control conductual como predictores del consumo de drogas en jóvenes de zona marginal del norte de México. *Frontera Norte*, 26(51), 53-74.
- Jaramillo, L. (2008). Emprendimiento: Concepto básico en competencias. *Lumen*, 7, 1-6.
- Leite, E., Sánchez-Fernández, M., Leite, E., & Bezerra Correia, E. (2015). El espíritu emprendedor: condicionantes para la innovación. *Holos*, 5, 278-291.
- Leyva, O., & Olague, J. (2014). Modelo de Ecuaciones Estructurales por el Método de Mínimos Cuadrados Parciales (Partial Least Squares-PLS). En M. Asensi, R. Cotarelo, M. Echenique, J. Fernández, P. Oñate, J. Romero, & J. Tamayo, *Métodos y Técnicas Cualitativas y Cuantitativas Aplicables a la Investigación en Ciencias Sociales*. México: Tirant Humanidades.
- López, J., & Ruiz-Ruano, A. (2014). Modelado de la intención emprendedora con redes bayesianas. *Revista de Psicología*, 23(2), 71-87.
- Malebana, J. (2014). Entrepreneurial intentions of South African rural university students: A test of the theory of planned behaviour. *Journal of Economics and Behavioral Studies*, 6(2), 130-143.
- Marulanda, F., & Morales, S. (2016). Entorno y motivaciones para emprender. *Escuela de administración de negocios*, 81, 12-28.
- Marulanda, F., Montoya, I., & Vélez, J. (2014). Teorías motivacionales en el estudio del emprendimiento. *Pensamiento & Gestión*, 36, 206-238.
- Morales, A., & Ariza, A. (2012). Valores, actitudes y motivaciones en la juventud ante el emprendimiento individual y colectivo. *Revista de Estudios Cooperativos*, 112, 11-35.
- Osorio, F., & Londoño, J. (2015). Intención emprendedora de estudiantes de educación media: extendiendo la teoría de comportamiento planificado mediante el efecto exposición. *Cuadernos de Administración*, 28(51), 103-131.
- Parra, L., & Fleitas, M. (2010). Incubación de proyectos para iniciativas empresariales en la Universidad Libre de Cali. *Dirección*, 31(3), 1-8.

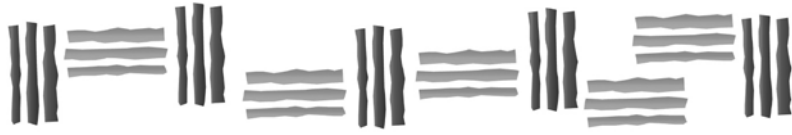
- Rueda, I., Fernández-Laviada, A., & Herrero, Á. (2013). Aplicación de la teoría de la acción razonada al ámbito emprendedor en un contexto universitario. *Investigaciones Regionales*, 26, 141-158.
- Ruiz, M., Pardo, A., & San Martín, R. (2010). Modelos de ecuaciones estructurales. *Papeles del Psicólogo*, 31(1), 34-45.
- Soria-Barreto, K., Zuniga-Jara, S., & Ruiz-Campo, S. (2016). Educación e Intención Emprendedora en Estudiantes Universitarios: Un Caso de Estudio. *Formación Universitaria*, 9(1), 25-34.
- Valencia, A., Cadavid, L., Ríos, D., & Awad, G. (2012). Factores que inciden en las intenciones emprendedoras de los estudiantes. *Revista Venezolana de Gerencia*, 17(57), 132-148.
- Ventura, R., & Quero, M. (2013). Factores explicativos de la intención de emprender en la mujer. Aspectos diferenciales en la población universitaria según la variable género. *Cuadernos de Gestión*, 13(1), 127-149.



Revisores de RevMetCuant que han autorizado su aparición en el listado (actualizado a 1 de diciembre de 2020):

Elena Abascal Fernández		Eva María Buitrago Esquinas		Carlos Dabús Conicet	
Javier Aguilera Caracuel		Rafael Caballero Fernández		Arnaldo Dámera Martínez	
S. Ejaz Ahmed		Rolando Caballero Martínez		José Pablo Dapena	
Ángel Alanón Pardo		Álvaro Caballo Trébol		Antonio F.de Amores Hernández	
Adrian Albala		Ricardo Cabana-Villca		Justo de Jorge Moreno	
Pedro Albarrán Pérez		Laura Cabeza García		Mª Dolores de Prada Moraga	
Noel Albert		María Eugenia Calderon		Iván de la Fuente Merencio	
José Tomás Alcalá Nalváiz		Francisco Javier Callealta Barroso		Salvador del Barrio García	
Esteban Alcaraz Vera		Enriqueta Camacho Peñalosa		Francisco del Olmo García	
Joaquín Aldas Manzano		Lourdes Canós Darós		André Gérald Destinobles	
Julio César Alonso Cifuentes		Jesús J. Cambra Friero		Laura Díaz Anadón	
Ana Belén Alonso Conde		Mariano Carbonero Ruz		Norberto Díaz Díaz	
José Antonio Álvarez-Jareño		Luis Cárdenas del Rey		Jorge Díaz Lanchas	
Ana Alvarez Muelas		Clara Cardone-Riportella		Luis Guillermo Díaz Monroy	
Michael D. Akers		Manuel J. Caro Encalada		Harald Dolles	
Christine Amsler		Mª Dolores Caro Vela		Juana Domínguez Domínguez	
María Pilar Aparicio Chueca		Esther Carrizosa Prieto		Inmaculada Domínguez Fabián	
Nieves Aquino Llinares		María Francisca Casado		Rosa María Domínguez Gijón	
Antonio Aragón Sánchez		Silvia Casado Yusta		Mónica Domínguez Serrano	
Mar Arenas Parra		Víctor M. Castañeda Rodríguez		Natalia Escobar Váquiro	
Mª Teresa Arévalo Quijada		Fco. Javier Castaño Gutiérrez		María Teresa Escobedo Portillo	
Isabel Argimón Maza		Juan Manuel Castaño Molano		Samira El Gibari Ben Said	
Edosa Joshua Aronmwan		Carlos Cazallas Alcaide		Juan Carlos Erazo Álvarez	
Millán Arroyo Menéndez		María del Mar Cerban Jiménez		Marcos España García	
Lilliana Lorena Avendaño Miranda		Jorge M. Chica Olmo		Rosario Espínola Vílchez	
Alberto Ayaviri		Manuel Civera Satorres		Óscar Andrés Espinosa Acuña	
María Victoria Avilés Blanco		M. Mercedes Claramunt Bielsa		Ángel Estrada García	
Mercedes Ayuso Gutiérrez		Luis A. M. Clemente Moquillaza		Eugenio M. Fedriani Martel	
Harold Banguero Lozano		Germà Coenders		Fernando Fedriani Martel	
Víctor Bañuls Silvera		Claudio Comari		Feng Jiao	
Eva Barrena Algara		Guillermina Comas		José Manuel Feria Domínguez	
Eduard Baumöhl		Emilio Congregado Ramírez		Gabriela Fernandez Barberis	
Miguel Alfonso Becerra Montañez		Ignacio Contreras Rubio		Ana Fernández Carazo	
Jorge Belaïre Franch		Renê Coppe Pimentel		Melchor Fernández Fernández	
Emma Berenger Cárceles		Natalia L. Coppola		Javier Fernández Navas	
Vanesa Berlanga Silvente		Virginia Inés Corbella		María Yolanda Fernández Ramos	
Amancio Betzuen Zalbidegoitia		Beatriz Corchuelo		Yolanda Fernández-Santos	
Joerg Beutel		Jose Manuel Cordero Ferrera		María Alejandra Ferrer	
Celia Bilbao Terol		Manuela Coromaldi		Roman Ferrer Lapeña	
Margarita Billón Currás		Beatriz Correyero-Ruiz		Luis Ferruz Agudo	
María Teresa Blaconá		Martha Lucía Corrales Bossio		Raquel Flórez López	
Francisco J. Blancas Peral		Juan Carlos Cortés López		Osvaldo A. Fosado Téllez	
Pilar Blanco Alonso		Pablo Coto Millán		Inmaculada Fortes Ruiz	
Glenda Blaser Petarli		María Elizabeth Cristofoli		Roberto Carlos Fortich Mesa	
Héctor Alberto Botello Peñaloza		Rafael Cruz Salazar		Juan Jaime Fuentes	
Carlos Bouza		Mª Dolores Cubiles de la Vega		María del Mar Fuentes Fuentes	
Raúl Brey Sánchez		Fernanda Cuitiño		Miguel-Ángel Galindo Martín	
María Isabel Brusca Alijarde		Antonio Cutanda Tarín		Alicia Galindo Manrique	
Marcos Buestán		Luigi D'Ambrá		Dolores Gallardo Vázquez	

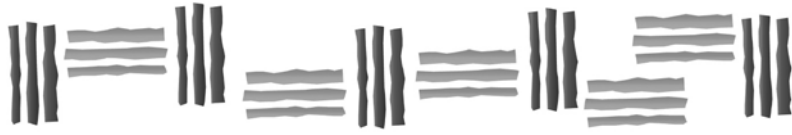




Revisores de RevMetCuant que han autorizado su aparición en el listado (actualizado a 1 de diciembre de 2020):

Guiselle María Garbanzo Vargas		Jesús Huelva Tristanchó		Rafael Martínez	
Alejandro García Cintado		José Manuel Hurtado González		Minerva Martínez Ávila	
Luis Angel García Escudero		Jorge Ibarra Salazar		Francisco José Martínez Estudillo	
Alfredo García Hernández-Díaz		Aysa Ipek Erdogan		Ángel Enrique Martínez Galvez	
José Horacio García-Marí		Matías Irigoyen Testa		José Antonio Martínez García	
Carmen Huerga Castro		Harizmar Izquierdo Madrid		Soledad M ^a Martínez María-Dolores	
Anna García Masiá		Timotej Jagric		José Miguel Martínez Paz	
Cecilia García Muñoz Aparicio		Yara Anahí Jiménez Nieto		José Francisco Martínez-Sánchez	
Beatriz García Osma		Diana Marcela Jiménez Restrepo		María del Carmen Martínez Serna	
José García Pérez		Maria Luisa Jimenez Rodrigo		Camilla Mastromarco	
José Félix García Rodríguez		Enrique José Jiménez Rodríguez		Gregoria Mateos-Aparicio Morales	
Ana Gargallo Castel		Christian A. Johnson		Thórólfur Matthíasson	
Christiane Gaul		Juan José Jordán Sánchez		Adolfo Maza Fernández	
Karl Geisler		Sevtap Kestel Ken Kwong		María Amparo Medal Bartual	
Esperanza Gil Soto		M.T. Lamelas Gracia		Mauro Mediavilla Bordalejo	
Alicia Gila García		Prosper Lamothe Fernández		Miguel H. Mejía Puente	
Trinidad Gómez Núñez		Bibiana Lanzilotta		Iguácel Melero Polo	
David Gómez Sánchez		Bárbara Larrañeta Gómez-Camínero		M ^a Carmen Melgar Hiraldo	
Nuria Gómez Sanz		José María Larrú Ramos		Ari Melo Mariano	
Mónica Gómez Suárez		Thanh Le Phuoc		Yésica Mayett Moreno	
Germán Héctor González		Guillén León		Rosa Fátima Medina Merino	
Roberto González Acolt		Juan Celestino León Mendoza		Edwin Leonardo Mendez Ortiz	
Fernando González Laxe		M ^a Amparo León Sánchez		Luis Ángel Meneses Cerón	
María Pilar González Casimiro		Nuno Carlos Leitão		Roberto Micera	
Nieves Glez Fdez-Villavicencio		Germán Leva		Patricia Milanés Montero	
Mercedes González Lozano		Francisco Liñán Alcalde		Jose Luis Miralles Quirós	
Nuria González Rabanal		María Llop Llop		José Mondéjar Jiménez	
Paula González Rodríguez		Julián Llorent Jurado		Juan Ignacio Modroño Herrán	
María Carmen González Velasco		Luz Mary Londoño		Julián Molina Luque	
María Gracia Rodríguez Brito		Álvaro López Cabrales		María Molinos Senante	
Flor M. Guerrero Casas		Begoña López Fernández		Samuel Mongrut	
M. Carmen Guisán		Joaquín López Pascual		Joaquin Monreal Perez	
Haochen Guo		Dunia López Pintado		Oscar Montañó Arango	
Tomás Gutiérrez Barbarrusa		Sara López Pintado		Jose Manuel Montes Peón	
Cristián Gutiérrez Rojas		Jesús López Rodríguez		María de Jesús Moo Canul	
Elena Valentina Gutiérrez		Ana Dolores López Sánchez		Fco. Javier Morales E.	
Mauricio I. Gutiérrez Urzúa		Macarena Lozano Oyola		Luis Moreno	
Katerina Hellström		Maria Asuncion Lubiano Gomez		Ignacio Moreno Gabaldón	
Markus Haas		Alexis Lubow		Elena Moreno García	
Pedro J. Hernández		Amaia Lusa Garcia		M ^a Pilar Moreno Navarro	
Rafael Hernández Barros		Benjamín Manchado-Pérez		María Carmen Moreno Perdigón	
Beatriz Hernández Jiménez		Cecilio Mar-Molinero		Rafael Moreno Ruiz	
Antonio Hernández Moreno		Juan A. Marín-García		Rafael Moyano Franco	
Carmen Patricia Herranz Peinado		Nelly Narcisa Manjarrez Fuentes		Josefa Mula Bru	
Ainhoa Herrarte Sánchez		Antonio Miguel Márquez Durán		Francisco Javier Muñoz Almaraz	
Oscar Herrera-Restrepo		Ezequiel Martín		Jesús Muñoz San Miguel	
Manuel Hidalgo Pérez		Víctor Martín		Gábor Nagy	
Miguel Ángel Hinojosa Ramos		Ana M. Martín Caraballo		Luis Enrique Nieto Barajas	
Federico Hornes		Alfonso José Martínez		Gabriel Núñez Antonio	





Revisores de RevMetCuant que han autorizado su aparición en el listado (actualizado a 1 de diciembre de 2020):

Aníbal Núñez Carrasco		Hernaldo Reinoso Alarcón		Rosa Santero Sánchez	
Nemecio Núñez Rojas		María Luisa Restaino		Maria Sard Bauzá	
Julia M. Núñez Tabales		Pablo Revilla Aparicio		Alejandro Smolje	
Juan Núñez Valdés		David Alejandro Reyes Gómez		Mariagrazia Squicciarini	
José Javier Núñez Velázquez		Paz Rico Belda		Mª Manuela Segovia González	
Jair Ojeda Joya		Laura Riesgo		María Semitiel García	
Joanna Olbrys Bialystok		Rosa Rios Ramos		Pedro Serrano	
Javier Oliver Muncharaz		Daniel Rivero Cebrián		Yudayly Stable-Rodríguez	
José Antonio Ordaz Sanz		María Dolores Robles Fernández		Alexandre Stamford da Silva	
Jorge Orlando Arredondo		David Robles Ortiz		Lourdes Susaeta Erburu	
Erick Orozco Acosta		Óscar Rodil Marzábal		Phillip L. Swagel	
Priscila Ortega Gómez		Román Rodríguez Aguilar		María T. Tascón Fernández	
Francisco J. Ortega Irizo		María Ángeles Rodríguez Bellido		Macarena Tejada Tejada	
Ignacio Osuna Vergara		Domingo Rodríguez Benavides		Cecilia Téllez Valle	
Mª P. Pablo-Romero Gil-Delgado		Arturo Rodríguez-Castellanos		Ángel F. Tenorio Villalón	
Reinaldo Padrao		Mª Carolina Rodríguez Donate		Fernando Tohmé	
Alvisa Palese		Rosario Rodríguez Guiñolo		Wilfredo Toledo Rodríguez	
María Luisa Palma Martos		Jesús Rodríguez López		Álvaro Tresierra Tanaka	
Concepción Paralera Morales		Manuel G. Rodríguez López		Patricia Triunfo	
Julián Pareja Vasseur		Natividad Rodríguez Masero		Alicia Troncoso Lora	
Juan Carlos Parra		Norberto Rodríguez Niño		Antonio Trujillo Ponce	
José Parreño Fernández		Inmaculada Rodríguez Puerta		Efthymios G. Tsionas	
Carmen Elena Patiño		Carlos V. Rodríguez-Caballero		Carlos Usabiaga Ibáñez	
Douglas M. Patterson		Patricia Isabel Romero		Ana Utrillas Acerete	
José M. Pavía		Inmaculada Romano Paguillo		Luis Enrique Valdez Juárez	
Dann Payares Ayola		Diego Romero de Ávila Torrijos		Marisol Valencia Cárdenas	
Nelson Perera		Eulalia Romero Palacios		Guadalupe Valera Blanes	
Alfredo Peris Beamonte		Francisco Javier Rondán Cataluña		Elisabeth Valle Valle	
Vicente Pérez Chamorro		Eva Ropero Moriones		Laura Varela Candamio	
Fátima Pérez García		Dario Alejandro Rossignolo		Manuel Vargas Vargas	
Julián Pérez García		Carmen Rubio Castaño		María José Vázquez Cueto	
María Dolores Pérez Hidalgo		José Manuel Rueda Cantuche		Leudis Orlando Vega de la Cruz	
Víctor Ernesto Pérez León		David Ruggeri		Esther Velázquez Alonso	
Rafael Pino Mejías		Belén Ruiz		Juan David Velásquez	
Simon Price		Rocío Ruiz Benítez		Francisco Venegas-Martínez	
Tomás Prieto Rumeau		Jose Luis Ruiz Vergara		María Victoria Verdugo Matés	
José Alejandro Quijada		Maria Luisa Saavedra		Elena Vernazza Mañan	
Raquel Quiroga García		Francisco Javier Sáez Fernández		Mary Analí Vera Colina	
Maria Quintás		Ramón Sala Garrido		Ana Vianco	
Arlé Quispe Villafuerte		Román Salmerón Gómez		Xavier Vilà Carnicero	
R.Rajasekhar		Sandra Mª Sánchez Cañizares		Fatima Irina Villalba Padilla	
Josefa Ramoni Perazzi		Alfredo Sánchez-Daza		Esmeralda Villegas	
Manuel Ramos Francia		Celia Sánchez-Lopez		Carmen Berenice Ynzunza Cortés	
Carmen Ramos Carvajal		Sixto Sánchez Merino		Guido Zack	
Leonardo Ramos Gutiérrez		Ana María Sánchez Sánchez		Mª del Pilar Zarzosa Espina	
José Manuel Ramírez Hurtado		Francisca J. Sánchez Sánchez		Ting Zhang	
John Alex Ramirez Figueroa		Manuel J. Sánchez Sánchez			
Juan Carlos Real Fernández		Maria Carmen Sánchez-Sellero			
David Redondo Ballesteros		Luis Vicente Santana Quintero			

