

**ALGORITMOS VERDES Y JUSTICIA AMBIENTAL. UN
ANÁLISIS DESDE LA ÉTICA Y EL DERECHO**

***GREEN ALGORITHMS AND ENVIRONMENTAL JUSTICE. AN
ANALYSIS FROM ETHICS AND LAW***

VANESA MORENTE PARRA

Profesora Colaboradora Asistente

Universidad Pontificia Comillas ICADE

<http://orcid.org/0000-0003-0168-6510>

Cómo citar este trabajo: Morente Parra, V. (2026). Algoritmos verdes y justicia ambiental. Un análisis desde la ética y el derecho. *Lex Social, Revista De Derechos Sociales*, 16 (1), 1–32. <https://doi.org/10.46661/lexsocial.12830>

RESUMEN

Este artículo analiza, desde una perspectiva ética y jurídica, el impacto ambiental de la IA y de la algoritmia en la sociedad digital contemporánea. Frente a la visión meramente instrumental de los algoritmos verdes como soluciones técnicas de eficiencia, aquí se sostiene que constituyen criterios normativos de justicia ambiental. Se examinan la huella ecológica de la IA —consumo energético, hídrico y minerales—, así como las carencias del marco normativo vigente, el cual se centra en el respeto a los derechos fundamentales, la democracia y la salud, pero no hace ninguna alusión a su impacto ecológico. Asimismo, se propone ampliar el principio de *fairness* hacia la sostenibilidad ambiental, integrando la justicia distributiva en sus dimensiones espacial (interterritorial) y temporal (intergeneracional). El artículo pretende fundamentar una gobernanza ecológica digital capaz de articular la transición tecnológica con la transición ecológica. El objetivo último es avanzar hacia un Estado social, democrático, digital y ecosostenible, donde la justicia ambiental sea condición de posibilidad de la justicia social.

PALABRAS CLAVE: algoritmos verdes, algoritmia, IA, sociedad digital, justicia ambiental y sostenibilidad.

ABSTRACT:

This article analyzes, from an ethical and legal perspective, the environmental impact of AI and algorithmic systems in contemporary digital society. Contrary to the purely instrumental view of green algorithms as technical efficiency solutions, it argues that they represent normative criteria of environmental justice.

The ecological footprint of AI -energy, water and mineral consumption- is examined, along with the shortcomings of the current regulatory framework, which focuses on the protection of fundamental rights, democracy and health, but makes no reference to its ecological impact. Furthermore, the article proposes expanding the principles of fairness to include environmental sustainability, integrating distributive justice in its spatial and temporal (intergenerational) dimensions. The work aims to lay the foundation for an ecological transition. The goal is to move toward a social, democratic, digital and eco-sustainable state, where environmental justice is a precondition for social justice.

KEYWORDS: green algorithm, algorithmics, AI, digital society, environmental justice and sustainability.

SUMARIO

I. Introducción.

1. *Estado de la cuestión: sostenibilidad e imperio de la algoritmia.*
2. *Aproximación conceptual y delimitación del objeto de estudio.*

II. Impacto ambiental de la algoritmia.

1. *Huella ecológica: consumo de energía, agua y minerales.*
2. *Aplicación de los principios de trazabilidad y transparencia al impacto ambiental: abriendo las cajas negras.*

III. Marco ético y jurídico de la algoritmia en la sociedad digital.

1. *De lege lata: más allá del antropocentrismo.*
2. *De lege ferenda: hacia una ética digital integral.*

IV. Algoritmos verdes y justicia distributiva. Una propuesta de gobernanza ecológica digital.

1. *Justicia ambiental y algoritmia verde. La justicia ambiental como justicia distributiva.*

2. *Hacia el Estado digital y ecosostenible.*

V. *Algunas conclusiones.*

VI. *Bibliografía.*

I. Introducción.

El presente artículo analiza, desde una perspectiva ética y jurídica, el impacto que tiene el desarrollo de la sociedad tecnológica y digital —gobernada por la algoritmia— en el medio ambiente. La aprobación del Reglamento 2024/1689 de 13 de junio del Parlamento Europeo y del Consejo sobre Inteligencia Artificial (conocido como la Ley de la IA) ha supuesto un paso adelante en la identificación de los riesgos que ciertas tecnologías algorítmicas plantean para los derechos fundamentales, la salud pública y el buen funcionamiento de las democracias. De ahí que el legislador europeo haya establecido una tipología de sistemas de IA, clasificándolos según su nivel de riesgo: desde los sistemas prohibidos hasta aquellos de alto o bajo riesgo. Todas estas categorías comparten dos elementos técnicos fundamentales: el procesamiento masivo de datos (Big Data) y la automatización de decisiones mediante algoritmos.

Sin embargo, ni la regulación europea ni la normativa nacional dedican mucha atención al impacto ambiental derivado del uso y abuso de estos sistemas. Esta omisión podría ser accidental, pero todo parece indicar una falta de voluntad política para visibilizar la huella ecológica real de las tecnologías digitales. Es precisamente esta ausencia de información —y de regulación— lo que motiva la reflexión que aquí se presenta. Frente a una comprensión meramente instrumental de los algoritmos verdes como soluciones técnicas puntuales, aquí se sostiene que los algoritmos deben entenderse como criterios normativos fundamentales de la justicia ambiental. En este marco, la sostenibilidad no puede concebirse como un mero accesorio, sino como un componente estructural del modelo de Estado. Si queremos que el Estado social y democrático de Derecho sea capaz de afrontar los desafíos del siglo XXI, deberá ser también un Estado digital y ambiental o ecosostenible.

1. Estado de la cuestión: sostenibilidad e imperio de la algoritmia.

El siglo XXI es, indudablemente, el siglo de las tecnologías digitales. Toda operación, desplazamiento, consumo o interacción cotidiana está más o menos mediada por sistemas automatizados que procesan datos, perfilan conductas y anticipan comportamientos. La sociedad contemporánea, interconectada y cada vez más dependiente de la lógica de la eficiencia digital, ha desarrollado una estructura tecnológica que se presenta como

inevitabile. Sin embargo, el entusiasmo que despierta el desarrollo tecnológico ha desviado la atención de uno de sus efectos más relevantes y menos atendidos: su impacto ambiental.

Según el paradigma de Etxebarría y Almendros la sociedad del siglo XXI ha transformado al individuo en tecnopersona, cuyo proyecto vital se desarrolla simultáneamente en tres entornos: el entorno natural, que remite a la dimensión corporal, animal y ecológica del ser humano; el entorno político, construido históricamente por las comunidades humanas para dotarse de instituciones justas y perseguir el bien común; y el entorno digital, un nuevo espacio artificial que reconfigura profundamente nuestras formas de vida, nuestras relaciones sociales y nuestras estructuras de poder¹. La articulación de estos tres entornos constituye uno de los principales desafíos de nuestra época: cómo garantizar que el desarrollo de tecnologías como la inteligencia artificial y los algoritmos no sea incompatible con el principio de sostenibilidad, hoy convertido en estándar de calidad de los sistemas productivos y de prestación de servicios.

Sin embargo, la sostenibilidad ha sido muchas veces reducida a un mero eslogan publicitario y comercial. La lógica del *greenwashing*² encuentra en el ámbito algorítmico un terreno fértil, caracterizado por su opacidad, su complejidad técnica y la dificultad para evaluar impactos de forma transparente. Esta dificultad ha sido destacada por Lannelongue et al. quienes desarrollaron la herramienta *Green Algorithms* —a la que luego volveremos— para calcular la huella de carbono de la IA, evidenciando tanto el elevado coste energético de los modelos de aprendizaje profundo como la falta de métricas estandarizadas para evaluar de forma comparativa el impacto ambiental de la IA.

Como veremos en lo sucesivo, los costes materiales y ambientales del imperio de la algoritmia son considerables. La producción, entrenamiento y mantenimiento de modelos algorítmicos —especialmente los de aprendizaje profundo— implica un consumo energético elevado, una intensiva utilización de agua para refrigeración de centros de datos y una creciente demanda de materiales críticos —por ejemplo, minerales o tierras raras— para dispositivos electrónicos, a lo que hay que añadir la generación de gran cantidad de residuos tecnológicos difíciles de reciclar. En este contexto, la sostenibilidad queda subordinada a la lógica de la innovación permanente que, entre otras cuestiones,

¹ Etxebarría, J. y Almendros, L. (2023), *Tecnopersonas. Cómo las tecnologías nos transforman*. 2^a edición, Gijón, Trea Ensayo, p. 89-91.

² Según la definición que dan Vieira De Freitas et al. “el *greenwashing* es el uso de discursos, estrategias de marketing o acciones corporativas que generan una falsa impresión de sostenibilidad, ocultando prácticas ambientales dañinas o sobredimensionando logros menores”. Estos autores llevan a cabo un estudio bibliográfico sistemático con la finalidad de categorizar los diferentes tipos de greenwashing que se dan en atención a quién es el agente promotor del greenwashing -fundamentalmente son empresas- o con qué finalidad se lleva a cabo dicho “lavado de cara” -comercial, publicitario, adecuación a las políticas ambientales, etc.-. Vieira De Feitas Neto, S. V., Falcao Sobral, M. F., Becerra Riveiro, A. R., Da luz Soares, G. R. (2020), “Concepts and Forms of greenwashing: a systematic review, *Environmental Science Europe*”, *Environmental Science Europe*, 32:19, p. 6/12

<https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-020-0300-3>

presta poca o ninguna atención a sus efectos ecológicos y a la distribución de sus costes ambientales.

El propósito de este artículo, por tanto, es superar el diagnóstico técnico de la sociedad digital en general y de la algoritmia en particular, y conectar el desarrollo tecnológico y sus efectos con el principio de justicia ambiental. Además, se parte de una concepción concreta de la justicia ambiental como justicia distributiva que se plantea una cuestión fundamental: ¿quién sufre los costes o cargas ecológicas de la digitalización y quién se beneficia de ello? Por eso, frente al enfrentamiento entre el discurso tecnológico y el ambiental, aquí se propone la articulación crítica de los dos ámbitos fundamentales en nuestra realidad. Es momento de aunar ambas dimensiones bajo un mismo marco de exigencia ética y jurídica. La sostenibilidad, en este sentido, debe ser entendida como un principio rector del Estado social, democrático, digital y ecosostenible que hoy necesitamos construir.

2. Aproximación conceptual y delimitación del objeto de estudio.

La sociedad actual parece moverse empujada por dos pulsiones de distinta naturaleza, que podrían conducir a la humanidad por direcciones opuestas. La primera es la pulsión de conocimiento, transformación y mejora que encarna la técnica, y el desarrollo tecnológico, y que es, según Ortega y Gasset, inherente a la propia naturaleza humana,³ entendida ésta como naturaleza inacabada que tiene que “producir” recursos técnicos para vivir. La segunda es la pulsión de autoconservación, que es inherente a la naturaleza animal del ser humano. Esta pulsión de autoconservación se ve seriamente compelida en las últimas décadas por un desequilibrio climático y ambiental que se debe, en parte, a la voracidad extractiva y explotadora del ser humano.

Si el debate sobre la sostenibilidad ha oscilado entre la esperanza en la técnica y la constatación de los límites materiales y físicos de nuestro planeta, actualmente este dilema se intensifica ante los avances tecnológicos, pues, si bien la algoritmia y la IA son claros motores de progreso, también generan un innegable impacto ambiental.

En respuesta a esto, la Comunidad Internacional ha impulsado cumbres y foros climáticos desde mediados del siglo XX —especialmente desde la década de 1970—, que, en el mejor de los casos, desembocan en acuerdos de *soft law*. En este contexto precisamente surge el concepto de “sostenibilidad”, cuya definición canónica fue formulada de manera sistemática en el Informe Brundtland (*Our Common Future*, 1987), elaborado por la

³ Afirma Ortega y Gasset que “Si nuestra existencia no fuese ya desde un principio la forzosidad de construir con el material de la naturaleza la pretensión extranatural que es el hombre, ninguna de esas técnicas existiría. El hecho absoluto, el puro fenómeno del universo que es la técnica, sólo puede darse en esa extraña, patética, dramática combinación metafísica de que dos entes heterogéneos —el hombre y el mundo— se vean obligados a unificarse, de modo que uno de ellos, el hombre, logre insertar su ser extramundano en el otro, que es precisamente el mundo. Ese problema, casi de ingeniero, es la existencia humana”. Ortega y Gasset, J., *Meditaciones de la técnica*, Austral, Madrid, 1965, p. 48

Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas⁴. Este informe introduce el concepto de desarrollo sostenible, que se ha convertido en el eje del discurso global sobre sostenibilidad, y que define como aquel desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

En cualquier caso, la sostenibilidad se suele relacionar con tres ámbitos concretos: ambiental, económico y social. En el primer caso, la sostenibilidad consiste en respetar los límites biofísicos del planeta, evitando el agotamiento de recursos naturales, la pérdida de biodiversidad y la degradación ambiental. En relación con el ámbito económico, requiere un modelo económico que sea viable a largo plazo, para dar cumplimiento a la exigencia de “no comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Por último, en relación con el ámbito social busca promover la equidad y la justicia ambiental, no solo en el momento presente, sino muy especialmente, en el futuro.

Sin embargo, algunos críticos entienden que este concepto de sostenibilidad es en realidad un oxímoron, ya que supone un crecimiento material ilimitado en un planeta finito⁵. De hecho, esto es lo que concluyeron los científicos encargados de elaborar el informe titulado elocuentemente *The Limits to Growth* solicitado en 1972 por el Club de Roma al MIT. En el mencionado informe se recogen los resultados de la aplicación del programa informático World3, creado por los propios autores del informe, con el objeto de recrear el crecimiento de la población, el crecimiento económico y el incremento de la huella ecológica de la población sobre la tierra en los próximos cien años, partiendo de los datos disponibles hasta la fecha. La conclusión principal que se alcanza en el Informe es que en un planeta con recursos limitados es insostenible un crecimiento económico exponencial⁶.

Si volvemos al concepto original de sostenibilidad como aquella capacidad de satisfacer necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades, comprobamos que esta máxima es mucho más complicada de alcanzar en la actualidad, pues, según el Banco Mundial, en cincuenta años ha aumentado en un 50% el consumo energético de, por ejemplo, un ciudadano medio estadounidense⁷. Esto nos obliga, claro está, a tener que conciliar nuestra natural pulsión de autoconservación con la pulsión tecnológica de la humanidad del siglo XXI, lo que

⁴ <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

⁵ De hecho, Michael Redclift afirma que el término “sostenible” se ha usado como un eslogan político para legitimar agendas de crecimiento económico, más que para transformar la relación del ser humano con los límites biológicos de nuestro planeta. Además, el concepto de sostenibilidad no solo sigue siendo contradictorio, sino que se ha naturalizado y consolidado en el discurso público. Redclift, M. (2005) “Sustainable Development (1987-2005). An Oxymoron Comes of Age”, *Sustainable Development* 13, p. 218-219. <https://www.homepages.ucl.ac.uk/~uccesjb/S3%20Reading/redclift%202005.pdf>

⁶ Cincuenta años después de la publicación de este informe, el Club de Roma y otras organizaciones europeas con las que forma la iniciativa Earth4All han publicado un informe titulado “The Limits to Growth model: still prescient 50 years later”, donde se proponen modelos económicos alternativos para afrontar los desafíos del Antropoceno ya en el siglo XXI.

https://www.clubofrome.org/wp-content/uploads/2022/05/Earth4All_Deep_Dive_Herrington.pdf?

⁷ <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?>

pasa por conjugar una cultura generalizada del ahorro energético con el uso de la algoritmia y de los sistemas de IA, que diariamente devoran cantidades ingentes de recursos energéticos e hídricos.

Según el Diccionario de la Real Academia Española, por algoritmia se entiende la ciencia que estudia los algoritmos, y por algoritmo se entiende aquel conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución a un problema. Esta definición sería en realidad una concreción o simplificación de la definición que de la algoritmia y de los algoritmos suele proporcionar la literatura especializada⁸, que lo define como un proceso informático más o menos complejo en el que siempre se pueden identificar tres elementos: 1) número finito de comandos que deberá seguir el algoritmo (*finiteness*); 2) buena definición y claridad en el diseño de dichos comandos a fin de evitar ambigüedades (*definiteness*); 3) entrada inicial al algoritmo de un número suficiente de datos que le permitan, siguiendo los comandos previamente establecidos, producir una salida concreta de información (*input/output*), como puede ser la solución a un problema o el perfilado conductual de un grupo de individuos.

En el presente artículo vamos a analizar el impacto ambiental de los algoritmos y de algunos sistemas de IA, en la medida en que estos se valen de aquellos para alcanzar su propósito. No obstante, como advierte Presno Linera⁹, la IA no se vale de cualquier algoritmo, solo de los que “aprenden” a partir del procesamiento de datos masivos —Big Data—, lo que podría significar un mayor consumo de recursos naturales. Por último, en nuestro objeto de análisis también entraría el *machine learning* (AA por sus siglas en inglés), como técnica derivada de la IA que se vale de algoritmos para detectar patrones.

Por su parte, con la expresión algoritmos verdes nos referimos a aquellos sistemas diseñados y desarrollados para minimizar su huella ecológica durante todo su ciclo vital. Es decir, se trata de algoritmos pensados y diseñados desde una lógica de sostenibilidad. El Pacto Verde Europeo define esta digitalización verde como una prioridad estratégica para alcanzar la neutralidad climática, alineando la innovación tecnológica con la transición ecológica¹⁰.

En realidad, los algoritmos verdes pueden clasificarse en dos tipos, que no son excluyentes sino complementarios. Por un lado, hay algoritmos que tienen una finalidad verde: su aplicación está orientada a mejorar el medio ambiente. Por ejemplo, los que optimizan rutas logísticas para reducir emisiones de CO₂, o los que monitorizan consumos energéticos para detectar ineficiencias. Por otro lado, existen algoritmos verdes por su diseño, es decir, aquellos cuya ejecución se plantea para consumir menos energía, evitar costes computacionales innecesarios o minimizar el uso de materiales críticos

⁸ Yanofsky, Noson, S. (2024), “Towards a Definition of an Algorithm”, *Journal of Logic and Computation*, 21(2), p. 2/38. <https://arxiv.org/pdf/math/0602053>

⁹ Presno Linera, M. A. (2022), *Derechos fundamentales e inteligencia artificial*, Marcial Pons, Madrid, p. 15-16.

¹⁰ https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF

(minerales y tierras raras). Este segundo tipo es precisamente al que se refiere el Pacto Verde Europeo.

La propuesta de este artículo es promover una concepción de los algoritmos verdes que trascienda su definición habitual como mera herramienta digital orientada a la mejora técnica y a la eficiencia. Sostenemos que el algoritmo verde posee una doble dimensión: por un lado, una dimensión formal, que coincide con su diseño eficiente orientado a minimizar el impacto ambiental de los procesos computacionales; y, por otro, una dimensión inmaterial, que lo convierte en un criterio ético de justicia distributiva, cuyo fin último es contribuir a la realización de la justicia ambiental.

Si entendemos que todo desarrollo tecnológico tiene una dimensión ecológica y política, entonces debemos asumir que su impacto no puede quedar fuera del marco de derechos humanos ni de la ética ambiental o ecoética. La cuestión, por tanto, no es solo cómo diseñar algoritmos más sostenibles, sino quién asume la responsabilidad de su impacto ambiental. La justicia ambiental es indudablemente una justicia distributiva (cómo repartimos las cargas y los beneficios) integrada por una dimensión espacial o interterritorial (qué territorios asumen los costes y cuáles los beneficios) y una dimensión temporal o intergeneracional (qué dejamos y cómo lo dejamos a las generaciones futuras). No obstante, algunos autores entienden que la justicia ambiental no debe desentenderse de la relación del ser humano con otras vidas que habitan el planeta, de ahí que propongan añadir una tercera dimensión interespecífica al concepto de justicia ambiental (qué hacemos con el resto de los seres vivos)¹¹.

El objetivo de este artículo, por tanto, consiste en demostrar si los algoritmos verdes pueden convertirse en un criterio de distribución justa de bienes y cargas ambientales, aunque sin caer en la simpleza de entender que una solución tecnológica puntual puede solucionar *per se* cuestiones que son de naturaleza éticas, política y jurídica. Entender los algoritmos verdes como criterio de distribución, exige analizar cómo se lleva a cabo esta distribución de recursos. En primer lugar, una algoritmia verde tiene un impacto positivo en un sentido espacial, pues distribuye cargas y beneficios entre comunidades humanas. En segundo lugar, una algoritmia verde tiene un impacto positivo en un sentido temporal, pues al ahorrar recursos naturales —especialmente hídricos— garantiza que las generaciones futuras puedan disfrutar de un medio ambiente sano. Finalmente, y para que esta propuesta no quede en lo meramente instrumental, hemos de justificar y fundamentar una sostenibilidad algorítmica sólida, que promueva a su vez una cultura empresarial verde, con la idea de evitar caer en el *greenwashing* digital, esto es, evitar que el discurso

¹¹ Según Jorge Riechmann, hablar de justicia ecológica es hablar de la distribución de bienes y cargas ambientales entre todos los seres vivos, no solo los humanos. Afirma el autor que la justicia ecológica no solo tiene que ver con la distribución justa de bienes y males ambientales entre la población humana, sino también entre ésta y el resto de los seres vivos con los que compartimos la biosfera. Riechmann, J., (2003), “Tres principios básicos de justicia ambiental”, *Revista Internacional de Filosofía Política*, 21, p. 108. <https://oai.e-spacio.uned.es/server/api/core/bitstreams/0d376386-edc6-47df-9398-a00133a565b1/content>

de la tecnología ecológica se quede en una mera “estética verde”. Esto exige una transformación cultural, sobre todo en el sector empresarial. Ha llegado el momento de reformular los ideales de eficiencia, de innovación y de justicia, con el objetivo de asumir que la justicia ambiental no es una parte constitutiva de la justicia social, sino su propia condición de posibilidad.

II. Impacto ambiental de la algoritmia.

El despliegue masivo de sistemas algorítmicos y de IA en múltiples esferas de la vida contemporánea —tanto en el sector privado como público— ha acentuado la necesidad de analizar no solo sus implicaciones sociales y jurídicas, sino también su huella ecológica. La parte formal o física de los sistemas de IA —lo que se conoce como el *hardware*—, supone ya un consumo intensivo de recursos energéticos, hídricos y minerales, que plantea serios desafíos desde el punto de vista de la sostenibilidad y la justicia ambiental. Este epígrafe aborda el impacto ambiental de la algoritmia desde dos dimensiones complementarias: por un lado, el análisis de su huella ecológica, incluyendo el consumo de energía, agua y minerales necesarios para el entrenamiento, desarrollo y mantenimiento de modelos de aprendizaje automático (*Machine Learning*); y por otro, la aplicación de los principios de transparencia y trazabilidad al ámbito ambiental, como mecanismos imprescindibles para abrir las “cajas negras”¹² de los sistemas algorítmicos y permitir una evaluación ética y jurídica de sus costes ecológicos. Esta aproximación no pretende solo describir los impactos ambientales de los algoritmos en particular y los sistemas de IA en general, sino contribuir con la propuesta de integración de un procedimiento de control y auditoría ecológica desde el diseño de los algoritmos y durante su vida útil, con la finalidad de alcanzar el ideal de la justicia ambiental.

1. Huella ecológica de los algoritmos: consumo de energía, agua y minerales.

El sintagma “huella ecológica” se acuñó en la década de 1990 a raíz de la publicación de un libro titulado *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth* en el que los autores, Mathis Wackernagel y William Rees, propusieron medir la superficie de tierra y mar biológicamente productiva necesaria para generar los recursos que una población consume, así como los residuos que produce. Desde entonces su uso se ha popularizado tanto que se ha convertido en una “unidad de medida” estandarizada que

¹² La alusión -ya muy popularizada- a los algoritmos como “cajas negras” proviene de la obra titulada *Black Box Society* publicada en 2015 por Frank Pasquale, en la que denuncia la opacidad tecnológica a la que estamos sometidos los ciudadanos en las democracias actuales. Pasquale explica la elección del término “black box” como una útil metáfora que encierra dos posibles significados: por un lado, hace alusión a los dispositivos de grabación y registro de datos de las aeronaves; y, por otro lado, se refiere a un sistema cuyo funcionamiento es opaco y misterioso, pues podemos ver la entrada y salida de información, pero nunca cómo se han procesado los datos para obtener un resultado determinado. Véase Pasquale, F. (2015), *Black Box Society*, Harvard University Press, Cambridge, p. 10/320 (versión online en abierto: https://tetrazeleover.at.ua/Frank_Pasquale-The Black Box Society-The Secret Al.pdf).

calcula las hectáreas globales que permiten comparar el impacto ecológico entre diferentes regiones y escalas. Esta nueva métrica se aplica tanto a sujetos individuales, como a grupos humanos, empresas o Estados. La huella ecológica compara la demanda humana de recursos naturales con la capacidad real que tiene la naturaleza de regenerar dichos recursos¹³.

A lo largo de las dos últimas décadas, el método ha sido promovido por la *Global Footprint Network*, que coordina la “contabilidad ecológica” a nivel mundial y publica anualmente el *Earth Overshoot Day*, es decir, la fecha en que la humanidad agota los recursos que la Tierra puede regenerar en un año¹⁴. Si bien algunos autores afirman que no se trata de un instrumento muy riguroso, sí admiten que es una herramienta útil para visibilizar la insostenibilidad de los actuales patrones de consumo¹⁵.

Como era de esperar, esta lógica también ha llegado al ámbito digital. Hoy se evalúa la huella ecológica de la tecnología no solo en función de lo que consume mientras está en uso, sino también considerando todo lo que implica producirla: desde la extracción de materiales y la fabricación, hasta su transporte, mantenimiento y fin de vida útil. Este cálculo abarca, además, consumos menos visibles como el agua o los minerales necesarios para sostener la infraestructura digital. En esta línea, Istrate et al.¹⁶ han analizado el consumo digital de la navegación en internet, del visionado de contenidos en *streaming*, del uso de redes sociales o de aplicaciones mediante metodologías de análisis de ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés), comparándolo con la capacidad de regeneración del planeta, y sus resultados son verdaderamente llamativos: estas actividades pueden llegar a representar hasta el 40% del presupuesto per cápita de carbono compatible con el objetivo de limitar el calentamiento global a 1,5 °C. La magnitud de esta cifra pone de manifiesto la necesidad de incorporar la variable algorítmica —entrenamiento y uso de modelos— en el cálculo de la huella ecológica digital.

Algo parecido sucede con la producción de los equipos digitales. El informe del *The Shift Project*¹⁷ advierte de que el mayor peso de la huella de carbono de la tecnología no siempre proviene de su uso cotidiano, sino de la fase de producción. En el caso de dispositivos como los teléfonos inteligentes, la fabricación puede representar hasta un 80% de su huella total antes incluso de ser encendidos por primera vez. Además, si este dato lo trasladamos al terreno de los sistemas de IA la conclusión parece clara, pues desarrollar modelos de inteligencia artificial no solo requiere una enorme capacidad de cálculo, sino también infraestructuras físicas —como servidores, sistemas de

¹³ <https://www.footprintnetwork.org/about-us/our-history/>

¹⁴ <https://overshoot.footprintnetwork.org/>

¹⁵ Moffatt, I., (2000), “Ecological footprints and sustainable development”, *Ecological Economics* 32, Elsevier, p. 359-360.

¹⁶ Istrate, R. et. Al. (2024), “The environmental sustainability of digital content consumption”, *Nature Communications*, Mayo de 2024, p. 7/11. <https://www.nature.com/articles/s41467-024-47621-w>

¹⁷ *The Shift Project*, Lean ICT – Towards Digital Sobriety, marzo 2019, The Shift Project, sección sobre huella de carbono asociada a producción y uso de equipos digitales (45 % producción, 55 % uso) <https://theshiftproject.org/en/>

almacenamiento, redes, etc.— cuya fabricación y renovación constante aumentan significativamente el impacto ambiental.

Cualquier sistema algorítmico —desde los motores de búsqueda hasta los sistemas de análisis masivo de datos— implica un consumo de energía y recursos naturales que debe ser evaluado en relación con su impacto ambiental. Lannelongue, Grealey e Inouye han desarrollado una metodología denominada *Green Algorithms*, que permite calcular las emisiones de carbono derivadas de tareas computacionales a partir de variables como el tipo de hardware, el tiempo de ejecución y la localización geográfica del centro de datos¹⁸. Sus resultados ponen de manifiesto que, incluso en aplicaciones menores o cotidianas, el coste ambiental acumulado de millones de ejecuciones diarias es significativo. En la misma línea se sitúan estudios como el de Gupta et al., que recuerdan que el impacto ambiental no proviene únicamente del consumo eléctrico en la fase de uso, sino también de la fabricación, mantenimiento y reemplazo de la infraestructura física que sostiene la computación moderna¹⁹. De este modo, la huella ecológica algorítmica es el resultado de tres factores: el gasto energético en su funcionamiento; el consumo de agua para refrigeración; y, por último, el uso de recursos minerales, que promueve la minería extractiva. Esta triple dimensión permite entender que la parte inmaterial del *software* descansa, en realidad, sobre una base material que consume una gran cantidad de recursos naturales.

En el caso de la IA generativa es especialmente preocupante el consumo de agua corriente y la extracción de materiales críticos, como son los minerales y las tierras raras. En el primer caso, investigaciones recientes estiman que el entrenamiento de modelos de gran escala (LLM), como es el caso de Chat GPT, puede consumir hasta setecientos mil litros de agua limpia entre consumo directo e indirecto, pues los modelos generativos tienen un alto consumo hídrico asociado a la refrigeración de servidores y a la generación de la electricidad que los alimenta. Si se mantiene este ritmo de consumo, para 2027 la cifra podría situarse entre los cuatro mil doscientos y seis mil seiscientos millones de metros cúbicos anuales, es decir, lo equivalente a la extracción total de agua de países como Dinamarca²⁰. Según el artículo de Shaolei Ren et al., si bien la huella de carbono de la IA es objeto de una creciente fiscalización, no ha sucedido lo mismo con la huella hídrica²¹,

¹⁸ Lannelongue, L., Grealey, J. and Inouye, M. (2021), “Green Algorithms: Quantifying the carbon footprint of computation”, p. 2/10

<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/advs.202100707>

El artículo no se limita a describir que la computación contamina, algo que ya se sabía, sino que su principal contribución es “desarrollar una metodología estándar, sencilla y generalizable para cuantificar la huella de carbono de cualquier tarea computacional, acompañada de una herramienta pública y de acceso libre”. Este método de cuantificación de la huella de carbono se encuentra en el sitio web: www.green-algorithms.org

¹⁹ Gupta, U. et al. “Chasing Carbon: The Elusive Environmental Footprint of Computing”, 28 Oct. 2020, [arXiv:2011.02839](https://arxiv.org/abs/2011.02839), p. 1/10 y 2/10.

²⁰ Ren, S. et. al. (2025), “Making IA Less Thirsty: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models”, 26 Mar. 2025, [arXiv:2304.03271](https://arxiv.org/abs/2304.03271) p. 1/10 y 2/10

²¹ La huella hídrica mide la cantidad de agua utilizada para producir cada uno de los bienes y servicios que consumimos. Se puede medir el consumo de un proceso concreto, como es el consumo de agua de un cultivo agrícola o la producción de una prenda de vestir. Aunque también es muy útil a nivel macro, midiendo el consumo de una multinacional o, incluso, el de todo un país. Estas mediciones son muy útiles a efectos de



pues solo ha sido objeto de un análisis muy residual. Tanto es así que mientras que las emisiones de carbono se incluyen de manera rutinaria en las *model cards* de IA, no ocurre lo propio con la huella hídrica, pues ni siquiera se recoge el uso directo de agua, esto es, la extracción de agua potable y su consumo por parte de la IA²². De ahí que en el artículo citado se abogue por un enfoque holístico para una IA sostenible, que vaya más allá de la huella de carbono incluyendo la huella hídrica, además de incorporar las mediciones de impacto ambiental el WUE (*Water Usage Effectiveness*) como unidad de medida en el uso de agua por parte de la IA²³.

En cuanto al consumo de minerales y tierras raras (también denominados materiales críticos), diversos estudios advierten de que el despliegue masivo de los sistemas de IA y la algoritmia depende de minerales como el litio, el cobalto, el níquel o las tierras raras, imprescindibles para fabricar microchips, baterías y sistemas de refrigeración. Un informe de la consultora SFA Oxford subraya que la creciente demanda de estos recursos, compartida con otros sectores estratégicos como el de las energías renovables o la electromovilidad, incrementa las presiones sobre ecosistemas frágiles y plantea riesgos geopolíticos por la concentración de su extracción en un reducido número de países²⁴. A ello se añade que las cadenas de suministros de estos minerales suelen estar asociadas a impactos sociales negativos, como condiciones laborales precarias, trabajo infantil o conflictos armados en regiones de extracción, lo que refuerza la necesidad de un análisis ético además de ambiental.

Estos factores obligan a incorporar al cálculo de la huella ecológica de la algoritmia y los sistemas de IA no solo el impacto derivado de su uso, sino también el de toda la cadena de suministro material que lo hace posible, desde la minería y el refinado de minerales

equilibrar bien la distribución de los costes hídricos que asumen determinados territorios en favor de otros, lo que facilita significativamente la consecución de uno de los objetivo de la justicia ambiental. <https://www.waterfootprint.org/water-footprint-2/what-is-a-water-footprint/>

²² Algunas de las grandes empresas tecnológicas, como Google o Microsoft, ya han advertido sobre el problema de la huella hídrica y han suscrito un compromiso denominado “Water Positive by 2030”, con la inclusión de la huella hídrica de la IA la norma internacional sobre IA sostenible ISO/IEC 20226. En 2024 Google publicó su Informe de sostenibilidad sobre el consumo energético de los centros de datos en EE. UU. en el que afirmaba que la expansión de los productos y servicios de IA es un factor clave en el rápido aumento del consumo de agua en los centros de datos. Afirma la empresa tecnológica que solo teniendo en cuenta los centros de datos de propiedad directa de la empresa, en 2023 se extrajeron veintinueve mil millones de litros y consumieron (es decir, evaporaron) más de veintitrés mil millones de litros de agua dulce para refrigeración *in situ* de los centros de datos, de los cuales casi un 80% era agua potable. Ídem, p. 1/10.

²³ No obstante, advierten los autores del artículo, antes de poner el foco de atención en la huella hídrica que genera la IA -y en la escalada de los próximos años- hay que diferenciar entre dos tipos de huellas hídricas: *Water Withdrawal Footprint* (WWF) y *Water Consumption Footprint* (WCF), aunque por defecto, huella hídrica se refiere a huella de consumo de agua, es decir WCF. Ídem, p. 2/10 y 3/10.

²⁴ SFA Oxford, 2024. <https://www.sfa-oxford.com/knowledge-and-insights/critical-minerals-in-low-carbon-and-future-technologies/critical-minerals-in-artificial-intelligence/> Se afirma en el Informe que en el núcleo de esta transformación digital se encuentra un ecosistema complejo de minerales críticos, cada uno desempeñando un papel específico para hacer posible el rendimiento digital, la eficiencia energética, el almacenamiento de datos y la conectividad de alta velocidad. De ahí que recoja un detallado catálogo de minerales que se despliega individualmente para explicar al lector la función concreta de cada mineral en el ecosistema de la IA.

hasta la fabricación y el desecho de los equipos. En este sentido, el análisis de la huella ecológica algorítmica se amplía hacia una perspectiva global, en la que el *software* no puede desvincularse de la infraestructura material (*hardware*) que lo sostiene ni de las relaciones de dependencia política y social que genera²⁵.

2. Aplicación de los principios de trazabilidad y transparencia al impacto ambiental: abriendo las cajas negras.

Sin perjuicio de que en el epígrafe siguiente se analice en detalle el marco ético y jurídico de la algoritmia en el espacio de la Unión Europea, en este apartado nos centraremos en los principios de transparencia y trazabilidad en el ámbito digital, específicamente en relación con los algoritmos y, en general, con los sistemas de IA generativa basados en modelos de lenguaje (LLM), poniendo el acento en su impacto ambiental.

En primer lugar, ha de aclararse qué se entiende por “transparencia” algorítmica, pues, como advierte Cotino Hueso, se trata de un término polisémico. La idea de transparencia, a priori es positiva, ya que se opone a lo oculto, lo misterioso e inexplicable, por lo que cobra mucha importancia en el ámbito de la IA y, especialmente, en el de la algoritmia. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la transparencia tiene un carácter instrumental, pues se exige para garantizar o salvaguardar otros valores²⁶. En nuestro caso, que los algoritmos sean transparentes garantiza la rendición de cuentas o *accountability*, tanto de carácter público como privado; se garantiza el derecho a acceder a los datos públicos de los que se ha valido el algoritmo, o de los datos personales siempre que estén directamente relacionados con el sujeto que accede a la información; garantiza también la posibilidad de subsanar errores y de eliminar sesgos o discriminaciones; y, por último, la transparencia proporciona herramientas de alegación y defensa frente a una decisión automatizada²⁷.

La transparencia algorítmica se materializa en lo que se ha denominado “auditabilidad”, que se refiere a la capacidad de un sistema de IA de someterse a la evaluación de sus algoritmos, datos, procesos y diseño²⁸. Aunque el término “auditabilidad” no se recoge de manera literal en el Reglamento (UE) 2024/1689, de 13 de junio, por el que se establece la Ley de Inteligencia Artificial de la UE, este establece una serie de mecanismos que la

²⁵ El Informe de la SFA Oxford pone de manifiesto la relación de dependencia que se da entre tecnología, localización geográfica de los minerales y tierras raras y el impacto social y ambiental que la explotación de estos recursos genera. Esto refuerza la tesis que aquí se sostiene en relación con la necesaria ampliación del impacto ambiental hacia el impacto social. Esto es, la sostenibilidad ecológica desde el prisma de la tecnología implica un componente de justicia ambiental, entendida ésta como justicia distributiva.

²⁶ Cotino Hueso, L., “Transparencia y explicabilidad de la Inteligencia Artificial y compañía (comunicación, interpretabilidad, inteligibilidad auditabilidad, testabilidad, comprobabilidad y simulabilidad...) Para qué, para quién y cuánta”, en Cotino Hueso, L. y Castellanos Claramunt, J., (Ed.) (2022), *Transparencia y explicabilidad de la Inteligencia Artificial*, Tirant lo Blanch, Valencia, p. 25-27.

²⁷ Ídem, p. 32-33.

²⁸ Ídem, p. 58.

hacen posible: la exigencia de documentación técnica, el registro obligatorio de ésta, la monitorización post-comercialización y las evaluaciones de conformidad. Todo ello delimita un marco normativo que permite la verificación externa de los sistemas de IA y sus algoritmos por parte de auditores privados o públicos. El propio Reglamento exige que los sistemas de IA de alto riesgo sean auditables a través de distintos instrumentos y procedimientos, entre los que destacan la documentación técnica y su conservación (arts. 11 y 12), así como las evaluaciones de conformidad tanto *ex ante* como *ex post* a la comercialización de los sistemas (arts. 45-50). Sin embargo, conviene precisar que la auditabilidad contemplada en la normativa europea está destinada a verificar el cumplimiento legal en materias como los derechos fundamentales, la salud, la seguridad y la democracia, pero no se concibe como un mecanismo de fiscalización del impacto ambiental.

En esta misma línea se sitúa el Reglamento (UE) 2022/2065, de 19 de octubre de 2022, relativo a un mercado único de servicios digitales (*Digital Services Act, DSA*), en cuyo Capítulo III establece las obligaciones de diligencia debida para crear un entorno en línea transparente y seguro. En relación con las plataformas y motores de búsqueda de gran tamaño el Reglamento (arts. 34-37) contempla la obligación de llevar a cabo evaluaciones de riesgos y de someterse a auditorías anuales de carácter independientes. Dichos riesgos se definen en el art. 34.1 e incluyen la difusión de contenidos ilícitos; impactos negativos sobre derechos fundamentales como la libertad de expresión, la privacidad o la no discriminación; efectos perjudiciales en los procesos electorales y democráticos; y riesgos para la salud pública, los menores y la seguridad. Sin embargo, se observa que los riesgos ambientales no se encuentran expresamente previstos en este marco regulatorio.

Algo similar sucede con el Reglamento (UE) 2016/679 (RGPD), que, si bien no regula la auditabilidad técnica de los algoritmos, sí establece obligaciones de transparencia (arts. 12–15), en el sentido de tener que explicar la lógica de las decisiones automatizadas (arts. 13.2.f), 14.2.g) y 15.1.h)), así como de rendición de cuentas (*accountability*, arts. 5.2 y 24). Además, el art. 22 reconoce el derecho a no ser objeto de decisiones automatizadas que tengan consecuencias jurídicas o similares, lo que obliga indirectamente a que haya una supervisión humana. Con todo, esta fiscalización se orienta fundamentalmente a la detección de sesgos y discriminaciones algorítmicas en perjuicio de colectivos vulnerables (por ejemplo, en el acceso al empleo, el crédito bancario o los servicios públicos) y no a una evaluación de los impactos ambientales de tales decisiones técnicas.

En consecuencia, tanto en la Ley de la IA como en el DSA y el RGPD, la transparencia y la trazabilidad se presentan como principios jurídicos dirigidos a proteger derechos fundamentales y valores democráticos, pero no se extienden al plano ecológico. El hecho de que la normativa europea no exija una medición del impacto ambiental supone un vacío legal que pone en entredicho la coherencia de la política europea frente a sus propios compromisos climáticos y de transición verde. Si bien la normativa europea tiene el buen propósito de abrir las “cajas negras” de los algoritmos en favor de evitar sesgos racistas, machistas o edadistas no entra entre sus objetivos auditar el impacto ambiental. Esta

laguna normativa lleva a la paradoja de que la UE esté impulsando dos agendas políticas en paralelo, la transición tecnológica por un lado y la transición verde por otro, sin que ambas se integren jurídica y políticamente.

Esta incoherencia normativa ha provocado que sea la propia sociedad civil la que quiera abrir las “cajas negras” y auditar el impacto ecológico, tanto de los algoritmos como de la IA generativa y de todos los sistemas de LLM. De hecho, ya se cuenta con iniciativas académicas como es el caso de *Green Algorithms*, *CodeCarbon*, *ML CO₂ Impact*, que podrían servir para ampliar el marco normativo actual. En estas propuestas se formulan metodologías para auditar el consumo energético, huella de carbono y uso de recursos en tareas computacionales, que podrían integrarse en auditorías legales si el marco normativo lo exigiera. La primera iniciativa académica denominada *Green Algorithms*²⁹ surge en la Universidad de Cambridge y está liderada por Loïc Lannelongue y por Michael Inouye y promueve una ciencia computacional más sostenible desde una perspectiva ambiental. La herramienta de medición que han creado es de acceso público y su uso es muy sencillo, pues solo requiere la inclusión de datos básicos —tiempo de ejecución de la tarea computacional, tipo de fuente de energía consumida o las características del hardware— en la “calculadora web” de huella de carbono, diseñada para calcular de forma sencilla y confiable las emisiones de CO₂ de cada tarea computacional.

Otro ejemplo paradigmático de este esfuerzo académico por “abrir las cajas negras”, que en muchas ocasiones suponen los algoritmos, es la herramienta *Machine Learning Emissions Calculator*³⁰, creada por un grupo de investigación académica de la Universidad de Montreal y un experto en IA³¹. Este instrumento permite estimar, de forma transparente y abierta, las emisiones asociadas al entrenamiento de modelos de Machine Learning, teniendo en cuenta factores clave como la localización del centro de datos, la fuente energética utilizada, el tipo de hardware empleado y el tiempo de entrenamiento. A partir de esta metodología, se ha mostrado que las emisiones pueden variar hasta 40 veces según el lugar en el que se entrena el modelo, lo que subraya la necesidad de integrar criterios ambientales en las decisiones técnicas que han de adoptarse en el proceso de creación y desarrollo de los algoritmos. Esta iniciativa no solo proporciona datos, sino que promueve buenas prácticas, a través de la formulación de recomendaciones éticas, encaminadas a reducir emisiones y mejorar la eficiencia.

Fuera del ámbito académico, también encontramos ejemplos muy interesantes de sistemas que permiten medir el impacto ambiental de la IA y los algoritmos, especialmente en lo que respecta a la huella de carbono. Un caso paradigmático es el de *Bezos Earth Fund*³², que en mayo de 2024 publicó el Informe *Landscape Assessment of*

²⁹ <https://www.green-algorithms.org/>

³⁰ <https://mlco2.github.io/impact/>

³¹ Este grupo de investigación explica los fundamentos y la metodología de su “calculadora de emisiones digitales” en el siguiente artículo: Lacoste, A., Luccioni, A., Schmidt, V. y Dandres, T., “Quantifying the carbon emissions of machine learning”, 4 Nov. 2019 <https://arxiv.org/abs/1910.09700>

³² <https://www.bezosearthfund.org/>

AI for Climate and Nature, en el que destaca la utilidad de muchos de los algoritmos verdes que ya están en funcionamiento. El Informe alude al caso concreto de los algoritmos integrados en los modelos de predicción climática; a los sistemas de control del clima en tiempo real; a los empleados en la optimización de las redes eléctricas, e incluso, a los algoritmos empleados para una mejor gestión del agua o una mejor conservación de la biodiversidad. Sin embargo, apunta el Informe, que estos algoritmos, aunque sean “verdes”, no siempre cumplen criterios de justicia ambiental o de equidad social, lo que podría beneficiar de forma indirecta a las grandes empresas o regiones con más poder económico frente a los colectivos o territorios más vulnerables. Para evitar esta situación de inequidad en el Informe se propone lo siguiente: en primer lugar, generar estándares comunes o métricas estandarizadas que midan el impacto ambiental de los sistemas de IA y los algoritmos. En segundo lugar, desarrollar sistemas de trazabilidad energética que cubran el ciclo de vida de los algoritmos, desde su diseño hasta su desarrollo y aplicación. En tercer lugar, promover una mejor formación en ética social y ambiental de los diseñadores y desarrolladores de sistemas de IA y de algoritmos. En cuarto lugar, incorporar el principio de justicia ambiental en los Códigos de Buenas Prácticas Empresariales o de Responsabilidad Social Empresarial, de tal forma que se transforme en una responsabilidad eco-social corporativa. Por último, conmina a las instituciones públicas, especialmente a las instancias educativas, a que fomenten una cultura tecnológica responsable con el medio ambiente³³.

En suma, mientras la normativa europea abre las cajas negras de los algoritmos para garantizar la protección de los derechos fundamentales y la dignidad humana, la sociedad civil y la academia están ofreciendo varios métodos online de medición del impacto ambiental de la algoritmia y los sistemas de IA. Es decir, es la sociedad civil y la universidad la que tiene el firme propósito de extender los principios de transparencia y trazabilidad al ámbito de la ecología. De ahí, que en el siguiente epígrafe se analice el marco ético y jurídico que regula la sociedad digital y cómo esta podría integrar de forma coherente la dimensión ambiental.

III. Marco ético y jurídico de la algoritmia en la sociedad digital.

Advierte Mark Coeckelbergh que, en torno a la IA —en la que podemos incluir la algoritmia y el Big Data—, se ha desarrollado una ética antropocéntrica basada en el respeto fundamental a la dignidad humana. Este antropocentrismo tecnológico implica que tanto el bien común —principio de beneficencia y no maleficencia— como la dignidad humana —principio de autonomía y justicia— gozan de prioridad sobre cualquier cosa que requiera o haga la tecnología. Es decir, lo fundamental es que la

³³<https://www.climate.columbia.edu/sites/www.climate.columbia.edu/files/content/research/AI%20for%20Climate%20&%20Nature%20-%20Bezos%20Earth%20Fund/Landscape%20Assessment%20of%20AI%20for%20Climate%20and%20Nature%20-%20May%202024.pdf>, p. 57 y 58.

tecnología beneficie y sirva a los seres humanos y no al revés³⁴. Sin embargo, para el autor mencionado un enfoque meramente antropocéntrico es cuando menos cuestionable, pues desatiende la ética medioambiental, que no solo introduce en el debate la necesaria sostenibilidad del ecosistema, sino también la potencial afectación a otros animales no humanos con los que compartimos planeta³⁵.

De hecho, la mayoría de los autores entienden que la ética de la tecnología en general y de la IA en particular se tiene que centrar en los intereses del ser humano, esto es, tiene que ser antropocéntrica. Carissa Veliz, por ejemplo, afirma que la ética tecnológica debería aprender de la ética médica —que es, por definición, antropocéntrica—, y especialmente en el respeto a la autonomía personal, en alusión al principio de respeto a la persona del Informe Belmont. Veliz entiende que la tecnología digital no respeta la autonomía personal, por ejemplo, cuando está diseñada para generar un uso adictivo que secuestra nuestra atención³⁶.

En la misma línea argumental que Véliz se sitúa Luciano Floridi y su equipo con el proyecto *AI4People*³⁷, donde proponen un marco ético para una buena sociedad digital que identifica cinco principios fundamentales coincidentes con los principios básicos de la biomedicina: beneficencia, no maleficencia, autonomía, justicia y explicabilidad. Este último es el único que no proviene del Informe Belmont por razones obvias y es precisamente la aportación más novedosa de Floridi frente a marcos éticos propuestos previamente, pues combina el conocimiento técnico (saber cómo funciona el sistema tecnológico) con la responsabilidad ética y jurídica (quién es el responsable de sus efectos). Además, el informe *AI4People* no se limita a la formulación teórica, sino que traduce estos principios en veinte recomendaciones de política pública, ofreciendo así un puente entre la ética y la regulación jurídica. En una publicación posterior, Floridi y su equipo desarrollaron un marco unificado que es el resultado de la comparación entre códigos éticos existentes sobre IA³⁸. En dicho marco unificado se consolidan los cinco principios mencionados, reafirmando así su visión antropocéntrica para una ética de la tecnología, aunque incorporando la exigencia de que la gobernanza de la tecnología sea comprensible, trazable y auditabile. Si bien esta última propuesta sigue centrándose en el ser humano, ya se abre a principios puramente técnicos —transparencia, trazabilidad y explicabilidad— que podrían favorecer la inclusión de exigencias vinculadas con la sostenibilidad ambiental y el impacto ecológico de los algoritmos.

³⁴ Coeckelbergh, M., (2021), *Ética de la Inteligencia Artificial*, Cátedra, Madrid, p. 151.

³⁵ Ídem, p. 152

³⁶ Véliz, C., (2019), “Three things digital ethics can learn from medical ethics”, *Nature Electronics*, 15 August 2019, p. 1-3 <https://philpapers.org/archive/VLITTD.pdf>

³⁷ Floridi, L., et. al. (2018), *AI4People's Ethical Framework for a Good AI Society: Opportunities, Risks, Principles and Recommendations*, https://www.eismd.eu/wp-content/uploads/2019/11/AI4People%20%99s-Ethical-Framework-for-a-Good-AI-Society_compressed.pdf

³⁸ Floridi, L. & Cowls, J., (2019), “A Unified Framework of Five Principles for AI in Society”, *Harvard Data Science Review*, Summer 2019. <https://hdsr.mitpress.mit.edu/pub/l0jsh9d1/release/8>

Siendo la de Floridi una propuesta teóricamente muy solvente —de ahí que haya tenido muy buena acogida en los organismos reguladores— quizá de la Antonio Diéguez sea una propuesta teórica más innovadora, pues no deriva de la bioética. Diéguez se aventura a delimitar los ocho objetivos centrales que le parecen deseables en cualquier regulación normativa de la IA: seguridad en el diseño; conocimiento suficiente de los procesos y de los resultados; enfoque axiológico (intereses de los ciudadanos); posibilidad de incorporar en las decisiones de las máquinas objetivos y valores humanos; introducción en el diseño tecnológico de mecanismos que permitan limitar el control que las máquinas pueden ejercer sobre los seres humanos; capacidad de la ciudadanía para participar en la agenda investigadora y participar en el diseño; creación de órganos reguladores ágiles y con capacidad conminatoria; y, por último, educación de los ciudadanos³⁹.

Tanto en la ética de la tecnología dominante, inspirada en los principios clásicos de la bioética, como en las propuestas más recientes que incorporan principios de carácter técnico, la ética de la IA —y en particular de la algoritmia— continúa anclada en una matriz antropocéntrica. Y si bien este enfoque ha permitido consensuar y consolidar unos principios básicos que regulen la tecnología actual, no deja de llamar la atención la ausencia de una referencia clara a la exigencia de la sostenibilidad ambiental de cualquier proceso tecnológico. La ausencia de un principio ambiental al mismo nivel que los principios de beneficencia, justicia y autonomía, invisibiliza los impactos negativos de la tecnología sobre el planeta y las especies no humanas. Superar esta carencia exige ampliar el horizonte ético-jurídico hacia un modelo de gobernanza tecnológica que sea no solo humana y justa, sino también ecológicamente responsable, cuestión que será objeto de análisis en el epígrafe siguiente.

1. De *lege lata*: más allá del antropocentrismo.

Un análisis somero de los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), aprobados por Naciones Unidas en el marco de la Agenda 2030, permite constatar la vigencia de una orientación marcadamente antropocéntrica, centrada en la protección de los derechos humanos y la dignidad, más que en la sostenibilidad ambiental. Además, en la última década, la ONU ha asumido la propuesta formulada por Luciano Floridi y su equipo en materia de gobernanza de la IA—incluida la algoritmia—, que se focaliza en la garantía de los derechos humanos, la democracia y la seguridad. Este planteamiento conlleva la adopción de una ética antropocéntrica que se articula a través de principios técnicos y procedimentales como la transparencia, la trazabilidad y la explicabilidad de los algoritmos⁴⁰.

³⁹ Diéguez, A., (2024), *Pensar la tecnología. Una guía para comprender filosóficamente el desarrollo de la tecnología actual*, Shackleton Books, España, p. 163-165.

⁴⁰ La A/RES/78/265 (2024) alienta a los Estados a promover “transparency, predictability, reliability and understandability” en sistemas de IA; la A/RES/79/175 (2024). En estos instrumentos normativos insiste a los Estados en la prevención de posibles daños y en la prevención y garantía de los derechos humanos, aunque sin proyectarse especialmente en el ámbito ecológico.

En coherencia con esta propuesta teórica, la UNESCO aprobó en 2021 la *Recomendación sobre la Ética de la IA*, que se ha convertido en el primer estándar global de *soft law* en la materia⁴¹. Este instrumento normativo establece principios de respeto y garantía de los derechos humanos, equidad, transparencia y rendición de cuentas, aunque introduce como novedad la necesidad de atender a los posibles impactos ambientales de la IA. Sin embargo, se trata en realidad de una recomendación y no de una exigencia legal de la que se pueda derivar un mecanismo de control ambiental específico.

Recientemente la ONU ha promovido la aprobación de un Pacto Digital Global que aún se encuentra en fase de elaboración. En este nuevo instrumento normativo Naciones Unidas reconoce la necesidad de una transformación digital que sea social y ambientalmente justa, lo que favorece una extensión de la ética antropocéntrica tradicional a la realidad de la emergencia climática. Si bien, en el texto se reconoce el potencial transformador de la IA en relación con el medio ambiente, pues ésta puede ayudarnos a abordar los desafíos ambientales, también se advierte sobre sus posibles consecuencias negativas para el medio ambiente. De ahí que los firmantes del texto se comprometan a promover la sostenibilidad a lo largo del ciclo vital de las tecnologías digitales, incluyendo medidas específicas para aumentar la eficiencia en el uso de los recursos naturales utilizados —tecnologías resilientes—, así como asegurarse de que la infraestructura y los equipos digitales estén diseñados de manera sostenible —sostenibilidad desde el diseño—⁴².

Por su parte, el Consejo de Europa ha aprobado el Convenio Marco sobre Inteligencia Artificial y derechos humanos, democracia y Estado de Derecho en 2024, que es el primer tratado internacional jurídicamente vinculante en la materia. Su objeto es alinear todas las actividades relacionadas con la IA con sus tres pilares ético-jurídicos fundamentales: garantía de los derechos humanos, respeto a la democracia y al Estado de Derecho. Sin embargo, no impone obligaciones ambientales específicas para los Estados.⁴³

En el ámbito de la UE se ha desarrollado un marco normativo que combina su Pacto Verde Europeo con una Estrategia Digital⁴⁴ ambiciosa, que se concreta en varios instrumentos normativos, entre los que destaca el Reglamento de Inteligencia Artificial ya citado. Este Reglamento establece requisitos de transparencia, trazabilidad, gestión de riesgos y supervisión humana para los sistemas de IA, aunque no integra el principio de sostenibilidad ambiental como criterio de evaluación de riesgos. Por otro lado, el Reglamento de Servicios Digitales (DSA) ya citado, y el Reglamento de Mercados Digitales (DMA) también citado anteriormente, inciden en la transparencia y la competencia en el entorno digital, pero no sobre el impacto ambiental de dichos servicios o mercados digitales. Por último, en el Reglamento General de Protección de Datos, ya

⁴¹ <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381133/PDF/381133eng.pdf.multi.page=62>

⁴² https://www.un.org/digital-emerging-technologies/sites/www.un.org.techenvoy/files/general/GDC_Rev_3_silence_procedure.pdf. Principio 8 e) y 11 c) y e).

⁴³ <https://rm.coe.int/1680afae3c?utm>

⁴⁴ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/869813/EGD_brochure_ES.pdf

citado, y en la Ley del Dato de 10 de octubre de 2024 —entra en vigor en septiembre de 2025—, articulan un régimen de derechos y obligaciones en materia de datos. Si bien el Pacto Verde Europeo reconoce la necesidad de una transición digital que sea sostenible en términos ambientales, no se materializa en obligaciones jurídicas concretas como sería, por ejemplo, medir el impacto ambiental de cualquier servicio o producto digital, o la de reducir la huella de carbono de estos servicios o productos si fuera el caso.

Por último, en España destaca especialmente la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (ENIA)⁴⁵, que incluye la sostenibilidad como uno de sus principios rectores, aunque sin establecer requisitos u obligaciones concretas. La Carta de Derechos Digitales reconoce derechos vinculados con la sociedad digital, entre los que destaca el derecho a un entorno digital sostenible, aunque siguiendo la misma lógica que en ENIA, es decir, sin exigir ninguna obligación concreta. Recientemente se ha puesto en marcha la Agencia Española de Supervisión de la Inteligencia Artificial (AESIA), cuya función principal consiste en vigilar el cumplimiento de la normativa europea y nacional en materia de IA, poniendo especial atención en los derechos fundamentales y la seguridad, no en el medio ambiente. Sin embargo, al tener que estar alineado con la normativa y las políticas europeas, AESIA tendrá que conjugar su rol principal de supervisor de la IA con el cumplimiento del Pacto Verde Europeo.

En definitiva, aunque el marco normativo internacional, el europeo y el nacional reconocen en diferentes grados la necesidad de una digitalización sostenible, el análisis normativo evidencia que este reconocimiento permanece en el plano programático o de *soft law*, sin traducirse en obligaciones jurídicas específicas, mecanismos de evaluación ambiental ni sanciones por incumplimiento. La gobernanza actual de la IA sigue vinculada con la ética antropocéntrica centrada en los derechos humanos, la democracia y la seguridad, dejando en un segundo plano lo relativo al impacto ambiental que pueda derivarse de los servicios y las infraestructuras digitales.

2. De lege ferenda. Del “fairness” al principio de sostenibilidad ambiental.

El concepto de *fairness* —traducido como equidad o justicia— se ha consolidado como uno de los principios básicos de la gobernanza ética y jurídica de la IA, junto con los principios de transparencia, trazabilidad y rendición de cuentas, como ya se ha visto. El *fairness* tiene por objeto prevenir sesgos y discriminaciones contra personas concretas o grupos humanos, con la finalidad de garantizar un tratamiento equitativo en la toma de decisiones automatizadas⁴⁶. Esta prevención se lleva a cabo con métricas y técnicas de detección de sesgos que pueden darse en los diferentes procesos de aplicación de la IA y de la algoritmia, y que por supuesto van más allá de la pura dimensión matemática de los

⁴⁵ <https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2020/ENIA2B.pdf>

⁴⁶ Mitchell, S., Potash, E., Barocas, S., D'Amour, A. & Lum, C., “Prediction-Based Decision and Fairness: A Catalogue of Choices, Assumptions and Definitions”, April 2020, p. 1/22. <https://arxiv.org/pdf/1811.07867>

algoritmos, pues la equidad implica necesariamente la inclusión de un criterio de justicia social⁴⁷.

No obstante, el *fairness* tal y como se concibe en la actualidad presenta una limitación fundamental: su marco de referencia es estrictamente antropocéntrico en la línea teórica analizada anteriormente. Protege a las personas frente a los daños de la IA y la potencial discriminación de la lógica algorítmica, pero ignora los impactos que estos sistemas digitales generan sobre el medio ambiente. Nuestra propuesta es, como ya se ha señalado, que la justicia ambiental debería integrarse en la noción de *fairness*, extendiéndola más allá de su ámbito actual. Además, podría darse el caso, por ejemplo, de que un sistema de IA pueda cumplir perfectamente con métricas de equidad demográfica y, sin embargo, tener un consumo energético y de agua tan elevado que agrave la crisis climática o hídrica en regiones vulnerables.

Por eso, es razonable que los impactos ambientales también se consideren vulneraciones del principio de *fairness* en sentido amplio. De ahí que nuestra propuesta de lege ferenda sea la formulación de un principio de sostenibilidad ambiental aplicado a la algoritmia y definido como la obligación de diseñar y desarrollar sistemas de IA, que reduzcan significativamente su huella ecológica. Este principio podría integrarse en el Reglamento de Inteligencia Artificial de la Unión Europea o Ley de IA europea ya citada —en forma de “adenda” por ejemplo— como criterio de evaluación de riesgos, complementando las actuales exigencias centradas en derechos fundamentales, la democracia y la salud. Tal integración requeriría, como mínimo, la medición obligatoria del consumo energético, de agua y de materiales críticos de los sistemas de IA de alto riesgo, así como la publicación de esta información para consulta pública.

Por su parte, en España se han aprobado una batería de normas en los últimos años dirigidas a delimitar el marco normativo para una transformación digital sostenible. La Ley del Cambio climático y transición energética, junto con la contratación pública verde, establecen obligaciones y criterios ambientales que orientan tanto la inversión pública como la actividad empresarial hacia modelos más responsables con el entorno natural. En este contexto destaca el Programa Nacional de Algoritmos Verdes (PNAV), una ambiciosa estrategia impulsada por el Gobierno desde el año 2023. El PNAV tiene como objetivo principal fomentar el desarrollo de una IA “verde desde el diseño”, es decir, que desde el principio se diseñe la IA con criterios de sostenibilidad medioambiental. Para

⁴⁷ Emilio Ferrara, de la Universidad Southern de California, pone varios ejemplos de sistemas de IA que han demostrado estar sesgadas especialmente por la raza. El primer ejemplo que pone es el del sistema COMPAS aplicado en los procesos penales, concretamente en el régimen penitenciario de los Estados Unidos, que demostró tener un marcado carácter racista en sus estadísticas. Pero también pone otros ejemplos en el sector de la salud, en los sistemas de IA de reconocimiento facial y en los modelos de IA generativa (GenIA). El autor mencionado propone un pormenorizado catálogo de acciones encaminadas a prevenir y evitar estos sesgos en la IA. Por ejemplo, propone alimentar el entrenamiento de la IA con datos sintéticos, de tal forma que se mitigue la “sobrerepresentación” o el “sobremuestreo” de la raza blanca sobre la negra, todo ello, claro está, sometido a auditorías posteriores para corregir los posibles sesgos de resultado. Ferrara, E., “Fairness and Bias in Artificial Intelligence: A Brief Survey of Sources, Impacts and Mitigations Strategies”, Sci 2024, 6, 3, p. 3/15 y 5/15 <https://www.mdpi.com/2413-4155/6/1/3>

ello se articula en torno a cuatro ejes fundamentales: a) Investigación en IA sostenible y *Green Tech*; b) infraestructuras y servicios eficientes; c) integración productiva, facilitando la adopción de IA verde en sectores clave de la economía; y d) dinamización del mercado a través de iniciativas que incentiven la innovación sostenible⁴⁸. Estas medidas adoptadas por el Gobierno español no solo buscan reducir el impacto energético de los modelos de IA, sino también posicionar a España como referente europeo en el desarrollo de tecnologías digitales sostenibles.

En definitiva, la evolución de la gobernanza algorítmica requiere ampliar los límites antropocéntricos del principio de *fairness* hacia una noción más ambiciosa que incorpore la sostenibilidad ambiental. La formulación de un principio específico de sostenibilidad aplicado a la IA —con obligaciones de medición, reducción y publicación periódica de su huella ecológica— permitiría subsanar la laguna normativa actual y situar la justicia ambiental en el centro del debate regulatorio.

Esta propuesta de *lege ferenda* no pretende sustituir los principios clásicos de equidad, transparencia o rendición de cuentas, sino complementarlos con un criterio ecológico que haga visible la dimensión material y distributiva de los impactos algorítmicos. De hecho, solo desde esta ampliación es posible comprender que los costes ambientales de la IA no son meros efectos colaterales, sino formas de injusticia estructural que recaen desproporcionadamente sobre poblaciones y territorios vulnerables. Por eso, la ampliación del principio de *fairness* hacia la sostenibilidad ambiental abre el camino para abordar un segundo eje de análisis: la relación entre algoritmos verdes y justicia distributiva. Si la justicia ambiental exige reconocer la huella ecológica de los sistemas digitales, la justicia distributiva nos obliga a preguntarnos quién soporta dichos costes, cómo se reparten sus beneficios y qué modelo de gobernanza ecológica y digital puede garantizar un reparto equitativo de las cargas y los beneficios.

IV. Algoritmos verdes y justicia distributiva. Una propuesta de gobernanza ecológica digital.

La propuesta que aquí se plantea sobre los algoritmos verdes no puede limitarse a incluir un criterio de medición de la huella ecológica de los algoritmos en particular y de la IA en general, ni a la mera incorporación en el ámbito normativo de un principio complementario de sostenibilidad ambiental. Si pretendemos alcanzar el objetivo de la justicia ambiental o ecológica en la sociedad digital, resulta imprescindible articular un criterio de distribución equitativo consistente en: analizar quién soporta las cargas o costes ambientales del desarrollo algorítmico y de la IA, y cómo se reparten sus beneficios en términos sociales y territoriales. Siguiendo esta línea argumental, en el presente epígrafe se propone una doble aproximación. En primer lugar, situar la justicia ambiental en el centro de la reflexión sobre algoritmia verde, entendiéndola como una modalidad

⁴⁸https://portal.mineco.gob.es/RecursosNoticia/mineco/prensa/noticias/2022/20221213_plan_algoritmos_verdes.pdf. P. 14/38

de justicia distributiva. En segundo lugar, explorar cómo este enfoque puede consolidar un nuevo paradigma de gobernanza ecológica digital, en el que la sostenibilidad no sea un mero adorno, sino un criterio operativo de legitimidad democrática y de organización jurídico-política de la sociedad digital.

No obstante, antes de adentrarnos en el terreno teórico propiamente dicho, es conveniente asumir una definición, más o menos canónica, de lo que se entiende por justicia ambiental y por justicia distributiva en la literatura especializada.

El PNUD (Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo) define la justicia ambiental como “un enfoque basado en los derechos humanos y en una aproximación multidisciplinar, que abarca derechos ambientales, Estado de Derecho, justicia social, seguridad y perspectiva ambiental, con el fin de abordar necesidades inmediatas de justicia ambiental y combatir las desigualdades estructurales que la perpetúan”.⁴⁹ Esta es precisamente la concepción de justicia ambiental que aquí queremos asumir, pues, parte de un necesario enfoque multidisciplinar que integra tanto el ámbito social —desigualdades sociales—; el ámbito ético-jurídico —los derechos humanos—; y, por último, el estrictamente ambiental.

Por su parte, la Agencia Europea del Medio Ambiente —dependiente de la UE— no dispone de una definición canónica de justicia ambiental, sin embargo, en sus diferentes documentos sobre transición sostenible e inclusión social sí ha ido delimitando una concepción multidisciplinar que abarca tres dimensiones de justicia: la justicia distributiva, la procesal y justicia de reconocimiento⁵⁰. La justicia procesal se refiere a quién participa y cómo en los procesos de toma de decisión sobre cuestiones ambientales, energéticas y de sostenibilidad. Por ejemplo, el Convenio de Aarhus pretende alcanzar este tipo de justicia apoyándose en tres pilares fundamentales: información, participación y acceso a la justicia en cuestiones ambientales⁵¹. Por su parte, la justicia de reconocimiento busca garantizar que las identidades, culturas y formas de vida de las diferentes comunidades humanas sean reconocidas y respetadas en todas las decisiones ambientales. Esto pasa por reconocer desigualdades históricas como el colonialismo extractivo que ha llegado hasta la primera mitad del siglo XX. Si trasladamos este criterio de justicia a la sociedad digital y tecnológica nos es de mucha utilidad para identificar qué colectivos humanos cargan con los costes ambientales de la algoritmia y de la IA, por ejemplo, qué comunidades padecen la minería de cobalto y litio; cómo pueden acceder al consumo de agua aquellos territorios donde se les ha instalado un centro de datos, etc.

El concepto de justicia distributiva es aún más complejo de definir entre otras cuestiones porque ha sido un concepto estudiado y debatido durante siglos. Por eso, aquí vamos a partir de dos concepciones canónicas en la literatura especializada, la primera en el tiempo es la de Aristóteles y la segunda es la de John Rawls. Aristóteles define su concepto de justicia en *Ética a Nicómaco* y en la *Política*. Aristóteles entiende la justicia como una

⁴⁹ <https://www.undp.org/rolhr/human-rights/environmental-justice>

⁵⁰ <https://www.eea.europa.eu/es>

⁵¹ [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:22005A0517\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:22005A0517(01))

virtud perfecta y es perfecta porque quien la posee puede conducirse virtuosamente con otros y no solo consigo mismo. Esto es, la justicia es la única virtud que es un “bien ajeno” porque “es-para-otro”. De ahí que la justicia no sea parte de la virtud, sino la virtud en su totalidad⁵². A su vez, la virtud de la justicia puede dividirse en dos tipos: la justicia correctiva y la distributiva. El primer tipo de justicia es la justicia de las transacciones, por lo que se da en un plano horizontal, es decir, entre sujetos. Dos sujetos intercambian bienes o servicios, uno lo da o lo presta, el otro paga una contraprestación. Esta justicia de la reciprocidad puede alcanzarse bien de forma voluntaria, es decir, cuando ambas partes cumplen voluntariamente con los extremos del acuerdo previamente fijados -qué bien o servicio se presta y qué pago se hace a cambio-, o bien de forma involuntaria, cuando uno de los dos sujetos incumple su parte del acuerdo y tiene que intervenir un tercero imparcial, es decir, el juez⁵³. Por su parte, la justicia distributiva es una justicia de reparto de bienes, servicios, prestaciones o reconocimientos públicos que se vale de diferentes criterios de justicia, entre los que destaca el meritocrático (mérito y capacidad)⁵⁴. El Estado administra bienes y servicios públicos que ha de repartir entre los administrados, partiendo de la premisa de que los recursos de los que dispone un Estado o una comunidad política son escasos, por lo que hay que seleccionar criterios de distribución que atiendan a cierta idea de justicia, como es la igualdad, el equilibrio o la equidad. Además del meritocrático existen otros criterios de reparto como la necesidad o el mero azar⁵⁵ (en la democracia ateniense se repartían algunos cargos públicos atendiendo al azar).

Veintitrés siglos después, John Rawls delimita un concepto de justicia distributiva que ha pasado a ser una definición paradigmática en la teoría política contemporánea. John Rawls basa su concepción de la justicia en dos principios fundamentales que son los siguientes: a) cada persona tiene el mismo derecho irrevocable a un esquema plenamente adecuado de libertades básicas iguales que sea compatible con un esquema similar de libertades para todos; y b) las desigualdades sociales y económicas tienen que satisfacer dos condiciones: en primer lugar, tienen que estar vinculadas a cargos y posiciones abiertos a todos en condiciones de igualdad equitativa de oportunidades; y, en segundo lugar, las desigualdades deben redundar en un mayor beneficio de los miembros menos aventajados de la sociedad (principio de diferencia)⁵⁶. Estos principios siguen un orden de preferencia, de tal modo que el primer principio, el principio de libertad, precede al segundo y, a su vez, la igualdad equitativa de oportunidades precede al principio de diferencia. Este orden de prioridad significa que, al aplicar un principio asumimos que

⁵² Aristóteles, *Ética a Nicómaco*, Alianza editorial, 2012, Madrid, p. 124.

⁵³ Ídem, p. 129.

⁵⁴ Ídem, p. 128.

⁵⁵ En la democracia ateniense del siglo V a. C. algunos cargos públicos se repartían por sorteo. Entre ellos se encontraban la gran mayoría de las magistraturas, la selección de los arcontes y la designación de los miembros del Consejo. No obstante, era habitual que estos puestos públicos se sortearan entre las personas que previamente se habían postulado para ello. Hansen, M. H. (2022), *La democracia ateniense en la época de Demóstenes*, Capitán Swing, Madrid, (primera edición en inglés: 1991), p. 369-370.

⁵⁶ Rawls, J. *Teoría de la justicia*, Harvard University Press, Cambridge 1971, p. 67



los principios previos están satisfechos⁵⁷. Rawls sintetiza su teoría de la justicia afirmando que la justicia distributiva no consiste en una igualdad absoluta, sino en una determinada estructura de las instituciones públicas que promueva y garantice las mismas oportunidades para todos y que la diferencia sirva para mejorar la situación de los más desfavorecidos. La idea de justicia distributiva de Rawls, por tanto, tiene un anclaje claro en una comunidad política bien organizada, con instituciones y procedimientos justos. Es decir, no se trata de una idea de justicia formal o abstracta, sino que tiene una clara dimensión material conectada directamente con la realidad social y política.

Si aplicamos la propuesta teórica de Rawls a nuestro objeto de estudio, concluiremos que la justicia ambiental no se debe reducir a la protección abstracta del medio ambiente, sino que debe introducir una dimensión material de distribución, esto es, debe incluir en sus criterios de medición cómo se reparten los impactos ecológicos entre las comunidades humanas —dimensión espacial— y entre generaciones —dimensión temporal—. Esta “contabilidad de impacto ambiental” facilitaría la identificación de desigualdades estructurales y situaciones de vulnerabilidad. Aquí defendemos que este enfoque ecológico resulta esencial en la sociedad digital, pues el consumo de recursos energéticos, de agua y de materiales críticos, por parte de la IA en general y de los algoritmos en particular, no se distribuye de manera equitativa, sino que afecta en mayor medida a las regiones más desfavorecidas. Desde esta perspectiva, los algoritmos verdes no son únicamente una cuestión de eficiencia técnica o de innovación sostenible, sino un problema de justicia social y política.

1. Justicia ambiental y algoritmia verde. La justicia ambiental como justicia distributiva.

Ya se ha advertido que el marco dominante del fairness en la IA en general y en la algoritmia en particular se concentra en la no discriminación —o respeto a la dignidad humana—, y, por consiguiente, en una perspectiva fundamentalmente antropocéntrica, que elude las externalidades ambientales en los procesos digitales. Aquí sostendemos que esta laguna normativa —actualmente injustificable— exige una ampliación conceptual hacia la justicia ambiental. De hecho, sería la mejor forma de integrar los cuatro principios básicos de la bioética: autonomía, beneficencia no maleficencia y justicia⁵⁸. El concepto actual de fairness abarca los tres primeros principios: el principio de respeto a la persona como agente moral; el principio tradicional *primun no nocere*; y el principio de

⁵⁷ Rawls, J., *La justicia como equidad*, Paidós, Barcelona, 2002, p. 73.

⁵⁸ Aquí adoptamos la clasificación de los cuatro principios básicos que describieron Beauchamp y Childress en su obra titulada *Principios de Ética biomédica* (Oxford University Press, New York City) y que fue publicada en 1979, coincidiendo con la publicación del Informe Belmont. El Informe no habla de cuatro principios bioéticos básicos sino de tres al entender que el principio de no maleficencia (el *primun no nocere* del Juramento Hipocrático) está incluido en el principio de beneficencia. <https://www.hhs.gov/sites/default/files/informe-belmont-spanish.pdf>

beneficencia. Sin embargo, hasta ahora la sociedad digital no ha mirado hacia el último principio que es precisamente la búsqueda de la justicia distributiva de los costes que conlleva, en nuestro caso, el desarrollo tecnológico actual. Nuestra propuesta es que el concepto de *fairness* debe entenderse de manera más amplia. Ello supone integrar un tratamiento respetuoso de la persona, la búsqueda del beneficio evitando el daño (reducción de contaminación y de consumo de recursos naturales) y, finalmente, el reparto equitativo de los costes ambientales entre sujetos y comunidades humanas. Para satisfacer estas exigencias, proponemos extender el análisis hacia los impactos ecológicos y su distribución en el espacio (entre comunidades) y en el tiempo (entre generaciones), basándonos en una lectura SETS: un análisis socio-ecológico-tecnológico que permite comprender mejor los impactos distributivos de la digitalización.

La justicia ambiental algorítmica implica reconocer que los sistemas de IA, aunque cumplan métricas de equidad social, generan externalidades ecológicas que deben integrarse en la evaluación ética y jurídica. En este mismo sentido, ya se han publicado estudios que avalan esta propuesta, como es el caso de Hajiesmaili et al.⁵⁹ que proponen una IA ambientalmente equitativa que incorpore criterios y procesos de redistribución de cargas —por ejemplo, mediante un equilibrio geográfico del consumo energético— para evitar que determinadas regiones o poblaciones soporten de manera desproporcionada los costes ambientales, lo que aquí se ha denominado distribución espacial de las cargas y los beneficios.

Finalmente, la tesis que mejor avala nuestra propuesta es la de Rakova y Dobbe, quienes conciben a los algoritmos y a los sistemas de IA como “ontológicamente no distinguibles de los sistemas sociales y ecológicos”, lo que quiere decir que no existe una diferencia sustancial entre la dimensión técnica de la algoritmia y sus efectos climáticos⁶⁰. Esto es, los algoritmos no existen en un vacío puramente técnico o en una dimensión estrictamente matemática, sino que su realidad es inseparable de su infraestructura material, de las relaciones sociales que los producen y de los efectos ecológicos que generan. Por tanto, la tesis de Rakoba y Dobbe se basa en el enfoque SETS, lo que quiere decir que concibe la algoritmia y los sistemas de IA como un intrincado social-ecológico-tecnológico. A partir de esta concepción, los autores entienden que las auditorías algorítmicas tradicionales son insuficientes porque, como ya hemos advertido, suelen centrarse en los sesgos, la discriminación y la explicabilidad de las decisiones automatizadas. En su lugar, proponen que las auditorías deben ampliar su alcance e incorporar también los impactos sociales y, sobre todo, ambientales de los algoritmos y los sistemas de IA⁶¹.

Todas estas propuestas dialogan directamente con la concepción rawlsiana de justicia distributiva, en la medida en que buscan corregir desigualdades estructurales, atender a los más vulnerables y garantizar instituciones justas en la gobernanza digital. No obstante, amplían el marco rawlsiano al integrar la justicia ambiental en la justicia social, entendida

⁵⁹ <https://arxiv.org/pdf/2412.16539.pdf>. P. 4/6 y 5/6.

⁶⁰ <https://arxiv.org/pdf/2305.05733.pdf>. P. 2/19 y 3/19.

⁶¹ Ídem, p. 9/19 y 13/19

esta como justicia distributiva de costes y beneficios entre regiones y generaciones. Situar la justicia ambiental como justicia distributiva en el corazón de la gobernanza algorítmica significa reconocer que los algoritmos verdes no solo deben ser más eficientes, sino también más justos en la manera en que reparten sus costes y beneficios. Este planteamiento abre el camino hacia un nuevo modelo de gobernanza ecológica digital, que analizaremos en el siguiente epígrafe.

2. Hacia el Estado social y democrático de Derecho digital y ecosostenible.

La noción de Estado social, democrático y digital de Derecho, formulada por Miguel Ángel Presno Linera⁶², ofrece un marco constitucional idóneo para abordar los desafíos que plantean la IA y la algoritmia en la sociedad contemporánea. Este modelo parte de la constatación de que las transformaciones digitales modifican la titularidad y el ejercicio de los derechos fundamentales, exigiendo un Estado capaz de garantizar su efectividad en la sociedad digital. Si bien Presno Linera no aborda específicamente la dimensión ambiental, su propuesta constituye un fundamento teórico fértil para pensar un Estado que, además de digital, sea ecológicamente sostenible y responsable.

En este sentido, construir un Estado digital y ecosostenible implica ampliar el alcance de sus funciones clásicas —por ejemplo, proteger a las personas frente a posibles discriminaciones (sesgos) o vulneraciones de sus derechos fundamentales en la esfera digital—, sino también velar por la justicia ambiental en el desarrollo tecnológico. Esto supone reconocer que la inteligencia artificial y los sistemas algorítmicos no son neutros desde el punto de vista ecológico, sino que generan impactos distributivos en el consumo de energía, agua y minerales que deben ser tenidos en cuenta en clave de justicia social, intergeneracional, territorial e, incluso, interespecífica.

Este horizonte normativo exige, por tanto, una gobernanza ecológica digital que integre criterios de distribución justa de cargas y beneficios ambientales, participación ciudadana y reconocimiento de las comunidades afectadas, en consonancia con las exigencias del Convenio de Aarhus. Dicho Convenio, firmado en la década de los 90, ya establecía con claridad que “...los ciudadanos deben tener acceso a la información, estar facultados para participar en la toma de decisiones y tener acceso a la justicia en materia medioambiental”⁶³. Además, subraya el Convenio que en el ámbito medioambiental el hecho de que la ciudadanía acceda a la información y participe en la toma de decisiones públicas, puede ayudar a que se genere una mayor conciencia ambiental y, por consiguiente, un mayor compromiso ecológico. Esta relación entre información y conciencia crítica es claramente visible en el caso del uso —y abuso— de la IA y sus

⁶² Presno Linera, M. A. (2022), cit., p. 83.

⁶³ Convenio sobre el acceso a la información, la participación del público en la toma de decisiones y el acceso a la justicia en materia de medio ambiente. Firmado en Aarhus (Dinamarca) el 25 de junio de 1998. https://www.oas.org/es/sla/ddi/docs/acceso_informacion_desarrollos_convenio_aarhus.pdf

algoritmos, pues, actualmente la mayoría de la población usuaria de IA generativa — como el Chat GPT — desconoce las cifras reales del impacto ambiental que tiene cada una de sus interacciones en con IA. De hecho, aún no se ha abierto el debate público al respecto, sobre todo en relación con el alto consumo de energía eléctrica y de agua que tiene la IA.

En definitiva, un Estado social y democrático de Derecho digital y ecosostenible no se limita a asegurar derechos fundamentales en la era de la IA, sino que integra la dimensión ecológica como criterio de justicia. Una justicia que, en todo caso, se entenderá como una justicia intergeneracional, interterritorial e, incluso, interespecífica. La justicia distributiva, en el contexto del Estado social y democrático de Derecho, digital y ecosostenible, se despliega en dos dimensiones: la espacial y la temporal. Espacial, pues tiene en cuenta los territorios más afectados por el desarrollo de la IA —sobre todo aquellos países que ponen los recursos mineros—; y la temporal, pues pretende proteger a las generaciones venideras para que puedan disfrutar de un medio ambiente sano.

Se trata, por tanto, de superar el modelo de Estado pasivo en materia medioambiental, para alcanzar un modelo de Estado activo, que promueva políticas públicas encaminadas a la integración de los dos grandes retos del siglo XXI: la transición ecológica y la digital. Un modelo de Estado social y democrático de Derecho que, además de garantizar derechos y libertades, disponga de instituciones que hagan efectiva la justicia ambiental como parte esencial de la justicia social.

Algunos avances en este sentido se han hecho ya, tanto en la UE como en España. De hecho, el Pacto Verde y la Estrategia Digital Europea constituyen una manifestación clara de la necesidad de integrar lo digital con lo verde. En España, por su parte, cabe destacar la creación en 2022 de la Agencia Española de Supervisión de la Inteligencia Artificial (AESIA) ya citada, cuya finalidad es garantizar un desarrollo y uso responsable de la IA, incorporando parámetros de seguridad, transparencia y respeto a derechos fundamentales. Si bien actualmente no prevé “auditorías de impacto ambiental”, no es descabellado pensar que lo haga en los próximos años por las razones ya expuestas a lo largo de este artículo.

También en el ámbito educativo se ha avanzado en este cambio necesario, por ejemplo, con la Estrategia Española de Educación para el Desarrollo Sostenible 2030, que busca fomentar en la ciudadanía —especialmente la más joven que, además, es la que más interactúa con la IA— un compromiso con la sostenibilidad, también en relación con el uso de las tecnologías digitales.

En suma, lo que se está intentando desarrollar desde Europa en general y desde España en particular es la configuración de un entramado institucional capaz de auditar el diseño tecnológico desde parámetros de sostenibilidad, sancionar las prácticas que afecten negativamente al medio ambiente, y promover una ciudadanía crítica y comprometida mediante la educación. Ahora bien, este modelo de Estado digital y ecosostenible difícilmente podrá globalizarse en el corto plazo. No todas las comunidades políticas comparten los mismos valores de respeto a los derechos humanos, la democracia, la

protección ambiental y el control público de la tecnología. Por ello, es razonable pensar que, al menos a corto plazo, este modelo solo encontrará encaje en el contexto de la Unión Europea, es decir, en sus Estados miembros y, como mucho, en los países integrados en el Consejo de Europa.

V. Algunas conclusiones.

La sociedad contemporánea se mueve entre dos pulsiones que, si no se armonizan, pueden orientar el futuro de la humanidad en direcciones contrapuestas. Por un lado, la pulsión de conocimiento e innovación que representa la técnica, motor constitutivo de la naturaleza humana como señaló Ortega y Gasset; y, por otro, la pulsión de conservación ligada a nuestra condición animal, hoy desafiada por las crisis climática y ambiental derivadas de una explotación intensiva de los recursos naturales. El reto político y jurídico con el que nos encontramos en la actualidad es integrar ambas pulsiones en un modelo de gestión que oriente el progreso tecnológico sin comprometer la sostenibilidad del planeta.

En este contexto, la aceleración del desarrollo tecnológico y, de manera particular, la expansión de los sistemas de IA y de algoritmia, ha dado lugar al consumo desmesurado de recursos energéticos, hídricos y de materiales críticos. Este avance, que responde a la pulsión humana que hemos denominado “de conocimiento”, tiene como contrapartida, un potencial choque con la otra pulsión humana que hemos denominado “de conservación”. Así la técnica, llamada a facilitar el desarrollo de las capacidades humanas, corre el riesgo de convertirse en una seria amenaza del equilibrio ambiental, tanto para las generaciones presentes como para las futuras.

Una posible solución para salvar esta incoherencia es el entendimiento de los algoritmos verdes, no solo como herramientas técnicas destinadas a optimizar procesos y reducir el consumo de recursos naturales, sino como instrumentos de justicia con una doble dimensión. Una dimensión formal, que está ligada a su diseño eficiente y cuya finalidad es minimizar la huella ecológica de la computación; y una dimensión sustancial o ética, que convierte a los algoritmos verdes en criterio de justicia distributiva y, por consiguiente, a la justicia ambiental en condición de posibilidad de la justicia social. Este enfoque exige, además, una transformación cultural, especialmente en el ámbito empresarial, para evitar que la sostenibilidad se reduzca a un mero discurso estético de *greenwashing* digital.

El análisis realizado a lo largo de este artículo muestra que la normativa europea en materia digital —Reglamento de IA, DSA y RGPD— ha avanzado en transparencia, trazabilidad y rendición de cuentas, pero desde una ética antropocéntrica centrada en los derechos fundamentales, la democracia y la seguridad. Esta orientación deja fuera la auditoría ambiental, lo que genera una paradoja: Europa impulsa al mismo tiempo una transición tecnológica y una transición verde, pero sin articularlas de manera coherente.

De ahí que propongamos incorporar un principio de sostenibilidad ambiental en la regulación algorítmica, definido como la obligación de diseñar y desarrollar sistemas de IA que reduzcan de forma significativa su huella ecológica. Este principio debería integrarse como criterio de evaluación de riesgos en el Reglamento europeo de IA, complementando —no sustituyendo— los principios ya vigentes de equidad, transparencia y responsabilidad. Solo así se podrá visibilizar la dimensión material y distributiva de los impactos digitales.

Del mismo modo, proponemos la ampliación del concepto de *fairness* hacia la sostenibilidad ambiental. Hasta ahora, el *fairness* se ha limitado a prevenir discriminaciones entre individuos, pero una justicia ambiental obliga a examinar quién soporta los costes ecológicos del desarrollo tecnológico, tanto en un sentido espacial como temporal, es decir, cómo se reparten las cargas y beneficios entre comunidades, generaciones y especies. Este enfoque distributivo requiere una auténtica contabilidad ambiental de la digitalización y abre la vía hacia un nuevo paradigma de gobernanza ecológica y digital.

En conclusión, los algoritmos verdes no son únicamente una cuestión de eficiencia técnica, sino un problema de justicia social y política. Integrar la sostenibilidad en el corazón de la gobernanza digital es condición indispensable para un Estado que, además de democrático y de Derecho, sea digital y ecosostenible. Europa y España han comenzado a construir un marco normativo e institucional capaz de auditar la tecnología desde parámetros ecológicos, así como de promover una ciudadanía crítica. Aunque su alcance inmediato se limite al espacio europeo, este modelo señala el horizonte normativo y cultural hacia el que debería orientarse toda sociedad digital que aspire a ser justa y sostenible.

VI. Bibliografía.

- Aristóteles, *Ética a Nicómaco*, (2012), Alianza editorial, Madrid.
- Beauchamp, T. y Childress, J., (1979), *Principios de Ética biomédica* (Oxford University Press, New York City).
- Coeckelbergh, M., (2021), *Ética de la Inteligencia Artificial*, Cátedra, Madrid.
- Cotino Hueso, L., “Transparencia y explicabilidad de la Inteligencia Artificial y compañía (comunicación, interpretabilidad, inteligibilidad, auditabilidad, testabilidad, comprobabilidad y simulabilidad...) Para qué, para quién y cuánta”. En Cotino Hueso, L. y Castellanos Claramunt, J., (Ed.) (2022), *Transparencia y explicabilidad de la Inteligencia Artificial*, Tirant lo Blanch, Valencia, p. 25-70.
- Diéguez, A., (2024), *Pensar la tecnología. Una guía para comprender filosóficamente el desarrollo de la tecnología actual*, Shackleton Books, España.
- Etxebarría, J. y Almendros, L. (2023), *Tecnopersonas. Cómo las tecnologías nos transforman*. 2^a edición, Gijón, Trea Ensayo.



Floridi, L., et. al., (2018), *AI4People's Ethical Framework for a Good AI Society: Opportunities, Risks, Principles and Recommendations*, https://www.eismd.eu/wp-content/uploads/2019/11/AI4People%20%99s-Ethical-Framework-for-a-Good-AI-Society_compressed.pdf

Floridi, L. & Cowls, J, (2019), “A Unified Framework of Five Principles for AI in Society”, *Harvard Data Science Review*.
<https://hdsr.mitpress.mit.edu/pub/l0jsh9d1/release/8>

Gupta, U. et al. (2020), “Chasing Carbon: The Elusive Environmental Footprint of Computing”, 28 Oct, [arXiv:2011.02839](https://arxiv.org/abs/2011.02839)

Hansen, M. H. (2022), *La democracia ateniense en la época de Demóstenes*, Capitán Swing, Madrid, (primera edición en inglés: 1991).

Hajiesmaili, M, Ren, S., Sitaramen, R. K., Wierman, A. (2024), “Towards Environmentally Equitable AI”, 21 Dec., <https://arxiv.org/pdf/2412.16539>

Istrate, R. et. Al. (2024), “The environmental sustainability of digital content consumption”, *Nature Communications*. <https://www.nature.com/articles/s41467-024-47621-w>

Lacoste, A., Luccioni, A., Schmidt, V. y Dandres, T., (2019), “Quantifying the carbon emissions of machine learning”, 4 Nov. <https://arxiv.org/abs/1910.09700>

Lanneloungue, L., Grealey, J. and Inouye, M. (2021), “Green Algorithms: Quantifying the carbon footprint of computation”.

<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/advs.202100707>

Mitchell, S., Potash, E., Barocas, S., D'Amour, A. & Lum, C., (2020), “Prediction-Based Decision and Fairness: A Catalogue of Choices, Assumptions and Definitions”, April. <https://arxiv.org/pdf/1811.07867>

Moffatt, I., (2000), “Ecological footprints and sustainable development”, *Ecological Economics* 32, Elsevier.
<https://staff.washington.edu/jhannah/geog270aut07/readings/population/Moffatt%20-20Ecolog%20Footprint%20and%20Sustain%20Dev.pdf>

Ortega y Gasset, J., (1965), *Meditaciones de la técnica*, Austral, Madrid, 1965.

Pasquale, F. (2015), *Black Box Society*, Harvard University Press, Cambridge, p. 10/320 (versión online en abierto: https://tetrazolelover.at.ua/Frank_Pasquale-The_Black_Box_Society-The_Secret_Ai.pdf)

Presno Linera, M. A. (2022), *Derechos fundamentales e inteligencia artificial*, Marcial Pons, Madrid.

Rawls, J., (1971), *Teoría de la justicia*, Harvard University Press, Cambridge.

Rawls, J., (2002), *La justicia como equidad*, Paidós, Barcelona.

Redclift, M. (2005), “Sustainable Development (1987-2005). An Oxymoron Comes of Age”, *Sustainable Development* 13. <https://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucessjb/S3%20Reading/redclift%202005.pdf>

Ren, S. et. al. (2025), “Making IA Less *Thirsty*: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models”, 26 Mar, [arXiv:2304.03271](https://arxiv.org/abs/2304.03271)

Riechmann, J. (2003), “Tres principios básicos de justicia ambiental”, *Revista Internacional de Filosofía Política*, 21, p. 103-120. <https://oai.e-spacio.uned.es/server/api/core/bitstreams/0d376386-edc6-47df-9398-a00133a565b1/content>

Vélez, C., (2019), “Three things digital ethics can learn from medical ethics”, *Nature Electronics*, 15 August 2019, <https://philpapers.org/archive/VLITTD.pdf>

Vieira De Feitas Neto, S. V., Falcao Sobral, M. F., Becerra Riveiro, A. R., Da luz Soares, G. R. (2020), “Concepts and Forms of greenwashing: a systematic review, Environmental Science Europe”, *Environmental Science Europe*, 32:19. <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-020-0300-3>

Yanofsky, Noson, S. (2024), “Towards a Definition of an Algorithm”, *Journal of Logic and Computation*, 21(2), <https://arxiv.org/pdf/math/0602053.pdf> https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF