ISSN 1981-4313 impreso
ISSN 2357-8432 en línea

Revista Científica
Colección en Investigación EF

DIÁLOGOS ENTRE CUERPO, MOVIMIENTO, SALUD, EDUCACIÓN Y SOCIEDAD

Acceso abierto • CC BY 4.0

rcpef.org

EL FIN DE LAS CERTIDUMBRES: LA PARADOJA DEL TIEMPO Y LA CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA RACIONALIDAD CIENTÍFICA EN ILYA PRIGOGINE

O FIM DAS CERTEZAS: O PARADOXO DO TEMPO E A CONSTRUÇÃO DE UMA NOVA RACIONALIDADE CIENTÍFICA EM ILYA PRIGOGINE

THE END OF CERTAINTY: THE TIME PARADOX AND THE CONSTRUCTION OF A NEW SCIENTIFIC RATIONALITY IN ILYA PRIGOGINE

Márcio Magera Conceição[1]

e25021753
https://doi.org/10.47820/cpef.8e0yz594

RESUMEN
Este ensayo teórico examina la propuesta epistemológica de Ilya Prigogine en *El fin de las certidumbres: tiempo, caos y las leyes de la naturaleza* (1996), con el objetivo de reconstituir el argumento mediante el cual el autor desplaza las leyes de la naturaleza del registro de la certeza al de la posibilidad. Se trata de una investigación teórico-bibliográfica, de enfoque cualitativo y carácter hermenéutico-interpretativo, que toma la obra como fuente primaria y la examina en diálogo con la literatura de la filosofía de la ciencia y de la termodinámica de no-equilibrio. El recorrido analítico se organiza en ocho movimientos: la formulación del dilema de Epicuro y la genealogía histórica del ideal de certeza; la paradoja del tiempo y la lectura antropocéntrica de la irreversibilidad heredada de la derrota de Boltzmann; el papel constructivo de los procesos irreversibles, evidenciado por las estructuras disipativas y las bifurcaciones; la ruptura de la equivalencia entre la descripción individual y la estadística en los sistemas dinámicos inestables; la extensión de la dinámica clásica y cuántica a partir de las resonancias de Poincaré; el despliegue cosmológico de la tesis de que el tiempo precede a la existencia; las implicaciones éticas y epistemológicas de la ciencia concebida como diálogo con la naturaleza; y, por último, la transposición del argumento al examen de la inteligencia artificial como bifurcación de la sociedad del siglo XXI. Se argumenta que la contribución decisiva de Prigogine no reside en añadir una cláusula de incertidumbre a un edificio determinista preservado, sino en inscribir la inestabilidad en la estructura misma de las leyes fundamentales, de modo que la flecha del tiempo deje de ser apariencia subjetiva y se convierta en propiedad de la naturaleza. Se concluye que el programa prigoginiano ofrece a la ciencia contemporánea una tercera vía — el "camino estrecho" entre el determinismo y el azar puro — cuya fecundidad excede la física y alcanza el modo en que las ciencias, incluidas las humanas y sociales, conciben la previsión, la explicación y la responsabilidad — y, de modo particularmente agudo, el modo en que la sociedad del siglo XXI se posiciona ante la inteligencia artificial.

PALABRAS CLAVE: Ilya Prigogine. Paradoja del tiempo. Irreversibilidad. Estructuras disipativas. Inteligencia artificial. Epistemología de la complejidad.

RESUMO
Este ensaio teórico examina a proposta epistemológica de Ilya Prigogine em *O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza* (1996), com o objetivo de reconstituir o argumento pelo qual o autor desloca as leis da natureza do registro da certeza para o registro da possibilidade. Trata-se de pesquisa de natureza teórico-bibliográfica, de abordagem qualitativa e caráter hermenêutico-interpretativo, que toma a obra como fonte primária e a examina em diálogo com a literatura da filosofia da ciência e da termodinâmica de não-equilíbrio. O percurso analítico organiza-se em oito movimentos: a formulação do dilema de Epicuro e a genealogia histórica do ideal de certeza; o paradoxo do tempo e a leitura antropocêntrica da irreversibilidade herdada da derrota de Boltzmann; o papel construtivo dos processos irreversíveis, evidenciado pelas

Doctor por la PUC-São Paulo. Doctor en Sociología por la PUC-São Paulo. Doctor en Administración por la FCU, EE. UU. Estudios posdoctorales en la Unicamp, Campinas; FCU, EE. UU.; y la Universidad de Coimbra, Portugal. Periodista y escritor. Evaluador del MEC/INEP. Prorrector de la Universidad de Guarulhos, São Paulo, Brasil.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

estruturas dissipativas e pelas bifurcações; a ruptura da equivalência entre a descrição individual e a descrição estatística nos sistemas dinâmicos instáveis; a extensão da dinâmica clássica e quântica a partir das ressonâncias de Poincaré; o desdobramento cosmológico da tese de que o tempo precede a existência; as implicações éticas e epistemológicas da ciência concebida como diálogo com a natureza; e, por fim, a transposição do argumento para o exame da inteligência artificial como bifurcação da sociedade do século XXI. Argumenta-se que a contribuição decisiva de Prigogine não reside em acrescentar uma cláusula de incerteza a um edifício determinista preservado, mas em inscrever a instabilidade na estrutura mesma das leis fundamentais, de modo que a flecha do tempo deixe de ser aparência subjetiva e se torne propriedade da natureza. Conclui-se que o programa prigoginiano oferece à comunidade científica contemporânea uma terceira via — o "caminho estreito" entre o determinismo e o acaso puro — cuja fecundidade excede a física e alcança o modo como as ciências, inclusive as humanas e sociais, concebem previsão, explicação e responsabilidade — e, de modo particularmente agudo, o modo como a sociedade do século XXI se posiciona diante da inteligência artificial.

PALAVRAS-CHAVE: Ilya Prigogine. Paradoxo do tempo. Irreversibilidade. Estruturas dissipativas. Inteligência artificial. Epistemologia da complexidade.

ABSTRACT
This theoretical essay examines Ilya Prigogine's epistemological proposal in *The End of Certainty: Time, Chaos and the New Laws of Nature* (1996), aiming to reconstruct the argument by which the author shifts the laws of nature from the register of certainty to that of possibility. This is a theoretical-bibliographical study, qualitative in approach and hermeneutic-interpretative in character, taking the book as a primary source and examining it in dialogue with the literature of philosophy of science and non-equilibrium thermodynamics. The analysis unfolds in eight movements: the formulation of Epicurus' dilemma and the historical genealogy of the ideal of certainty; the time paradox and the anthropocentric reading of irreversibility inherited from Boltzmann's defeat; the constructive role of irreversible processes, evidenced by dissipative structures and bifurcations; the breakdown of the equivalence between individual and statistical description in unstable dynamical systems; the extension of classical and quantum dynamics based on Poincaré resonances; the cosmological unfolding of the thesis that time precedes existence; the ethical and epistemological implications of science conceived as a dialogue with nature; and finally the transposition of the argument to the examination of artificial intelligence as a bifurcation of twenty-first-century society. It is argued that Prigogine's decisive contribution lies not in adding a clause of uncertainty to a preserved deterministic edifice, but in inscribing instability within the very structure of fundamental laws, so that the arrow of time ceases to be a subjective appearance and becomes a property of nature. It is concluded that the Prigoginian programme offers contemporary science a third way — the "narrow path" between determinism and pure chance — whose fruitfulness exceeds physics and reaches the way in which the sciences, including the human and social sciences, conceive prediction, explanation and responsibility — and, most acutely, the way twenty-first-century society positions itself in relation to artificial intelligence.

KEYWORDS: Ilya Prigogine. Time paradox. Irreversibility. Dissipative structures. Artificial intelligence. Epistemology of complexity.

1 INTRODUCCIÓN

Pocas obras de divulgación científica de finales del siglo XX formularon con tanta economía una pretensión tan amplia como *El fin de las certidumbres: tiempo, caos y las leyes de la naturaleza*, publicado por Ilya Prigogine en 1996 en colaboración con Isabelle Stengers. El título anuncia un cierre; el subtítulo, un programa. Lo que se cierra es la identificación, tres veces secular, entre conocimiento científico y certeza — la convicción de que una ley de la naturaleza solo merece ese nombre cuando permite deducir, a partir de condiciones iniciales

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

suficientemente precisas, la totalidad del futuro y del pasado de un sistema. Lo que se propone en su lugar no es el abandono de la legalidad, ni tampoco la rendición al azar, sino una reformulación de las leyes fundamentales de la física en términos de posibilidades. La tesis, enunciada ya en el prólogo, es de una claridad desarmante: “tanto en la dinámica clásica como en la física cuántica, las leyes fundamentales expresan ahora posibilidades y ya no certezas” (PRIGOGINE, 1996, p. 13).

El interés de esta formulación para el debate epistemológico contemporáneo deriva menos de su audacia retórica que del lugar desde el cual se enuncia. Prigogine no habla como filósofo que interpela a la física desde fuera, ni como crítico externo del racionalismo científico. Habla como fisicoquímico laureado con el Premio Nobel de Química de 1977 justamente por los trabajos sobre termodinámica de no-equilibrio y estructuras disipativas, y lo que presenta al lector es la extensión técnica de un formalismo — la dinámica clásica y la mecánica cuántica reformuladas en el nivel estadístico — cuyas consecuencias filosóficas extrae a continuación. Esa es la diferencia que separa su argumento de las declaraciones más generales sobre incertidumbre y complejidad que proliferaron en las últimas décadas: aquí, la inestabilidad no es una metáfora importada, sino una propiedad matemática de clases bien definidas de sistemas dinámicos, y es de esa propiedad de donde se derivan las tesis sobre el tiempo, sobre la naturaleza y sobre el lugar del ser humano en ella.

El problema que organiza la obra es aquello que el autor denomina la paradoja del tiempo. Puede enunciarse en una frase: ¿cómo puede la flecha del tiempo, omnipresente en la química, en la geología, en la biología, en la cosmología y en las ciencias humanas, emerger de un mundo que la física describe mediante leyes invariantes bajo la inversión temporal? La respuesta tradicional — la que se consolidó tras el fracaso del programa de Ludwig Boltzmann — atribuye la asimetría al observador: seríamos nosotros, con nuestra descripción necesariamente aproximada, los responsables de la diferencia entre pasado y futuro. Prigogine rechaza íntegramente esa salida. Para él, “no somos nosotros quienes generamos la flecha del tiempo. Muy por el contrario, somos sus hijos” (PRIGOGINE, 1996, p. 12).

Este ensayo tiene por objetivo general reconstituir y discutir críticamente el argumento mediante el cual Prigogine desplaza las leyes de la naturaleza del registro de la certeza al registro de la posibilidad, examinando las condiciones técnicas que establece para ese desplazamiento y las consecuencias epistemológicas y éticas que de él extrae. Como objetivos específicos, se pretende: (i) situar históricamente el ideal de certeza que la obra cuestiona, a partir del dilema de Epicuro y de su consolidación en la mecánica newtoniana; (ii) examinar la crítica prigoginiana a la interpretación antropocéntrica de la irreversibilidad; (iii) explicitar el papel constructivo de los procesos irreversibles en los sistemas alejados del equilibrio; (iv) analizar la ruptura de la equivalencia entre descripción individual y descripción estadística, que constituye el núcleo técnico de la propuesta; (v) presentar la extensión de la dinámica clásica y cuántica fundada en las resonancias de Poincaré; y (vi) discutir el despliegue cosmológico y las implicaciones éticas de la nueva racionalidad propuesta.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

Desde el punto de vista metodológico, se trata de una investigación teórico-bibliográfica, de enfoque cualitativo y carácter hermenéutico-interpretativo. La obra de Prigogine se toma como fuente primaria y se somete a una lectura analítica integral, con identificación de las tesis centrales de cada capítulo, mapeo de los conceptos operatorios y registro de los pasajes en que el autor explicita sus compromisos epistemológicos. En un segundo momento, el argumento reconstituido se confronta con la literatura secundaria pertinente — sobre todo los trabajos del propio autor en coautoría con Isabelle Stengers (PRIGOGINE; STENGERS, 1990, 1997) y Grégoire Nicolis (NICOLIS; PRIGOGINE, 1977, 1989), además de la reflexión epistemológica desarrollada por Stengers (2002) sobre la invención de las ciencias modernas, y la producción de la filosofía de la ciencia sobre determinismo, indeterminismo y complejidad. No se trata, por tanto, de una revisión sistemática ni de un estudio de recepción, sino del examen interno de un argumento, con atención a su consistencia y al alcance de sus pretensiones. Las citas directas siguen la traducción brasileña de Roberto Leal Ferreira, publicada por la Editora da Universidade Estadual Paulista en 1996.

La justificación del estudio reposa en una constatación: la expresión "fin de las certidumbres" se incorporó al vocabulario corriente de las ciencias humanas y sociales brasileñas con una facilidad que no siempre estuvo acompañada del examen del argumento que la sustenta. Invocada para autorizar desde la crítica al positivismo hasta la defensa de metodologías participativas, la fórmula pierde con frecuencia el vínculo con la demostración técnica que le da sustancia. Recuperar ese vínculo es, aquí, condición para evaluar tanto la fecundidad como los límites de la transposición del argumento prigoginiano más allá del campo en que fue originalmente formulado.

2 EL DILEMA DE EPICURO Y LA GENEALOGÍA DEL IDEAL DE CERTEZA

Prigogine abre el desarrollo de su obra con un gesto de historiador de las ideas: retrocede hasta la Antigüedad para mostrar que el problema que enfrenta no es un accidente de la física moderna, sino una tensión constitutiva del pensamiento occidental. "Fue Epicuro el primero en establecer los términos del dilema al que la física moderna confirió el peso de su autoridad" (PRIGOGINE, 1996, p. 17). El dilema epicúreo nace de una dificultad interna al atomismo heredado de Demócrito. Si los átomos caen en el vacío en trayectorias paralelas y con la misma velocidad, ¿cómo podrían encontrarse? Y si no se encuentran, ¿cómo explicar la formación de los cuerpos, la diversidad del mundo, la novedad? La solución propuesta — el *clinamen*, desvío mínimo e imprevisible que perturba la caída paralela — permaneció en la historia del pensamiento, observa Prigogine, "como el ejemplo mismo de una hipótesis arbitraria, que salva un sistema mediante la introducción de un elemento *ad hoc*" (PRIGOGINE, 1996, p. 18).

Lo que importa retener, sin embargo, no es el expediente, sino aquello que él pretendía preservar. Para Epicuro, el problema de la inteligibilidad de la naturaleza y el del destino humano eran inseparables: un mundo enteramente determinado sería un mundo en el que la libertad humana no tendría dónde inscribirse. El célebre pasaje de la carta a Meneceo, citado por Prigogine, expresa la dimensión existencial de la cuestión: "En cuanto al destino, que algunos consideran el señor de todo, el sabio se ríe de él. En efecto, más vale aún aceptar el mito sobre

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

los dioses que someterse al destino de los físicos" (PRIGOGINE, 1996, p. 18). La física, ya allí, era percibida como una amenaza — no por sus resultados, sino por su forma.

La modernidad no disolvió el dilema; le confirió autoridad. La ley newtoniana de la gravitación reúne dos propiedades que, tomadas en conjunto, producen el determinismo en sentido fuerte: es determinista, en la medida en que unas condiciones iniciales dadas determinan unívocamente la evolución del sistema; y es invariante bajo la inversión del tiempo, esto es, permanece válida cuando se sustituye t por $-t$. De esas dos propiedades se deriva la figura que Laplace hizo célebre: una inteligencia que conociese la posición y la velocidad de todas las partículas del universo en un instante dado podría deducir toda la historia futura y toda la historia pasada. La mecánica cuántica, observa Prigogine, no alteró ese cuadro en lo esencial: la ecuación de Schrödinger es igualmente determinista e igualmente simétrica respecto del tiempo.

El punto que Prigogine subraya, y que interesa particularmente a la epistemología, es que esa concepción de ley no es neutra desde el punto de vista teológico y cultural. La sumisión de la naturaleza a leyes deterministas aproximaba el conocimiento humano a un punto de vista divino y atemporal — el Dios legislador del siglo XVII —, y la formulación de Leibniz en los *Nuevos ensayos*, citada en la obra, lo expresa sin rodeos: en la menor de las sustancias, unos ojos suficientemente penetrantes podrían leer de inmediato toda la secuencia de las cosas del universo. Prigogine añade, con apoyo en Joseph Needham, que la concepción de una naturaleza pasiva, sometida a leyes externas, es una especificidad de la tradición occidental, y no una evidencia universal del pensamiento.

Contra ese ideal, la obra convoca un linaje de resistencias. Kant, Hegel, Husserl, William James, Bergson, Whitehead y Heidegger son mencionados como pensadores que procuraron preservar la dimensión temporal de la existencia frente a una representación objetiva del mundo que la suprimía — sin conseguir, no obstante, conciliar inteligibilidad y libertad. La cita de Popper (1988), retomada por Prigogine, da la medida de lo que está en juego: "Considero el determinismo laplaciano — confirmado, como parece estarlo, por el determinismo de las teorías físicas y por el brillante éxito de estas — el obstáculo más sólido y más serio en el camino de una explicación y de una apología de la libertad, de la creatividad y de la responsabilidad humanas" (PRIGOGINE, 1996, p. 21). Y la de Bergson (2006), en la misma página, formula la objeción decisiva en una pregunta: ¿de qué sirve el tiempo, si todo está dado?

Es esencial notar la distancia que Prigogine establece entre su posición y otras dos que podrían parecerle próximas. La primera es el dualismo cartesiano, que resuelve el problema separando la *res cogitans* de la *res extensa* y dejando la naturaleza enteramente al determinismo. La segunda es el escepticismo posmoderno, que él asocia a Richard Rorty y a la "deconstrucción", y que convertiría los problemas de la tradición en temas de conversación civilizada, renunciando a la pretensión de verdad. Prigogine rechaza ambas: la primera, por dividir el mundo en dos mitades incomunicables; la segunda, por abdicar de la tarea que le parece propiamente científica. Su respuesta es de otro orden: "arraigar el indeterminismo y la asimetría del tiempo en las leyes de la física es la respuesta que podemos dar hoy al dilema de Epicuro" (PRIGOGINE, 1996, p. 23).

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

Esta formulación merece atención porque contiene la clave de todo el programa. No se trata de añadir a la física una cláusula de humildad epistémica, reconociendo que nuestro conocimiento es limitado; se trata de modificar las leyes, de modo que la indeterminación y la orientación del tiempo les pertenezcan a ellas y no a nosotros. Es la diferencia entre decir que no conseguimos prever y decir que no hay, en la naturaleza, aquello que sería preciso que hubiera para que la previsión completa fuese posible. Toda la dificultad técnica de la obra consiste en mostrar que la segunda afirmación puede sostenerse con el rigor de la primera.

En el capítulo final, Prigogine retoma esa genealogía en clave explícitamente histórica, apoyándose en Stephen Toulmin (1990). El ideal cartesiano de certeza es allí recontextualizado: Descartes buscaba, en un siglo XVII devastado por guerras de religión en las que se mataba en nombre de dogmas, un tipo de certeza que todos los seres humanos pudieran compartir con independencia de su fe — de ahí el *cogito* y la exigencia de fundar la ciencia en la matemática. Leibniz retomaría el programa buscando un lenguaje capaz de restablecer la paz entre los hombres. La búsqueda de certeza, por tanto, no fue solamente una elección epistemológica: fue una respuesta a una situación histórica trágica. Y Prigogine extiende el análisis a Einstein, para quien la ciencia representaba, en sus propias palabras, una huida del tumulto de la existencia hacia las “regiones tranquilas de las altas montañas”. La conclusión que extrae es sobria: “el científico no puede, como tampoco el hombre urbano, escapar de las ciudades contaminadas yendo a las altas montañas” (PRIGOGINE, 1996, p. 196). Las ciencias participan de la construcción de la sociedad del mañana, con todas sus contradicciones e incertidumbres.

3 LA PARADOJA DEL TIEMPO Y LA CRÍTICA A LA INTERPRETACIÓN ANTROPOCÉNTRICA DE LA IRREVERSIBILIDAD

El siglo XIX legó a la física una herencia doble e incompatible. De un lado, las leyes de Newton, que describen un universo estático, en el cual el pasado y el futuro desempeñan papeles simétricos. De otro, el segundo principio de la termodinámica, formulado por Rudolf Clausius en 1865 en la fórmula que Prigogine cita: “La energía del universo es constante. La entropía del universo crece en dirección a un máximo” (PRIGOGINE, 1996, p. 25). Aquí, por primera vez, una ley fundamental de la física distingue el futuro del pasado: los procesos irreversibles producen entropía, y esa producción tiene un signo.

Fue Ludwig Boltzmann quien intentó reconciliar ambas herencias, y su tentativa es presentada por Prigogine como el episodio decisivo de la historia que examina. El camino escogido fue el de Darwin: razonar sobre poblaciones, y no sobre individuos. El teorema H, de 1872, muestra que las colisiones entre moléculas hacen decrecer una cierta función *H* hasta un mínimo, que corresponde a la distribución de equilibrio de Maxwell-Boltzmann. Las colisiones aparecían, así, como el mecanismo microscópico de la irreversibilidad — y la flecha del tiempo ganaba fundamento dinámico.

Las objeciones no tardaron. La paradoja de Loschmidt observaba que, si las leyes de la dinámica son simétricas, la inversión de todas las velocidades debería producir la evolución contraria, lo que contradice el teorema. La paradoja de Zermelo invocaba el teorema de recurrencia de Poincaré: un sistema dinámico limitado retorna, tras tiempo suficiente,

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

arbitrariamente cerca de su estado inicial — luego, ningún proceso puede ser estrictamente unidireccional. Boltzmann acabó por ceder. Renunció al vínculo entre colisiones e irreversibilidad y reinterpretó el equilibrio como el estado macroscópico simplemente *más probable*; la irreversibilidad se convirtió en consecuencia del carácter aproximado de nuestra descripción. Prigogine es explícito en cuanto al costo de esa retirada: “Esa fue su tragedia: intentó realizar en la física lo que Darwin había conseguido en la biología — y fracasó” (PRIGOGINE, 1996, p. 26).

El punto que interesa al argumento de la obra no es histórico, sino sistemático: esa interpretación derrotada se convirtió en la ortodoxia, y es ella la que Prigogine se propone desmontar. En su formulación corriente — ejemplificada en la obra por la lectura de Murray Gell-Mann (1996) —, los macroestados agrupan microestados considerados equivalentes, y la entropía mide nuestra ignorancia acerca de cuál microestado se realiza efectivamente. La flecha del tiempo sería, por tanto, un efecto de nuestra descripción de grano grueso (*coarse grained*), no una propiedad del mundo.

Prigogine presenta contra esa lectura un conjunto articulado de objeciones. La primera es la del demonio de Maxwell: si la irreversibilidad se deriva de la imprecisión de nuestra descripción, entonces un observador capaz de discriminar los microestados vería un mundo perfectamente simétrico en el tiempo — lo que equivale a decir que la irreversibilidad desaparecería con el perfeccionamiento del conocimiento. La segunda es empírica y, a mi juicio, la más contundente: los coeficientes de difusión, las conductividades térmicas y los tiempos de relajación son magnitudes bien definidas, mensurables y reproducibles, independientes de la precisión de los instrumentos con que las medimos. Si la irreversibilidad fuese un artefacto de nuestra ignorancia, tales magnitudes deberían variar con el grado de refinamiento de la observación — y no varían.

La tercera objeción desplaza el eje del problema. La identificación entre irreversibilidad y crecimiento del desorden, consagrada por la vulgata del segundo principio, es insuficiente. Prigogine recurre al ejemplo de la difusión térmica: al aplicarse un gradiente de temperatura a una mezcla homogénea de dos gases, se produce entropía — y, simultáneamente, se destruye la homogeneidad, concentrándose uno de los componentes preferentemente en la región caliente y el otro en la fría. El proceso irreversible, aquí, *genera orden*. A partir de esa constatación, y retomando las tesis ya presentadas en *La nueva alianza*, el autor formula tres proposiciones que sostienen toda la obra: los procesos irreversibles son tan reales como los reversibles; desempeñan un papel constructivo en la naturaleza; y exigen, para ser comprendidos, una extensión de la dinámica (PRIGOGINE; STENGERS, 1997).

Hay un argumento adicional, de naturaleza reflexiva, que merece registro. Si la flecha del tiempo fuese una ilusión producida por nuestra condición de observadores limitados, sería preciso explicar cómo llegaron a existir observadores limitados en un universo sin flecha del tiempo. Ahora bien, la emergencia de la vida y, por tanto, de observadores, presupone procesos irreversibles alejados del equilibrio. La explicación antropocéntrica es, en ese sentido, circular: presupone aquello que debería explicar. Es lo que condensa la frase del prólogo ya citada — somos hijos de la flecha del tiempo, no sus autores.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

Cabe una observación crítica. El rechazo de la lectura antropocéntrica es, en el plano de los argumentos, sólido; pero conviene notar que Prigogine escribe en un debate en el cual su posición era minoritaria, y sigue siendo objeto de controversia entre los físicos. Autores de la mecánica estadística tradicional continúan sosteniendo que la irreversibilidad macroscópica es compatible con la simetría temporal microscópica, mediante hipótesis sobre condiciones iniciales de baja entropía en el universo primitivo. La fuerza del argumento prigoginiano no reside en haber cerrado esa discusión — no la cerró —, sino en haber mostrado que la alternativa antropocéntrica tiene costos filosóficos elevados y consecuencias empíricas que merecen escrutinio.

4 EL PAPEL CONSTRUCTIVO DE LA IRREVERSIBILIDAD: ESTRUCTURAS DISIPATIVAS Y BIFURCACIONES

La respuesta positiva de Prigogine a la paradoja del tiempo comienza en el dominio en que su contribución científica es menos discutida: la termodinámica de los sistemas alejados del equilibrio. A partir de la escuela de Théophile de Donder, en Bruselas, retoma la descomposición de la variación de entropía en dos términos, $dS = d_eS + d_iS$, en la que d_eS designa el flujo de entropía a través de las fronteras del sistema — que puede ser positivo o negativo — y d_iS la producción interna de entropía, siempre positiva o nula. Esa distinción, aparentemente técnica, tiene una consecuencia de principio: el segundo principio deja de ser un enunciado restringido a los sistemas aislados y pasa a aplicarse a los sistemas abiertos, esto es, a prácticamente todos los sistemas de interés en la química, en la biología y en las ciencias de la Tierra.

El caso de lo vivo ilustra el alcance de la reformulación. Schrödinger (1997), en *¿Qué es la vida?*, había descrito el metabolismo en términos de un flujo de entropía negativo: el organismo en estado estacionario mantiene $dS = 0$, lo que implica $d_eS = -d_iS < 0$. Prigogine acepta la descripción, pero desplaza el énfasis: lo que caracteriza a lo vivo no es solo absorber entropía negativa del ambiente, sino *producir* entropía intensamente. La vida no es una excepción al segundo principio; es una de sus manifestaciones más elaboradas.

En las proximidades del equilibrio, en el llamado régimen lineal, el comportamiento de los sistemas está gobernado todavía por un principio extremal: el teorema del mínimo de producción de entropía, demostrado por Prigogine en 1945 con apoyo en las relaciones de reciprocidad de Onsager, establece que el estado estacionario minimiza la producción de entropía, lo que garantiza la regresión de las fluctuaciones y, por tanto, la estabilidad. Ya ahí, sin embargo, aparece un rasgo inesperado: el estado estacionario de no-equilibrio puede ser *más organizado* que el de equilibrio, como muestra el ejemplo de la difusión térmica.

El cuadro cambia radicalmente lejos del equilibrio. Con Paul Glansdorff, Prigogine demostró que, en esa región, ya no existe función extremal alguna — ni energía libre, ni producción de entropía — cuya minimización determine el estado del sistema. Solo es posible formular condiciones suficientes de estabilidad, reunidas en el llamado criterio general de evolución. La consecuencia epistemológica es notable y frecuentemente subestimada: cerca del equilibrio, las leyes son universales, en el sentido de que no dependen de los detalles del sistema; lejos del equilibrio, se vuelven *específicas*, dependientes del tipo de proceso irreversible involucrado. “Lejos del equilibrio, la materia adquiere nuevas propiedades en las que las

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

fluctuaciones, las inestabilidades desempeñan un papel esencial: la materia se vuelve más activa" (PRIGOGINE, 1996, p. 68).

El mecanismo de esa actividad es la bifurcación. Considérese un reactor químico abierto en el cual se puede variar la distancia al equilibrio. Mientras esa distancia es pequeña, el sistema sigue lo que Prigogine llama la rama termodinámica — la prolongación, en el dominio de no-equilibrio, de la solución que corresponde al equilibrio. A partir de un valor crítico, sin embargo, esa rama se vuelve inestable, y surgen nuevas soluciones estables: oscilaciones químicas, estructuras espaciales periódicas del tipo previsto por Alan Turing (1952) en el contexto de la morfogénesis, ondas químicas propagantes. Estas son las estructuras disipativas — organizaciones espacio-temporales coherentes que solo se mantienen mediante disipación continua de energía y que, a diferencia de la rama termodinámica, *aumentan* la producción de entropía.

Dos condiciones son necesarias para su emergencia: distancia suficiente del equilibrio y existencia de etapas catalíticas o autocatalíticas, en las que un producto interviene en su propia formación — condición universalmente satisfecha por los organismos vivos por medio de las enzimas. La confirmación experimental vino con la reacción de Belousov-Zhabotinsky, en la que miles de millones de moléculas alternan colectivamente de estado, haciendo visible, en la alternancia de color de la solución, una coherencia de largo alcance inexistente en el equilibrio. Es a esa coherencia a la que se refiere la fórmula que Prigogine gustaba de repetir y que atraviesa la obra: "En un tono metafórico, se puede decir que en el equilibrio la materia es ciega, mientras que lejos del equilibrio comienza a ver" (PRIGOGINE, 1996, p. 71).

El punto de bifurcación introduce, además, un elemento probabilista irreductible en la descripción. Cuando el sistema alcanza el valor crítico, las leyes determinan qué ramas están disponibles, pero no cuál de ellas será efectivamente escogida: son las fluctuaciones — irrelevantes cerca del equilibrio, decisivas allí — las que deciden. De ello se deriva una característica de enorme alcance conceptual: un sistema sometido a una sucesión de bifurcaciones adquiere una *historia*. Observar el sistema en determinado estado permite inferir por cuáles bifurcaciones anteriores ha pasado; la trayectoria recorrida está inscrita en el estado presente. La naturaleza física, aquí, se vuelve narrable — no porque le atribuyamos una narrativa, sino porque la sucesión de elecciones efectivamente realizadas constituye una secuencia irreversible de acontecimientos.

Prigogine extrae de ese cuadro una inversión de la narrativa de las "heridas narcisistas" que Freud había atribuido a la historia de las ciencias. Si Copérnico desplazó a la Tierra del centro, Darwin retiró al hombre del lugar de excepción y el psicoanálisis destituyó a la conciencia de su soberanía, la física de no-equilibrio operaría en sentido contrario: mostraría que la creatividad humana no es ajena a la naturaleza, sino amplificación de rasgos ya presentes en el mundo físico. La formulación que sintetiza esa reconciliación es bergsoniana y whiteheadiana al mismo tiempo: "Lo posible es más rico que lo real. La naturaleza nos presenta, de hecho, la imagen de la creación, de la imprevisible novedad. Nuestro universo siguió un camino de

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

bifurcaciones sucesivas: podría haber seguido otros. Tal vez podamos decir lo mismo sobre la vida de cada uno de nosotros" (PRIGOGINE, 1996, p. 75).

Es preciso, sin embargo, marcar el límite de ese resultado. Las estructuras disipativas establecen el papel constructivo de la irreversibilidad en el nivel macroscópico, pero no responden a la pregunta que constituye la paradoja del tiempo. Muestran *que* la irreversibilidad produce orden; no muestran *de dónde* viene la irreversibilidad. Y Prigogine es inequívoco en cuanto a la imposibilidad de sortear esa cuestión por la vía de la emergencia simple: "¿No sería el tiempo una propiedad emergente? Pero entonces es preciso descubrir sus raíces. La flecha del tiempo nunca emergerá de un mundo regido por leyes temporalmente simétricas" (PRIGOGINE, 1996, p. 62). Esa frase es el eje de la obra: es ella la que obliga al autor a descender al nivel microscópico y a proponer una extensión de las leyes fundamentales.

5 LA RUPTURA DE LA EQUIVALENCIA ENTRE LA DESCRIPCIÓN INDIVIDUAL Y LA DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA

Antes de exponer el núcleo técnico de la obra, conviene registrar una autocrítica que el propio Prigogine formula y que ilumina el sentido de su propuesta. En *Del ser al devenir*, publicado en 1980, había presentado la relación entre descripción dinámica y descripción termodinámica como una complementariedad, a la manera de Bohr (PRIGOGINE, 2011). En 1996 lamenta ese enunciado: si hubiese más de una descripción igualmente legítima, ¿quién decidiría cuál de ellas es la correcta? "La existencia de una flecha del tiempo no es una cuestión de conveniencia. Es un hecho impuesto por la observación" (PRIGOGINE, 1996, p. 78). La solución, por tanto, no puede ser la coexistencia pacífica de dos puntos de vista, sino una extensión de la dinámica misma — tesis que desarrollaría también en *Las leyes del caos* (PRIGOGINE, 2002).

El núcleo técnico de la obra es una tesis de apariencia modesta y de consecuencias considerables. Puede enunciarse así: para una clase bien definida de sistemas dinámicos — los sistemas inestables —, la descripción en términos de trayectorias individuales y la descripción en términos de distribuciones de probabilidad dejan de ser equivalentes, y solo la segunda permite formular las leyes de la evolución.

Conviene explicitar lo que esa equivalencia significa en la física clásica. Un estado individual de un sistema mecánico está representado por un punto en el espacio de las fases, cuyas coordenadas son las posiciones y los momentos de todas las partículas. Un conjunto estadístico — el *ensemble* de Gibbs y Einstein — está representado por una distribución de probabilidad $\rho(q,p,t)$ sobre ese mismo espacio. Para Gibbs y Einstein, el recurso a los conjuntos era un expediente de cálculo, justificado por nuestra ignorancia de las condiciones iniciales exactas; en principio, todo lo que la distribución dice podría reconstituirse a partir de las trayectorias individuales que ella recubre, y la trayectoria individual se recuperaría como caso límite, representada por una función delta de Dirac concentrada en un punto.

Prigogine muestra que esa reconstitución es posible para los sistemas estables e imposible para los sistemas caóticos. El argumento se conduce, con notable economía, sobre modelos de poquísimos grados de libertad — lo que constituye, a mi juicio, el movimiento retórico

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

más eficaz del libro. En el gas de Boltzmann, con sus 10^{23} constituyentes, siempre podía invocarse la imposibilidad práctica de seguir las partículas; en los ejemplos que Prigogine escoge hay apenas una o dos variables, y aun así la irreversibilidad aparece. Como él observa, “en este caso, no es concebible recurrir a nuestra ignorancia o a aproximaciones y, sin embargo, la propiedad esencial que está en el origen de la irreversibilidad ya aparece” (PRIGOGINE, 1996, p. 96-97).

El primer modelo es la aplicación de Bernoulli, $x_{n+1} = 2x_n$ (módulo 1). Escrita en la representación binaria, equivale a un desplazamiento: en cada iteración, cada dígito asume el valor de aquel que lo precedía. Como los dígitos de un número irracional son independientes entre sí, la secuencia generada es tan aleatoria como una sucesión de lanzamientos de moneda — en un sistema rigurosamente determinista. La sensibilidad a las condiciones iniciales resulta inmediatamente legible: dos números que difieren únicamente en el cuadragésimo dígito binario — esto es, en menos de 2^{-39} — pasarán a diferir en media unidad tras cuarenta iteraciones. El exponente de Lyapunov, que mide la tasa de divergencia exponencial de trayectorias vecinas, vale aquí log 2.

El contraste entre los dos niveles de descripción es entonces dramático. Mientras la trayectoria individual permanece errática e imprevisible, la distribución de probabilidad $\rho_n(x)$ converge rápida y regularmente hacia una constante — la distribución uniforme, que es el equilibrio del sistema. Prigogine formula el resultado en una frase que invierte la intuición corriente: “La inestabilidad en el nivel de la trayectoria conduce a un comportamiento estable en el nivel de la descripción estadística” (PRIGOGINE, 1996, p. 89). El nivel estadístico no es, por tanto, una versión degradada del individual: es el nivel en que el sistema exhibe legalidad.

La razón técnica de esa asimetría reside en la estructura espectral del operador de evolución de las distribuciones, el operador de Perron-Frobenius. Además del conjunto de soluciones que reproduce la descripción por trayectorias, ese operador admite un segundo conjunto de funciones propias — los polinomios de Bernoulli, con valores propios $1/2^m$ — que describen el amortiguamiento exponencial de las contribuciones y, por tanto, tiempos de relajación bien definidos. Ocurre que esas nuevas soluciones solo tienen sentido cuando se aplican a distribuciones regulares; aplicadas a las funciones delta que representan trayectorias individuales, producirían productos de funciones singulares, matemáticamente desprovistos de significado. Como sintetiza el autor, “la formulación estadística de la aplicación de Bernoulli solo concierne a las funciones de distribución ρ normales, y no a las trayectorias individuales que, como hemos visto, corresponden a funciones singulares δ” (PRIGOGINE, 1996, p. 99). Para acomodar simultáneamente los dos tipos de función es preciso abandonar el espacio de Hilbert usual y trabajar en espacios de Hilbert generalizados, o espacios de Gelfand.

El segundo modelo, la transformación del panadero, elimina una objeción que podría dirigirse al primero. La aplicación de Bernoulli no es invertible, de modo que su asimetría temporal podría atribuirse a la ecuación misma. La transformación del panadero — que aplasta un cuadrado unitario hasta convertirlo en un rectángulo y lo recorta para reconstituir el cuadrado, con una coordenada dilatante y otra contractante, y exponentes de Lyapunov +log 2 y −log 2 —

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

es, por el contrario, “invertible, reversible respecto del tiempo, determinista, recurrente y caótica” (PRIGOGINE, 1996, p. 106). Reúne, por tanto, todas las propiedades en nombre de las cuales suele negarse la irreversibilidad, y es justamente en ella donde Prigogine muestra el surgimiento de dos representaciones espectrales irreducibles: una aplicable al futuro, con amortiguamiento; otra aplicable al pasado, con amplificación.

La elección entre ellas constituye lo que el autor denomina principio de selección. Formalmente, en el espacio de Hilbert la evolución constituye un grupo, en el cual las dos direcciones del tiempo permanecen indisociadas; en los espacios generalizados, ese grupo se escinde en dos semigrupos, y es preciso seleccionar aquel en que el equilibrio se alcanza en nuestro futuro. El fundamento de esa selección no es matemático, sino físico, y reposa en un hecho de observación de generalidad máxima: “Todos los procesos irreversibles en la naturaleza están caracterizados por una misma dirección de su flecha del tiempo. Todos producen entropía en la misma dirección del tiempo” (PRIGOGINE, 1996, p. 108).

Una objeción previsible es enfrentada de modo directo. Podría argumentarse que, con precisión infinita en la preparación de las condiciones iniciales, la descripción por trayectorias seguiría siendo válida. Prigogine compara esa objeción con la que sostuviese que, siendo “imaginables” las velocidades infinitas, la relatividad resultaría prescindible. Se trata, en ambos casos, de una idealización que la estructura de la teoría excluye: como ya había observado Pierre Duhem en 1906 (DUHEM, 2014), “la noción de trayectoria solo es un modo de representación adecuado si la trayectoria permanece aproximadamente la misma cuando modificamos ligeramente las condiciones iniciales” (PRIGOGINE, 1996, p. 95). En un sistema caótico, esa robustez no existe — y un concepto que no es robusto no es un buen concepto físico.

La conclusión del movimiento se formula sin atenuantes: “cuando estamos ante sistemas inestables, debemos formular las leyes de la dinámica en el nivel estadístico. Esto, ciertamente, cambia de manera radical nuestra descripción de la naturaleza, puesto que los objetos fundamentales de la física ya no son trayectorias o funciones de onda, sino probabilidades” (PRIGOGINE, 1996, p. 77-78). Este es el sentido preciso en que las certidumbres terminan: no porque nada pueda saberse, sino porque el objeto del saber ha dejado de ser aquello que la tradición suponía que era.

6 RESONANCIAS DE POINCARÉ Y LA EXTENSIÓN DE LA DINÁMICA CLÁSICA Y CUÁNTICA

Los modelos de tiempo discreto examinados en la sección anterior cumplen una función demostrativa, pero no constituyen, por sí solos, una reformulación de la física. El paso siguiente de la obra consiste en mostrar que la misma ruptura ocurre en los sistemas dinámicos reales, y la pieza técnica que lo permite es el teorema de no-integrabilidad de Poincaré.

Se dice que un sistema dinámico es integrable cuando sus variables pueden redefinirse de modo que se elimine la energía potencial, tornándolo isomorfo a un conjunto de partículas libres — lo que equivale a decir que sus ecuaciones pueden resolverse exactamente. Poincaré (1995) demostró que la mayoría abrumadora de los sistemas dinámicos no es integrable, e identificó la causa: las resonancias entre grados de libertad, esto es, relaciones numéricas

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

simples entre sus frecuencias, del tipo $n_1\omega_1 + n_2\omega_2 = 0$. Tales relaciones hacen aparecer, en los desarrollos perturbativos, denominadores que se anulan — los "pequeños divisores" ya advertidos por Le Verrier en mecánica celeste —, y las series divergen. Ya el problema de los tres cuerpos no es integrable.

La tradición leyó ese resultado como un obstáculo. Max Born, citado por Prigogine, expresó el sentimiento corriente al observar que sería notable que la naturaleza hubiese encontrado un medio de resistir al progreso del conocimiento escondiéndose tras el muro de las dificultades analíticas del problema de *n* cuerpos. Prigogine propone la inversión: las resonancias no son un obstáculo, sino la fuente de una legalidad nueva. Eliminadas en el nivel estadístico — donde no producen divergencias, sino términos difusivos —, quiebran simultáneamente el determinismo y la simetría temporal.

El argumento decisivo es de naturaleza conceptual, y merece ser destacado porque con frecuencia se omite en las presentaciones resumidas de la obra. Las resonancias son condiciones sobre *frecuencias*, no acontecimientos localizados en un punto del espacio y en un instante del tiempo. Introducen, por tanto, un elemento ajeno a la noción misma de trayectoria, que es por definición una descripción local. No se trata, aquí, de una limitación de nuestra capacidad de cálculo, sino de una incompatibilidad entre el tipo de objeto que la resonancia es y el tipo de objeto que la trayectoria es. Esa es la razón por la cual la extensión de la dinámica no puede efectuarse en el nivel individual.

Dos condiciones físicas delimitan el dominio de validez de la reformulación. La primera es la persistencia de las interacciones. En las interacciones transitorias — la dispersión (*scattering*) de laboratorio, en la que un haz se aproxima, interactúa y se aleja — los efectos nuevos no aparecen. En las interacciones persistentes — las moléculas de un gas, que nunca cesan de chocar — aparecen. La segunda condición es el límite termodinámico, con el número de partículas y el volumen tendiendo al infinito y su razón permaneciendo finita, lo que caracteriza los llamados grandes sistemas de Poincaré. Prigogine insiste en que ese límite no es un artificio de cálculo, sino la condición de existencia de propiedades reales como las transiciones de fase. Un sistema finito no tiene estados sólido, líquido y gaseoso bien definidos; la distinción entre ellos solo existe en el límite.

En ese marco, el autor construye una representación espectral del operador de Liouville — el operador que gobierna la evolución de las distribuciones de probabilidad — fuera del espacio de Hilbert. La justificación física es la misma de la sección anterior, ahora aplicada a sistemas continuos: las interacciones persistentes exigen distribuciones de probabilidad no localizadas, cuya transformada de Fourier es singular, mientras que la trayectoria es precisamente el caso extremo de localización. Los valores propios complejos así obtenidos producen contribuciones que decaen en el futuro y divergen en el pasado, y es de esa estructura de donde se deriva la ruptura de la simetría temporal. El resultado es lo que Prigogine llama descripción probabilista irreducible: "Obtenemos, por tanto, una descripción probabilista irreducible, caracterizada por una ruptura de la simetría temporal. El conflicto entre el tiempo reversible de la dinámica y el tiempo orientado de la termodinámica queda así resuelto en el

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

interior mismo de la dinámica, sin interferencia de elementos extrínsecos" (PRIGOGINE, 1996, p. 114).

Conviene subrayar la modestia con que el autor delimita el alcance de la tesis. El indeterminismo aquí defendido no es ausencia de previsibilidad: "El indeterminismo, defendido por Whitehead, Bergson o Popper, se impone en adelante en la física. Pero no debe ser confundido con la ausencia de previsibilidad, que tornaría ilusoria toda acción humana. Es de un límite a la previsibilidad de lo que se trata" (PRIGOGINE, 1996, p. 115). La distinción es esencial y se pierde con frecuencia en las apropiaciones de la obra: lo que se afirma es la existencia de horizontes de previsibilidad, no la imposibilidad de prever.

La transposición del argumento a la mecánica cuántica ocupa el capítulo más técnico del libro y responde a lo que Prigogine llama la paradoja cuántica. La teoría cuántica, tal como fue codificada por von Neumann, reposa en una estructura dualista: de un lado, la ecuación de Schrödinger, determinista y simétrica en el tiempo, que gobierna la evolución de la función de onda; de otro, la reducción de la función de onda, proceso irreversible asociado a la medición, que convierte un caso puro en una mezcla. No hay, en la teoría, criterio que determine cuándo abandonar el primer proceso por el segundo, ni interpretación realista consensuada del segundo — lo que abrió espacio a las soluciones que invocan la conciencia del observador, los universos múltiples o la decoherencia ambiental. Roger Penrose (1991), a quien Prigogine se refiere con aprecio, había clasificado esa dualidad entre las "paradojas" propiamente dichas de la teoría — aquellas que no se dejan disolver mediante refinamiento interpretativo.

La tesis de Prigogine es que la paradoja cuántica es un caso particular de la paradoja del tiempo, y que una misma solución resuelve ambas. Como las resonancias de Poincaré aparecen también en los sistemas cuánticos de espectro continuo, se obtiene para ellos una formulación estadística fuera del espacio de Hilbert, en la cual la magnitud fundamental deja de ser la amplitud de probabilidad y pasa a ser la probabilidad: "en esta nueva formulación, la magnitud fundamental ya no es la amplitud de probabilidad, sino la probabilidad misma" (PRIGOGINE, 1996, p. 138). La reducción de la función de onda deja de exigir una intervención externa y pasa a ser un proceso dinámico producido por las resonancias. De ahí se sigue el resultado que el autor considera decisivo desde el punto de vista epistemológico: un aparato de medida debe ser un gran sistema de Poincaré con simetría temporal rota, y "los GSP se miden a sí mismos, por así decirlo. La actualización de las potencialidades contenidas en las funciones de onda se realiza gracias a los GSP" (PRIGOGINE, 1996, p. 155). El observador pierde el estatuto de demiurgo responsable de la actualización de las potencialidades de la naturaleza.

Es importante registrar, por honestidad intelectual, que esa propuesta no obtuvo consenso en la comunidad de la física. La formulación de Bruselas-Austin permanece minoritaria frente a los enfoques de decoherencia hoy dominantes, y las objeciones técnicas dirigidas a las representaciones espectrales fuera del espacio de Hilbert nunca fueron enteramente respondidas. Ello no invalida el interés epistemológico del programa, pero recomienda cautela a quien lo invoca como resultado consolidado de la física contemporánea. Lo que la obra establece con seguridad es la formulación de un problema y la demostración de que la salida

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

antropocéntrica tiene costos; lo que propone como solución es un programa de investigación, y como tal debe ser presentado.

7 LA EXTENSIÓN COSMOLÓGICA: "EL TIEMPO PRECEDE A LA EXISTENCIA"

El capítulo octavo de la obra se abre con una anécdota que Prigogine visiblemente aprecia. Invitado por el físico Ivanenko a escribir una frase en la pared de la Universidad Lomonósov, en Moscú, junto a las frases dejadas por Dirac y Bohr, vaciló y escribió: "El tiempo precede a la existencia" (PRIGOGINE, 1996, p. 169). La frase condensa la extensión cosmológica de todo el argumento.

La cuestión a la que ella responde es la siguiente: si la flecha del tiempo es propiedad de la naturaleza y no del observador, y si es universal — todos los procesos irreversibles apuntando en la misma dirección —, entonces debe tener un origen cosmológico. Ahora bien, la cosmología estándar sitúa el origen del universo en una singularidad inicial, en la cual las leyes conocidas dejan de valer, y Stephen Hawking (1988) había propuesto, con el expediente del "tiempo imaginario", una descripción en la que las cuatro dimensiones se vuelven espaciales y el universo aparece como estructura eterna y puramente geométrica. Prigogine rechaza ese camino por la misma razón por la que rechaza la lectura antropocéntrica de la irreversibilidad: elimina el tiempo en vez de explicarlo.

Su propuesta consiste en sustituir la singularidad por la inestabilidad: "El punto esencial es que el nacimiento de nuestro universo ya no está asociado a una singularidad, sino a una inestabilidad, con cierta analogía con una transición de fase o con una bifurcación" (PRIGOGINE, 1996, p. 187). El modelo, desarrollado con Jules Géhéniau, Edgard Gunzig y Pasquale Nardone a partir de los trabajos de Brout, Englert y Gunzig, se apoya en la constatación de que la energía gravitacional es negativa y la energía de la materia positiva, de modo que la energía total del universo puede ser nula — la hipótesis del "almuerzo gratis" formulada por Edward Tryon. La creación de materia a partir del vacío cuántico se torna entonces posible sin violación de la conservación de la energía, y el precio se paga no en energía, sino en entropía: "El nacimiento de nuestro universo se traduce en una explosión de entropía" (PRIGOGINE, 1996, p. 189).

La analogía con las estructuras disipativas es explícita y vale la pena registrarla, porque revela la unidad del pensamiento prigoginiano. Así como una célula de convección solo existe mientras está atravesada por un flujo disipativo, el universo aparece como un sistema alejado del equilibrio cuyas "estructuras disipativas" son la materia misma y el espacio-tiempo curvo. Y, así como el segundo principio rompe la equivalencia entre trabajo y calor establecida por el primero, rompería la equivalencia entre geometría y materia establecida por las ecuaciones de Einstein, confiriendo dirección al proceso: la conversión de espacio-tiempo en materia es disipativa, y el proceso inverso está excluido.

La consecuencia que el autor extrae es la más especulativa de la obra, y él mismo lo reconoce. Como no hay estado fundamental estable para el campo conforme involucrado en el modelo, el proceso no se detiene en el nacimiento de nuestro universo: se aplicaría a un meta-universo en el cual puede nacer un número indefinido de universos, y en el cual el lugar y el momento de cada nacimiento solo tienen significado estadístico, ligado a fluctuaciones cuánticas.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

De ahí la formulación: “En esta perspectiva, el tiempo es eterno. Nosotros tenemos una edad, nuestra civilización tiene una edad, nuestro universo tiene una edad, pero el tiempo, por su parte, no tiene ni comienzo ni fin” (PRIGOGINE, 1996, p. 173).

Se imponen dos observaciones críticas. La primera es que Prigogine es escrupuloso al demarcar el estatuto de esas proposiciones. Ya en el prólogo había advertido que, en las fronteras del conocimiento, razonamiento físico y especulación difícilmente se demarcan, y que sería prematuro hablar de demostración o de prueba; lo que se puede hacer es analizar posibilidades conceptuales. Esa cautela contrasta favorablemente con el tono de algunas apropiaciones posteriores de su obra.

La segunda observación concierne a la función argumentativa del capítulo. El modelo cosmológico no es una consecuencia necesaria de la tesis sobre la irreversibilidad; es más bien una verificación de consistencia. Si la flecha del tiempo es universal, no puede haber surgido en algún punto de la historia del universo — tendría que ser tan antigua como el universo, o más. El capítulo muestra que existe al menos un modelo cosmológico compatible con esa exigencia. Que ese sea el modelo correcto es otra cuestión, y Prigogine no pretende haberla resuelto.

8 LA NUEVA RACIONALIDAD: DIÁLOGO CON LA NATURALEZA, ÉTICA Y EL CAMINO ESTRECHO

El capítulo séptimo de la obra, situado entre los desarrollos técnicos y la extensión cosmológica, formula en clave epistemológica lo que los demás establecen en clave física. Su tesis es que la ciencia es un diálogo con la naturaleza, y que ese diálogo presupone la realidad del devenir: “La ciencia es un diálogo con la naturaleza. [...] Un mundo simétrico respecto del tiempo sería un mundo incognoscible. [...] La realidad del devenir es la condición *sine qua non* de nuestro diálogo con la naturaleza” (PRIGOGINE, 1996, p. 157).

El argumento es más fuerte de lo que la fórmula sugiere. Toda medición presupone que el sistema observado pueda afectar al observador, produciendo en él un registro que persiste. Ahora bien, un registro que persiste es, por definición, una asimetría entre el antes y el después. Si el mundo fuese temporalmente simétrico en todos sus niveles, no habría registros, no habría memoria y no habría conocimiento. La irreversibilidad no es, por tanto, un dato empírico entre otros: es la condición de posibilidad de la experiencia que fundamenta la física misma que la niega. Hay aquí una estructura trascendental, en el sentido kantiano del término, aunque Prigogine no emplee ese lenguaje.

De esa misma página proviene una distinción que merece ser retenida por quien trabaja con formación científica: “Comprender la naturaleza fue uno de los grandes proyectos del pensamiento occidental. No debe ser identificado con el de controlar la naturaleza. Sería ciego el amo que creyese comprender a sus esclavos con el pretexto de que estos obedecen sus órdenes” (PRIGOGINE, 1996, p. 157). La imagen es dura y el blanco es preciso: la reducción de la inteligibilidad a la capacidad de predecir y manipular. Un mundo enteramente controlable sería un mundo del cual nada habría que aprender, y Prigogine asocia ese ideal — sin tiempo, sin memoria y sin historia — a las pesadillas novelescas de Huxley, Orwell y Kundera.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

El capítulo introduce además la noción de tiempo entrópico, cuya consecuencia es más radical de lo que suele advertirse. Si el flujo del tiempo está enraizado en las resonancias, y si estas dependen del hamiltoniano del sistema, entonces dos sistemas sometidos a condiciones diferentes envejecen de manera diferente. Dos muestras químicamente idénticas, una de ellas en presencia de un catalizador, producen entropías distintas y, en ese sentido preciso, tienen flujos de tiempo distintos. Prigogine concluye: “La conclusión esencial es que, incluso en un universo newtoniano, el flujo del tiempo no es único” (PRIGOGINE, 1996, p. 164). El tiempo deja de ser el continente universal de los acontecimientos y pasa a ser propiedad de los procesos.

El capítulo final de la obra recoge las consecuencias éticas y es, desde el punto de vista de un lector de las ciencias humanas, el más denso. Prigogine construye allí una simetría argumentativa notable. De un lado, examina el rechazo de Einstein ante el modelo cosmológico de Gödel, que admitía viajes al propio pasado: Einstein, por grande que fuese su atracción por la eternidad, no pudo aceptar esa consecuencia lógica de sus propias ideas, porque aceptar el retorno al pasado equivale a negar la realidad del mundo. Y convoca a Borges (2007), quien en “Nueva refutación del tiempo” expone las doctrinas que hacen del tiempo una ilusión y concluye con el célebre “Y sin embargo, sin embargo...”. La lección que de ello se extrae es inequívoca: “Negar el tiempo puede parecer un consuelo o aparecer como el triunfo de la razón humana, es siempre una negación de la realidad” (PRIGOGINE, 1996, p. 197).

De otro lado, y es aquí donde el argumento gana su equilibrio, Prigogine rechaza con igual firmeza la solución opuesta: “El azar puro es tanto una negación de la realidad y de nuestra exigencia de comprender el mundo como lo es el determinismo” (PRIGOGINE, 1996, p. 197). Un mundo en que todo estuviese decidido de antemano y un mundo en que nada pudiese ser descrito en términos generales son igualmente inhabitables para el pensamiento, y ambos, por caminos opuestos, prescinden del trabajo de la ciencia.

Entre esas dos negaciones se sitúa lo que da título al último capítulo:

> Lo que buscamos construir es un camino estrecho entre esas dos concepciones que llevan igualmente a la alienación, la de un mundo regido por leyes que no dejan lugar alguno para la novedad, y la de un mundo absurdo, acausal, donde nada puede ser previsto ni descrito en términos generales (PRIGOGINE, 1996, p. 198).

La fórmula que sintetiza esa tercera vía es de una concisión notable: “Las leyes no gobiernan el mundo, pero este tampoco está regido por el azar. Las leyes físicas corresponden a una nueva forma de inteligibilidad que las representaciones probabilistas irreducibles expresan” (PRIGOGINE, 1996, p. 199). No se trata de debilitar la noción de ley, sino de redefinirla: una ley describe el campo de lo posible y la estructura de sus probabilidades, sin reducir los acontecimientos a consecuencias deducibles de ella.

Tres implicaciones merecen destacarse para el debate epistemológico contemporáneo.

La primera concierne a la creatividad. Prigogine observa que la creatividad científica es frecuentemente subestimada en comparación con la artística: si Shakespeare, Beethoven o Van Gogh hubiesen muerto prematuramente, nadie habría realizado sus obras, mientras que se

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

supone que la ciencia, por ser una empresa colectiva sometida a criterios rigurosos, habría llegado de cualquier modo a los mismos resultados. Él reconoce lo que hay de verdadero en ese contraste, pero concluye que las restricciones de la práctica científica no eliminan la creatividad — son desafíos para ella. La formulación misma de la paradoja del tiempo se presenta como ejemplo extraordinario de imaginación humana.

La segunda concierne a la situación del ser humano en la naturaleza. No es un demiurgo, responsable de actualizar las potencialidades del mundo mediante la observación — esa es la figura que la reformulación de la mecánica cuántica disuelve. Pero tampoco es espectador de un espectáculo ya escrito. Es participante de un diálogo, y lo que caracteriza a ese diálogo es que la dificultad se convierte en recurso: la sensibilidad a las condiciones iniciales y las resonancias de Poincaré, que la física clásica registraba como debilidades de su edificio, se vuelven el punto de partida de un lenguaje nuevo.

La tercera es propiamente ética y se articula con la genealogía histórica examinada en la sección 2. Si la búsqueda de certeza absoluta nació, con Descartes, en un contexto de guerras libradas en nombre de dogmas, entonces la crítica de las certidumbres no es un ejercicio académico: toca la relación entre conocimiento y violencia. Y la conclusión que Prigogine extrae no es escéptica, sino afirmativa: las ciencias participan de la construcción de la sociedad del mañana y no pueden renunciar a la esperanza. La obra se cierra en apertura, y no en respuesta: “Discernimos nuevos horizontes, nuevas cuestiones, nuevos riesgos. Vivimos un momento privilegiado de la historia de las ciencias” (PRIGOGINE, 1996, p. 199).

Cabe, para concluir esta sección, una advertencia sobre los usos de la obra. La tesis de que “las leyes no gobiernan el mundo” ha sido invocada en contextos muy alejados de aquel en que fue formulada, a veces para autorizar la suspensión de exigencias de rigor metodológico. Nada hay en Prigogine que sostenga ese uso. El indeterminismo que él defiende es resultado de demostración, no de renuncia a la demostración; los límites de previsibilidad que establece son límites determinados, calculables, asociados a exponentes de Lyapunov y a tiempos de relajación bien definidos. La distinción que él mismo formula — el indeterminismo no es ausencia de previsibilidad, sino límite a la previsibilidad — es la barrera que separa su posición de un relativismo que rechazó explícitamente al criticar la “deconstrucción” posmoderna. Transponer la obra a las ciencias humanas es legítimo y fecundo; transponerla como licencia para la imprecisión es traicionarla.

9 LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL COMO BIFURCACIÓN: EL FIN DE LAS CERTIDUMBRES EN LA SOCIEDAD DEL SIGLO XXI

La sección anterior se cerró con una advertencia sobre los usos de la obra, y la transposición que ahora se propone corre justamente el riesgo allí denunciado. Hablar de inteligencia artificial a partir de *El fin de las certidumbres* puede degenerar con facilidad en aquel género de comentario que presta al objeto contemporáneo un vocabulario físico que este no sostiene, produciendo el efecto de profundidad sin el costo de la demostración. Hay, sin embargo, una razón para correr el riesgo, y no es de oportunidad. La inteligencia artificial no es un objeto cualquiera entre los que podrían examinarse con el instrumental prigoginiano: es la tecnología

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

en la cual la tensión entre ley y posibilidad, entre previsión y novedad, dejó de ser cuestión de epistemólogos y se convirtió en problema práctico de sociedades enteras. Examinarla a la luz de la obra exige, por ello, cuatro movimientos y una delimitación: el estatuto epistémico de las máquinas probabilistas; la producción del conocimiento científico cuando la previsión se disocia de la comprensión; la sociedad contemporánea como sistema alejado del equilibrio; y la ética del camino estrecho aplicada a la gobernanza. El quinto movimiento, que cierra la sección, es el del reconocimiento de los límites de la analogía misma.

Conviene comenzar por una ironía histórica que rara vez se advierte. La máquina de computar nació como la última figura del demonio de Laplace. Turing (1950), al formular el juego de la imitación, razonaba sobre un dispositivo cuyo comportamiento estaba, en principio, enteramente determinado por su tabla de estados: dado el estado inicial y la entrada, el resto se seguía por necesidad. La cibernética de Wiener (1961) se organizó en torno a la noción de control por retroalimentación, esto es, de la corrección de la desviación en dirección a un blanco previamente fijado. Y Shannon (1948), al construir la teoría matemática de la comunicación, tomó prestado de la termodinámica el nombre mismo de *entropía* para designar la incertidumbre de una fuente — de modo que, en el mismo período en que la física discutía si la irreversibilidad era propiedad de la naturaleza o limitación del observador, la ingeniería de la información incorporaba el concepto como medida de ignorancia. El tema de este ensayo atraviesa la computación desde su nacimiento.

La ruptura vino del interior de la disciplina misma. Los sistemas hoy reunidos bajo el nombre de inteligencia artificial — aprendizaje estadístico, redes profundas, modelos generativos — no computan una función conocida de antemano: ajustan parámetros a una distribución de probabilidad estimada sobre datos, y su salida es el resultado de un muestreo sobre esa distribución. La misma pregunta no produce la misma respuesta. La máquina que había sido el emblema del determinismo pasó a operar expresando posibilidades, y no certezas. La fórmula del prólogo de la obra, transpuesta a ese dominio, describe el funcionamiento de esos sistemas con una fidelidad desconcertante — y es precisamente esa fidelidad la que exige cautela.

Cautela porque el precepto establecido en las secciones anteriores obliga a distinguir dos probabilismos. Todo el argumento de Prigogine reposa en la diferencia entre la probabilidad como expresión de nuestra ignorancia, que preserva intacto el edificio determinista, y la probabilidad inscrita en la ley misma, que lo modifica. Ahora bien, el probabilismo de un modelo de lenguaje pertenece, en principio, al primer género: es una elección de modelización, no una propiedad del sustrato. La red se ejecuta sobre un sustrato computacional determinista, y fijar la semilla del generador pseudoaleatorio reproduce la salida. Quien afirma que la inteligencia artificial “confirma” a Prigogine comete exactamente la confusión que la obra se dedicó a deshacer. Lo que se sostiene aquí es más modesto y, por eso mismo, defendible: se trata de una analogía estructural, con valor heurístico, y no de una aplicación ni de una corroboración.

Hecha la salvedad, la heurística no es trivial. Considérese el argumento, corriente entre los investigadores del área, de que la opacidad de esos sistemas es provisional — que avances suficientes en interpretabilidad permitirían reconstituir íntegramente las razones de cada salida.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

Formalmente, ese argumento tiene la misma estructura que la lectura antropocéntrica de la irreversibilidad examinada en la sección 3: atribuye a la limitación del observador aquello que quizá pertenezca al objeto, y proyecta un observador ideal — un demonio de Maxwell de la interpretabilidad — capaz de discriminar los microestados, aquí los pesos de la red, y de leer en ellos la determinación del comportamiento macroscópico. La diferencia es decisiva y debe consignarse: en el caso de Prigogine, existe un teorema de no-integrabilidad que prohíbe la reconstitución; en el caso de las redes profundas, no hay resultado análogo, y la cuestión permanece empíricamente abierta. Hay razones para sospechar de la respuesta afirmativa — la escala de los parámetros, la no linealidad, la sensibilidad de la salida a la formulación de la entrada —, pero sospecha no es demostración, y la diferencia entre una y otra es lo que separa este ensayo del género que rechaza.

Existe, sin embargo, un punto en el que la correspondencia sobrepasa la analogía suelta, y es el de la historicidad. Un modelo entrenado es un objeto con historia en el sentido preciso que la sección 4 estableció: su estado presente no es deducible de su arquitectura ni de su función objetivo, porque carga la memoria del camino recorrido — el corpus de datos, el orden en que los ejemplos fueron presentados, las semillas aleatorias, las elecciones humanas en la fase de alineamiento. Dos modelos de arquitectura idéntica, entrenados bajo condiciones ligeramente distintas, divergen de modo irrecuperable. La explicación de por qué un sistema de esos se comporta como se comporta es, en el sentido riguroso del término, irreductiblemente narrativa: exige reconstituir la trayectoria, y no solo exhibir las leyes. Se reencuentra aquí, realizado en un artefacto, el segundo de los tres desplazamientos conceptuales que la cuarta conclusión de este ensayo identifica como el legado transponible de la obra.

El segundo movimiento concierne a la producción del conocimiento científico. El caso ejemplar es el de la predicción de estructuras de proteínas: Jumper y colaboradores (2021) demostraron que es posible prever, con una exactitud comparable a la de las técnicas experimentales, la conformación tridimensional de una cadena polipeptídica, sin que de esa predicción resulte una teoría inteligible del plegamiento. La ganancia científica es inmensa y no está en discusión. Lo que está en discusión es lo que esa forma de éxito autoriza a concluir. Anderson (2008) formuló la conclusión máxima en la forma provocativa del “fin de la teoría”: con datos en cantidad suficiente, la correlación bastaría, y el método científico — hipótesis, modelo, prueba — se volvería obsoleto. La tesis es débil y ha sido ampliamente criticada, pero su versión atenuada opera silenciosamente en muchos programas de investigación: prever bien pasa a valer como comprender.

Es en este punto donde el capítulo epistemológico de la obra, examinado en la sección 8, deja de ser comentario y se vuelve criterio. La distinción que Prigogine establece allí entre comprender y controlar la naturaleza, condensada en la imagen del amo que se cree conocedor de sus esclavos porque obtiene de ellos obediencia, anticipa con precisión la situación. Un sistema que prevé sin modelo inteligible ofrece control sin comprensión; nada hay de ilegítimo en ello mientras la diferencia se mantenga, y todo se pierde cuando se la borra. El argumento más fuerte, sin embargo, es el otro: si la ciencia es diálogo con la naturaleza, entonces presupone

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

que quien pregunta pueda ser sorprendido y modificado por la respuesta. Un aparato que devuelve respuestas de alta exactitud y contenido explicativo nulo no participa de ese diálogo — responde sin enseñar a preguntar. El riesgo del siglo XXI no es que las máquinas piensen; es que la dificultad cognitiva, que es el lugar donde la formación científica efectivamente ocurre, se vuelva facultativa.

La consecuencia para la formación y para el sistema editorial es directa y merece registro, pues toca el trabajo cotidiano de quienes forman investigadores y evalúan manuscritos. Delegar la construcción del estado del arte, la redacción del método o la interpretación de los resultados a un sistema generativo no produce solamente texto de calidad variable: produce investigadores que nunca atravesaron la dificultad de formular un problema. Bender y colaboradores (2021) llamaron la atención sobre el hecho de que los modelos de lenguaje optimizan la plausibilidad de la forma, no la verdad del contenido — lo que, en el dominio científico, se manifiesta en referencias inexistentes, atribuciones falsas y síntesis que reproducen el consenso aparente de un corpus en vez de examinarlo. Mitchell (2019) observa, en la misma dirección, que la competencia de esos sistemas es estrecha y frágil fuera de la distribución en la que fueron entrenados. Sería unilateral, no obstante, cerrar aquí: los mismos instrumentos amplían el acceso a la literatura internacional, reducen la barrera lingüística que penaliza sistemáticamente a los investigadores de países periféricos y permiten análisis de datos antes inviables. Lo que se exige no es el rechazo, sino el mantenimiento de la diferencia entre lo que la herramienta hace y lo que el investigador debe seguir haciendo.

El tercer movimiento desplaza el examen del laboratorio a la sociedad, y es allí donde la transposición se vuelve más fecunda y más arriesgada. Se sostiene aquí que la sociedad de comienzos del siglo XXI satisface, en sentido analógico, las dos condiciones que Prigogine estableció como necesarias para la emergencia de estructuras disipativas. La primera es la distancia suficiente del equilibrio: crisis climática, transición demográfica, reordenamiento geopolítico y saturación del ambiente informacional constituyen, en conjunto, un régimen de flujos intensos y desequilibrios persistentes, y no un estado estacionario próximo al equilibrio. La segunda condición, la existencia de etapas autocatalíticas, se satisface de modo literal y no solamente metafórico: los sistemas de inteligencia artificial se emplean hoy en el diseño de los circuitos, en la escritura del código, en la curaduría de los datos y en el entrenamiento de los modelos que producirán la generación siguiente de sistemas de inteligencia artificial. Un producto que interviene en su propia formación es la definición técnica de autocatálisis.

La consecuencia de esa configuración es conocida fuera de la física bajo otro nombre. La retroalimentación positiva en presencia de rendimientos crecientes produce dependencia de trayectoria y aprisionamiento en configuraciones que no son las más eficientes, sino las que se estabilizaron primero — el mecanismo que Arthur (1994) formalizó para la economía y que Crawford (2021) documenta, en el caso de la inteligencia artificial, en la concentración de capacidad computacional, insumos energéticos y datos en un número reducido de actores. Es el régimen de bifurcación: pequeñas diferencias se amplifican, y la elección entre las ramas disponibles no está determinada por las “leyes” del sistema — el mercado, la racionalidad

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

técnica, la curva de costos —, sino por fluctuaciones, esto es, por decisiones de pequeña amplitud tomadas en el momento crítico. Aquí reside el punto propiamente político de la transposición, y es un punto preciso: es exactamente en el punto de bifurcación donde las decisiones de pequeña amplitud tienen efecto desproporcionado, y es después de tomada la rama cuando el sistema reingresa en un régimen casi determinista, en el cual las alternativas, aunque pensables, han dejado de estar disponibles. La irreversibilidad no es, aquí, figura retórica: es el nombre técnico de aquello que hace de una elección una elección.

De ese cuadro se desprende el rechazo simultáneo de los dos géneros de discurso que hoy dominan el debate público sobre el tema. El primero es el determinismo tecnológico, que enuncia el futuro en el modo de la inevitabilidad: la inteligencia artificial eliminará tal proporción de puestos de trabajo, la inteligencia general es cuestión de tiempo, la adaptación es la única política disponible. Se trata, en la forma, del demonio de Laplace con ropajes contemporáneos, con la peculiaridad de que la deducción del futuro a partir del presente se hace por extrapolación de curvas en vez de integración de ecuaciones — lo que la vuelve más frágil, no más robusta. El segundo género es su simétrico: el discurso de la imprevisibilidad radical, según el cual nada puede decirse, todo es exageración o vértigo, y por eso no tiene sentido planificar. Uno y otro, como la conclusión final de este ensayo observa a propósito del determinismo y del azar puro, eximen del esfuerzo de conocer — el primero porque todo ya estaría decidido, el segundo porque nada se dejaría aprehender. La posición prigoginiana entre ellos es la más exigente: describir el campo de lo posible, identificar qué ramas están disponibles, estimar bajo qué condiciones cada una se estabiliza y reconocer que la elección entre ellas no está escrita.

El cuarto movimiento es ético, y recoge lo que el capítulo final de la obra establece. Si la responsabilidad solo tiene sentido en un mundo que no es ni enteramente determinado ni enteramente aleatorio, entonces los dos discursos rechazados en el párrafo anterior comparten una función que rara vez se explicita: ambos son coartadas. El determinismo tecnológico absuelve, porque nadie decide aquello que era inevitable; la imprevisibilidad radical absuelve igualmente, porque nadie responde por aquello que no podía ser previsto. Cabe notar — y la observación es empírica, no retórica — que ambos discursos son emitidos con frecuencia por los mismos actores, en alternancia según la conveniencia: la inevitabilidad cuando se trata de justificar el desarrollo, la imprevisibilidad cuando se trata de responder por sus efectos. Restablecer el camino estrecho entre ellos es, antes que cualquier prescripción normativa, la condición para que exista destinatario de la pregunta por la responsabilidad.

Es bajo esa condición como los instrumentos de gobernanza adquieren sentido, y la obra ofrece para pensarlos una imagen inesperadamente exacta. En la sección 5 se examinó el principio de selección por el cual, escindido el grupo de evolución en dos semigrupos, se escoge aquel compatible con la preparación efectivamente realizable a partir de nuestro pasado. Los marcos normativos operan como un principio de selección invertido en el eje del tiempo: seleccionan, entre las ramas disponibles, aquella compatible con un futuro que la colectividad pueda suscribir. La Recomendación sobre la Ética de la Inteligencia Artificial (UNESCO, 2021), el Reglamento (UE) 2024/1689 (UNIÓN EUROPEA, 2024), el Proyecto de Ley n.º 2.338/2023 en

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

tramitación en el Congreso Nacional (BRASIL, 2023) y los protocolos técnicos de estandarización examinados por Alves Correia et al. (2026) son tentativas de constituir ese principio. Su eficacia es incierta y legítimamente disputada; Russell (2019) argumenta que el problema del control necesita estar inscrito en el diseño de los sistemas, y no solo en la regulación de su uso, mientras que Floridi (2014) sostiene que la transformación en curso es de orden ambiental y no instrumental, lo que desplaza la cuestión de la conducta individual hacia el diseño de la infosfera. El punto esencial, sin embargo, no es cuál instrumento funciona: es que instrumento alguno tiene sentido bajo la hipótesis de que la trayectoria está dada.

Resta un instrumento conceptual de la obra que rara vez se moviliza en este debate y que quizá sea el más preciso. Se trata de la noción de tiempo entrópico, examinada en la sección 8: si el flujo del tiempo se arraiga en las resonancias, y si estas dependen de las condiciones a que el sistema está sometido, entonces sistemas distintos envejecen de modo distinto, y no hay un tiempo único en el cual todos se inscriban. Transpuesta con la debida prudencia, la noción esclarece el problema central de la gobernanza: el desarrollo técnico y el desarrollo institucional poseen tiempos internos inconmensurables. El intervalo entre el momento en que una tecnología se estabiliza y el momento en que las instituciones producen una respuesta adecuada no es una falla administrativa que deba corregirse con eficiencia procesal; es una propiedad estructural del acoplamiento entre sistemas de naturalezas diferentes. Una política de gobernanza que ignora esto llega siempre tarde, porque persigue un estado ya superado; una que lo reconoce trabaja por anticipación, esto es, actúa mientras la fluctuación es todavía amplificable — antes de que la bifurcación se resuelva.

Cabe cerrar esta sección volviendo contra ella misma la advertencia formulada al final de la sección 8. La sociedad no es un reactor químico; “bifurcación”, “autocatálisis” y “distancia del equilibrio” no poseen, aquí, medida, ecuaciones ni criterio de refutación; y nada de lo que se argumentó más arriba tiene estatuto de demostración. Conviene, por eso, distinguir tres niveles de legitimidad en la transposición. El primero es el del desplazamiento epistemológico — el paso de la certeza a la posibilidad como forma de inteligibilidad —, que es transponible con plena legitimidad, porque concierne a la forma del conocimiento y no a un mecanismo físico particular. El segundo es el de los conceptos estructurales — historicidad, dependencia de trayectoria, sensibilidad a la fluctuación, irreversibilidad de la elección —, transponibles como heurística: generan hipótesis que necesitan ser puestas a prueba por los métodos propios de las ciencias sociales, y no confirmadas por analogía. El tercero es el del aparato técnico — representaciones espectrales, resonancias de Poincaré, semigrupos —, que no es transponible, y cuyo uso fuera de la física es metáfora cuando es honesto e impostura cuando no lo es. Quien mantenga presente esa jerarquía podrá leer el siglo XXI con Prigogine sin traicionarlo. Y encontrará, al final, el mismo desplazamiento que organiza toda la obra: la pregunta decisiva no es qué provocará la inteligencia artificial, formulación que ya contiene la respuesta determinista, sino qué haremos con el campo de lo posible que ella abre — pregunta que solo tiene sentido en un mundo cuyo futuro no está dado, y que es la razón por la cual, un cuarto de siglo después, este libro continúa siendo leído.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

10 CONSIDERACIONES FINALES

El recorrido realizado permite algunas conclusiones.

La primera conclusión concierne a la naturaleza del argumento examinado. *El fin de las certidumbres* no es un libro sobre los límites del conocimiento humano, aunque frecuentemente se lo lea como tal. Es un libro sobre la estructura de las leyes de la naturaleza. La diferencia es decisiva: la primera lectura preserva intacto el edificio determinista y se limita a registrar nuestra incapacidad de recorrerlo íntegramente; la segunda sostiene que el edificio es de otra naturaleza. Prigogine defiende la segunda, y es de esa elección de donde se desprende la radicalidad de su posición. Cuando afirma que las leyes expresan posibilidades, no está diciendo que solo consigamos alcanzar posibilidades; está diciendo que posibilidades es lo que hay.

La segunda conclusión se refiere a la arquitectura del argumento, cuya economía merece ser consignada. La tesis sobre el tiempo se sostiene en una cadena que va de la termodinámica de no-equilibrio a los modelos caóticos de pocos grados de libertad, de estos a la no-integrabilidad de Poincaré, de esta a la extensión de la dinámica clásica, de esta a la mecánica cuántica y, finalmente, a la cosmología. Cada eslabón cumple una función precisa: las estructuras disipativas establecen que la irreversibilidad produce orden; los modelos caóticos establecen que la irreversibilidad no se deriva de la ignorancia; las resonancias establecen dónde y por qué se rompe la equivalencia entre la descripción individual y la descripción estadística; la cosmología verifica la consistencia del conjunto. Es una construcción, y no una colección de intuiciones — lo que la distingue de buena parte de la literatura sobre la complejidad que se reclama de ella.

La tercera conclusión es de orden crítico. El programa de Bruselas-Austin no obtuvo, en la comunidad de la física, el consenso que su importancia filosófica podría sugerir. Los enfoques de decoherencia se volvieron dominantes en el tratamiento del problema de la medida cuántica, y la mecánica estadística tradicional continúa sosteniendo interpretaciones de la irreversibilidad que Prigogine rechazaba. Quien transpone sus tesis a otros campos debe hacerlo sabiéndolo, presentándolas como un programa de investigación fecundo y no como un resultado consolidado. Esa cautela, por lo demás, honra al propio autor, que fue escrupuloso al demarcar lo que consideraba demostrado y lo que consideraba especulación.

La cuarta conclusión concierne a la fecundidad de la obra fuera de la física. Ella se deriva menos de las tesis específicas sobre operadores y representaciones espectrales que de tres desplazamientos conceptuales de alcance general. El primero es la comprensión de la inestabilidad como fuente de organización, y no solo de desorden — lo que reorienta el modo de pensar los sistemas económicos, ecológicos, sociales e institucionales. El segundo es la noción de que los sistemas sometidos a bifurcaciones sucesivas adquieren historia, de modo que su estado presente carga la memoria del camino recorrido y no es deducible únicamente de sus leyes: la explicación, en esos casos, es irreductiblemente narrativa, lo que aproxima las ciencias de la naturaleza a un rasgo que se suponía exclusivo de las ciencias humanas — convergencia que Edgar Morin (2005) exploró por otro camino al formular el pensamiento complejo, y que Whitehead (2010) había anticipado al hacer de la creatividad una categoría cosmológica. El

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

tercero es la redefinición de la noción misma de ley como descripción de un campo de lo posible. Esos tres desplazamientos pueden ser apropiados con rigor por investigadores que no dominen el formalismo de la mecánica estadística, siempre que se mantenga presente la advertencia de que se trata de analogías estructurales, y no de aplicaciones directas.

La quinta conclusión concierne a la actualidad del argumento. La sección 9 procuró mostrar que la inteligencia artificial constituye, para el programa examinado, más que un campo de aplicación oportuno: constituye una prueba de su fecundidad y de sus límites. Fecundidad, porque la sociedad que se organiza en torno a esa tecnología exhibe las dos condiciones que la obra asocia a la emergencia de estructuras disipativas — distancia del equilibrio y etapas autocatalíticas —, y porque la categoría de bifurcación permite formular con precisión lo que los discursos corrientes oscurecen: que el presente es un punto crítico en el cual decisiones de pequeña amplitud tienen efecto desproporcionado, y que esa condición es transitoria. Límites, porque nada de eso es demostración, y porque el probabilismo de los sistemas generativos no es el probabilismo irreducible que la obra establece para los sistemas dinámicos inestables. La distinción entre los tres niveles de transposición legítima — el desplazamiento epistemológico, los conceptos estructurales y el aparato técnico — es la salvaguarda que permite movilizar la obra en el debate contemporáneo sin convertirla en ornamento.

La sexta y última conclusión retoma el eje ético. Lo que Prigogine denomina camino estrecho es una exigencia simultáneamente epistemológica y política: rechazar tanto el mundo en que todo está decidido como el mundo en que nada puede ser dicho. Las dos alternativas eximen del esfuerzo de conocer — la primera porque todo está ya contenido en las condiciones iniciales, la segunda porque nada se deja aprehender. Entre ellas, la posición que la obra sostiene es la más exigente: la de que hay legalidad y hay novedad, y la de que comprender consiste precisamente en articular ambas. Si hay una lección que atraviesa la frontera entre la física y el resto del trabajo intelectual, es esta. El futuro no está dado; se construye — y esa construcción, lejos de volver superflua a la ciencia, es lo que le confiere sentido.

DECLARACIÓN DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El autor declara que utilizó herramientas de Inteligencia Artificial exclusivamente como apoyo para la revisión gramatical y textual, así como para la verificación y estandarización de citas y referencias. Todo el contenido fue revisado y validado por el autor, quien asume plena responsabilidad por la versión final del artículo.

REFERENCIAS

Alves Correia, U., Souza, A. M. de, Santana, J. A., Alves, D. S., Conceição, M. M., & Silva, M. S. (2026). **Protocolo de padronização da governança de inteligência artificial com base em normas e regulamentações internacionais: revisão de literatura**. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218*, *7*(6), e768273. https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8273

ANDERSON, Chris. The end of theory: the data deluge makes the scientific method obsolete. **Wired**, San Francisco, 23 jun. 2008.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

ARTHUR, W. Brian. **Increasing returns and path dependence in the economy**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1994.

BENDER, Emily M.; GEBRU, Timnit; McMILLAN-MAJOR, Angelina; SHMITCHELL, Shmargaret. On the dangers of stochastic parrots: can language models be too big? In: ACM CONFERENCE ON FAIRNESS, ACCOUNTABILITY, AND TRANSPARENCY, 2021. **Proceedings**. New York: ACM, 2021. p. 610-623.

BERGSON, Henri. **O pensamento e o movente**: ensaios e conferências. Tradução de Bento Prado Neto. São Paulo: Martins Fontes, 2006.

BORGES, Jorge Luis. Nova refutação do tempo. In: BORGES, Jorge Luis. **Outras inquisições**. Tradução de Davi Arrigucci Jr. São Paulo: Companhia das Letras, 2007. p. 191-216.

BRASIL. Senado Federal. **Proyecto de Ley n.º 2.338, de 2023**: dispone sobre el uso de la inteligencia artificial. Brasilia, DF: Senado Federal, 2023.

CRAWFORD, Kate. **Atlas of AI**: power, politics, and the planetary costs of artificial intelligence. New Haven: Yale University Press, 2021.

DUHEM, Pierre. **A teoria física**: seu objeto e sua estrutura. Tradução de Roberto Leal Ferreira. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2014.

FLORIDI, Luciano. **The fourth revolution**: how the infosphere is reshaping human reality. Oxford: Oxford University Press, 2014.

GELL-MANN, Murray. **O quark e o jaguar**: as aventuras no simples e no complexo. Tradução de Alexandre Tort. Rio de Janeiro: Rocco, 1996.

HAWKING, Stephen. **Uma breve história do tempo**: do Big Bang aos buracos negros. Tradução de Maria Helena Torres. Rio de Janeiro: Rocco, 1988.

JUMPER, John et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. **Nature**, London, v. 596, n. 7873, p. 583-589, 2021.

MITCHELL, Melanie. **Artificial intelligence**: a guide for thinking humans. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2019.

MORIN, Edgar. **Introdução ao pensamento complexo**. Tradução de Eliane Lisboa. Porto Alegre: Sulina, 2005.

NICOLIS, Grégoire; PRIGOGINE, Ilya. **Exploring complexity**: an introduction. New York: W. H. Freeman, 1989.

NICOLIS, Grégoire; PRIGOGINE, Ilya. **Self-organization in nonequilibrium systems**: from dissipative structures to order through fluctuations. New York: John Wiley & Sons, 1977.

PENROSE, Roger. **A mente nova do rei**: computadores, mentes e as leis da física. Tradução de Waltensir Dutra. Rio de Janeiro: Campus, 1991.

POINCARÉ, Henri. **O valor da ciência**. Tradução de Maria Helena Franco Martins. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

POPPER, Karl R. **O universo aberto**: argumentos a favor do indeterminismo. Tradução de Nuno Ferreira da Fonseca. Lisboa: Dom Quixote, 1988.

PRIGOGINE, Ilya. **As leis do caos**. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora UNESP, 2002.

PRIGOGINE, Ilya. **Do ser ao devir**. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora UNESP, 2011.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org

PRIGOGINE, Ilya. **O fim das certezas**: tempo, caos e as leis da natureza. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1996.

PRIGOGINE, Ilya. **O nascimento do tempo**. Tradução de João Duarte. Lisboa: Edições 70, 1991.

PRIGOGINE, Ilya; STENGERS, Isabelle. **A nova aliança**: metamorfose da ciência. Tradução de Miguel Faria e Maria Joaquina Machado Trincheira. 3. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1997.

PRIGOGINE, Ilya; STENGERS, Isabelle. **Entre o tempo e a eternidade**. Tradução de Fátima Fernandes e Roberto Fernandes. Lisboa: Gradiva, 1990.

RUSSELL, Stuart. **Human compatible**: artificial intelligence and the problem of control. New York: Viking, 2019.

SCHRÖDINGER, Erwin. **O que é vida?**: o aspecto físico da célula viva, seguido de Mente e matéria e Fragmentos autobiográficos. Tradução de Jesus de Paula Assis e Vera Yukie Kuwajima de Paula Assis. São Paulo: Editora UNESP, 1997.

SHANNON, Claude E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, New York, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948.

STENGERS, Isabelle. **A invenção das ciências modernas**. Tradução de Max Altman. São Paulo: Editora 34, 2002.

TOULMIN, Stephen. **Cosmopolis**: the hidden agenda of modernity. Chicago: University of Chicago Press, 1990.

TURING, Alan M. Computing machinery and intelligence. **Mind**, Oxford, v. 59, n. 236, p. 433-460, 1950.

TURING, Alan M. The chemical basis of morphogenesis. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences**, London, v. 237, n. 641, p. 37-72, 1952.

UNESCO. **Recomendación sobre la Ética de la Inteligencia Artificial**. París: UNESCO, 2021.

UNIÓN EUROPEA. **Reglamento (UE) 2024/1689 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024**, por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial. Diario Oficial de la Unión Europea, L, 12 jul. 2024.

WHITEHEAD, Alfred North. **Processo e realidade**: ensaio de cosmologia. Tradução de Maria Teresa Teixeira. Lisboa: Húmus, 2010.

WIENER, Norbert. **Cybernetics**: or control and communication in the animal and the machine. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 1961.

Este artículo se publica en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite al autor original y la fuente. https://rcpef.org