

cuaderno de matemáticas, física cuántica
y neurociencias hoy nº 188

philosophie
phillomag.com MAGAZINE



Sciences

Cédric Villani: “Las matemáticas caricaturizan el mundo al mismo tiempo que lo develan”

[Cédric Villani](#), conversación tenida con Charles Perragin, publicada el 13 de julio de 2022

Con motivo del otorgamiento de la medalla Fields, el más prestigioso reconocimiento en matemáticas, a [Hugo Duminil-Copin](#), hemos contactado a [Cédric Villani](#) para que nos ayudara a comprender los éxitos matemáticos de la escuela francesa... Ocasión propicia para que el co-autor de los [Coulisses de la création](#) (Flammarion, 2017) regresara sobre el sentido filosófico de esta disciplina, que

busca encapsular y modelizar realidades inaprensibles, gracias a un formalismo de la imaginación que a veces confina con la poesía. Y de darnos una lección magistral sobre la esencia de las matemáticas.

Con los EE. UU., Francia es el país más premiado del mundo en matemáticas. ¿Somos una civilización matemática?

Cédric Villani: Las ciencias matemáticas son tan universales como para no poder ser acaparadas por un país o por una cultura; son tan plurales como para dejarse disponer en casilleros bien definidos. **Hugo Duminil-Copin** hace [física estadística](#) con un formalismo probabilista, se interesa particularmente en el magnetismo. Es muy particular y sin embargo ¡muy representativo de cantidad de fenómenos! Las probabilidades son un dominio matemático entre muchos otros. Otros investigadores lo hacen en álgebra, en geometría, en [análisis](#), en [lógica](#)... Cada uno de esos campos comprenden sub-campos que están en evolución constante, y con motivaciones muy diversas. Como en filosofía o en pintura, existen numerosísimas tradiciones histórica y culturalmente determinadas. Como existía la escuela de **Caravage** en el siglo XVII, en la actualidad contamos con la escuela de probabilidad parisina, conocida por haber desarrollado tal teoría o tal herramienta... Los cuatro laureados de 2022, (...) se inscriben sin embargo en la misma historia secular. Tras los pasos de **Leibniz**, **Newton** o **Fermat**, ellos se siguen preguntando cuáles son las leyes matemáticas que gobiernan la naturaleza, los números y las formas.

Ud. ha trabajado en [termodinámica](#). Duminil-Copin se ha dedicado a la [percolación](#). ¿Qué es lo que los diferencia de los físicos?

Tenemos el mundo físico, explorado por experimentos, en los que los modelos buscan predecir los comportamientos reales. Y tenemos el mundo matemático en el que las reglas de las ecuaciones, de la lógica, permiten trabajar en el mundo abstracto del modelo, un mundo en el que **hacemos como si** las experiencias no existiesen. Y acá las fronteras son porosas: si los matemáticos a veces utilizan los experimentos para ganar intuición matemática, los físicos utilizan muy frecuentemente las herramientas matemáticas en su búsqueda de más o menos rigor. Que se lo estudie con la intuición física o con instrumentos matemáticos sofisticados, el concepto central es el de modelo: un modelo reducido, una representación esquemática del mundo hecha con algunas reglas de base y axiomas, destinada a focalizarse en un pequeñísimo aspecto de la realidad. Para honrar a Duminil-Copin, tomemos el ejemplo de un problema de [cambio de fase](#). Según la temperatura y la presión, el agua es sólida, líquida o gaseosa: lo sabemos por experiencia y se estudia en física los parámetros de este cambio de estado. Ahora coloquémonos en el punto de vista de un matemático que quiere comprender *por qué* se presenta este cambio de estado. Para esto nos olvidamos de la física, se olvida que esos diferentes estados existen, se quiere leer ese fenómeno de cambio de estado justo a partir de los principios fundamentales. Se parte de este depurado: un conjunto de unidades que vamos a llamar moléculas, cuyos movimientos son descritos por medio de

ecuaciones que dependen de variables tales como la cantidad media de moléculas en un volumen dado, que está en función de la temperatura. Entonces nos preguntamos: si aumentamos la temperatura del sistema, ¿cómo evolucionan las propiedades macroscópicas de nuestro conjunto de partículas? En otros términos, sin ningún otro conocimiento *a priori* que las leyes microscópicas de la física, ¿será que llegamos a prever que el agua cambia de naturaleza a una cierta temperatura? No señor. Si Ud. fuera un ser microscópico, bañándose en medio de las moléculas, Ud. tendría dificultades en saber si está evolucionando en un líquido o en un gas: después de todo son las mismas moléculas. Pero para un ser macroscópico, las propiedades de las interacciones con ese fluido son muy diferentes. Ingenuamente podríamos pensar que hay una continuidad de estados a nivel macroscópico que dependen de la temperatura: desde el muy gaseoso, al débilmente gaseoso, al semi-líquido, etc. Pero esto no es lo que se observa. Lo que se observa es binario: por una variación progresiva de parámetros, se cambia brutalmente de estado. De este modo, el fenómeno del agua que hierve, familiar hasta para un niño de diez años, sigue siendo un gran problema para la comunidad matemática.

Pero aquí, el envite no es comprender la evaporación del agua sino la evaporación en sí misma, ¿independientemente del líquido que se tenga?

Exactamente. Duminil-Copin, para que continuemos con su ejemplo, se interesó en otra transición de fase: cuando se calienta un imán, a partir de una cierta temperatura, el imán pierde su atracción magnética. También acá el asunto es: ¿podremos, partiendo de la organización de la materia, predecir este cambio brusco de propiedades? Pues no ¡no es tan fácil!

Nos damos cuenta que si reducimos el mundo físico a su estrato más fundamental, las ecuaciones de interacciones microscópicas, las propiedades más familiares se vuelven incomprensibles.

En todo caso, se vuelve algo más difícil de lo que parecía. Es preciso decir que es una empresa muy ambiciosa. Todo esto hace parte de un gran programa nacido al mismo tiempo que la física atómica a fines del siglo XIX y formalizado por [David Hilbert](#) en el [congreso internacional de las matemáticas en 1900](#), en París. ¿Cómo deducir, a partir de las propiedades microscópicas de la materia tomadas como axiomas, las propiedades macroscópicas emergentes, familiares, como si fueran conclusiones? ¿y por qué no llegar hasta el conjunto de las propiedades de la mecánica clásica, y de la mecánica estadística de fluidos, etc.? ¿Hasta dónde se puede llegar arrancando en la más pequeña de las escalas? Después de **Euclides**, uno se dota de las reglas elementales para establecer leyes más complicadas, y uno se pregunta por el conjunto mínimo de axiomas que permita deducir todo el resto. Pero nos gustaría poder hacer lo mismo en física matemática, en física teórica. A partir de la descripción de las fuerzas fundamentales, ¿podremos establecer las leyes de la termodinámica, de la mecánica de fluidos, de los frotamientos o de la manera cómo se arruga una hoja de papel?

A no ser que ¿cuando lleguemos al formalismo matemático estemos tocando el horizonte última, la escena metafísica primordial a partir de la cual debería deducirse el mundo tal y como lo experimentamos?

Sí... un horizonte último y una tarea imposible de realizar en la práctica. Si como ya dijimos la ebullición tan familiar es aún un problema abierto, imagine no más la tarea más que hercúlea que representaría el establecimiento del conjunto de las reglas del mundo. Y no es que el camino sea largo; es porque el horizonte está a tal punto lejano que es inimaginable. No hay que creer que estemos hoy ante un cuadro general con algunos huecos que habrá que llenar. No, digámoslo claramente, estamos ante algunos archipiélagos de conocimiento en medio de un océano desconocido. Este programa majestuoso y casi hierático de un trazar un esquema fundamental matemático del mundo es demasiado ambicioso como para considerarlo una hoja de ruta. Apenas si buscamos algunos atisbos, algunos reflejos...

No piensa Ud. pues que las matemáticas constituyen el lenguaje de la naturaleza que hay que descifrar.

Quizás las ciencias matemáticas son el esqueleto de nuestro mundo; es una concepción corriente y no tengo dificultad en aceptarla. Pero a mi me parece mejor que son su caricatura – su sombra, su reflejo. Tome el concepto de recta infinita. Es fundamental para la geometría. Sin embargo, en la naturaleza, no existe una línea recta perfecta, estupenda e infinita. Es una idealización. Alrededor nuestro lo único que logramos son aproximaciones imperfectas. La conceptualización de los átomos, el [spin](#) ferromagnético que está en la base de los trabajos de Hugo Duminil-Copin, todos esos objetos son caricaturas de realidades complejas, contradictorias, inaprehensibles en tanto que tales. La matemática que manejamos es un modelo reducido muy simplificado, es un jueguito de niños al lado de lo real. Pero lo más maravilloso de esta historia es que por medio de esta engañifa del juego de niños, logramos obtener conclusiones reales inaccesibles a la intuición. Por ejemplo, la naturaleza atómica del mundo no ha sido observada primero sino que fue descubierta sobre la base de cálculos físicos y matemáticos, a partir de observaciones muy indirectas como el movimiento de pequeños objetos en el agua. Los huecos negros al comienzo no fueron sino objetos matemáticos implicados en las ecuaciones de la teoría de la relatividad general, mucho antes de ser observados. Y lo mismo pasó con el [boson de Higgs](#). En el estudio matemático de los fenómenos físicos, descubrimos muchas más cosas de las que hemos incrustado allí. Es un formalismo de la imaginación el que nos permite con frecuencia adivinar lo que provisionalmente es inaccesible a la intuición y a la experiencia.

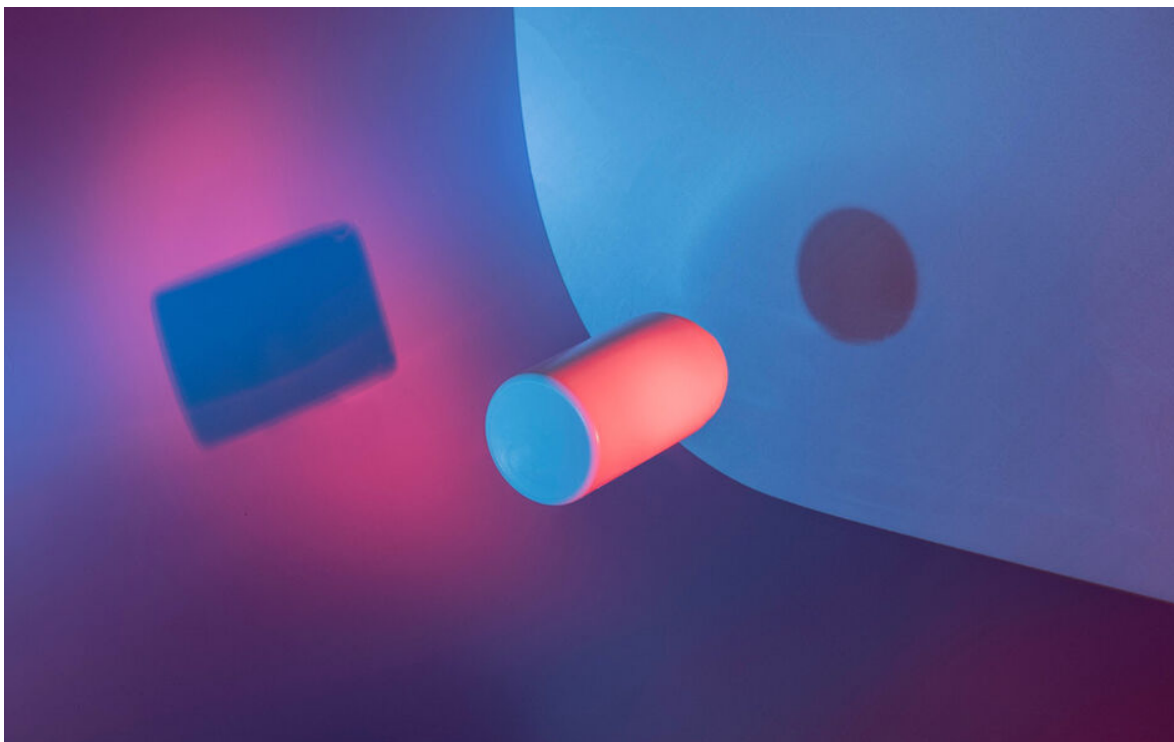
Provisionalmente o, en algunos casos, hasta inaccesible siempre a nuestro sentido común. El matemático comienza con problemas de teselado de formas geométricas sobre una superficie y termina trabajando en un [apilamiento de esferas](#) en veinticuatro dimensiones...

No creo que esto sea específico de nuestra disciplina. En biología, uno puede preguntarse si existen formas de vida que no reposen sobre la materia orgánica tal y como la conocemos. En física, uno puede preguntarse a qué se parece un universo fundado sobre otros parámetros o que es un fluido que chorrea en ocho dimensiones. La matemática provee un formalismo que transforma o amplía conceptos, objetos o propiedades para imaginar otros mundos; algunos de ellos terminarán por producirse en lo real y otros seguirán siendo todavía totalmente abstractos. Las redes de esferas en dimensión veinticuatro, por muy inaprensibles que sean para nuestro sentido común, son cuidadosamente observadas por los expertos informáticos por sus aplicaciones potenciales a los códigos correctores de error... Y a la inversa, hay investigación sobre conjuntos de números con propiedades muy extrañas que por el momento no tienen ninguna aplicación concreta.

¿Las matemáticas consideran el mundo en tanto que lo trascienden, como lo hace cualquier arte finalmente?

Las tres cualidades cardinales del matemático son la imaginación, la tenacidad y el rigor. Y en este orden. La imaginación es la cualidad más importante. Aquí veo una fortísima analogía con la poesía que recrea un mundo, a vez imaginario y más verdadero que el natural, sobre la base de impresiones sensibles, de intuiciones y de reglas propias, a veces muy estrictas como la versificación clásica. Como lo dijo un día **Léopold Sédar Senghor** <el poeta-presidente senegalés> en un tono de chascarrillo, ¡las matemáticas son la poesía de las ciencias!

Traducido por Luis Alfonso Paláu, Envigado, co, julio 27 de 2026



Entrevista

Michel Bitbol: “La física cuántica cuestiona todo lo que creíamos saber sobre lo que es una ciencia y sobre lo que es la naturaleza”

[Michel Bitbol](#), realizada por Arthur Hannoun y publicada el 29 de enero de 2022

La mecánica cuántica, en general, conduce a tres imágenes muy simples: [un gato entre la vida y la muerte](#), a minúsculos pedazos de materia y a un gran número de debates sobre la naturaleza de nuestro mundo. Quizás este sea un buen comienzo, pero [Michel Bitbol](#), especialista en el asunto y en filosofía de las ciencias, nos respondería que esto no es suficiente. En efecto, nos equivocaríamos si nos atuviéramos solo a esto... Autor de muchas obras sobre la filosofía de la física, del conocimiento y del espíritu –entre las cuales le muy aclaradora *Mécanique quantique. Une introduction philosophique* (Flammarion, coll. Champs, 1996) –, con una rara claridad que el investigador y epistemólogo nos explica el sentido del giro científico y filosófico que constituyó la « revolución cuántica ». ¡Que les aproveche!

¿Qué definición de la física cuántica le daría Ud. a un neófito?

Michel Bitbol: Le diría que la física cuántica es uno de las más profundas paradojas filosóficas de los tiempos modernos. Esta rama de las ciencias físicas

permite revelar recursos insospechados de la naturaleza a escala microscópica, y de sacar partido de ello con una eficacia sin igual. Pero simultáneamente ella cuestiona todo lo que creíamos saber sobre lo que es una ciencia, y sobre lo que es la naturaleza. La física cuántica ha dado nacimiento a los láseres, a los diodos electroluminiscentes (LED), a los microprocesadores y a las pantallas de nuestros teléfonos portátiles, a imanes superconductores de la producción de imágenes por resonancia magnética nuclear (IRM), a los computadores cuánticos, que abren perspectivas sin precedente a la inteligencia artificial, a los relojes atómicos de los GPS que nos orientan en las ciudades o por las carreteras... y a tantas otras aplicaciones inscritas en nuestras vidas cotidianas. Sin embargo, la física cuántica suscita un debate que renace permanentemente sobre su interpretación. «*¿Cómo puede ser el mundo lo que la teoría cuántica dice de él?*», se pregunta **Richard Healey**. ¿Cómo comprender el extraño mundo que pretende representar la teoría cuántica, con sus evanescentes «[ondas de probabilidad](#)», su «[no-separabilidad](#)», sus partículas indiscernibles, sus [superposiciones de estados](#) que parecen dejar a los gatos medio-muertos y medio-vivos? Pero también, de forma más perturbadora: ¿esta teoría física ofrece *verdaderamente* una representación del mundo? Por lo demás Healey escribe al respecto: «*Puede ser que la verdadera radicalidad de la teoría cuántica es que ella no precisa cómo es el mundo.*» Podría ser incluso que no existiera un mundo completamente exterior a nosotros, que se prestara a la representación. Quizás la física cuántica sólo enseñe una cosa que quien sepa entenderla: que el mundo es tal que sería vano buscar cómo sería independiente de nosotros.

**Todo el mundo tiene en la cabeza, a propósito de la mecánica cuántica, la célebre experiencia de pensamiento llamada del “gato de Schrödinger”.
¿Cuál es esa apuesta?**

Los estados cuánticos de los objetos microscópicos están generalmente «superpuestos» – indecisos, de alguna manera. Cuando un garo cae bajo la influencia de una máquina microscópica que pone su vida en peligro, su estado cuántica se intrinca con el de la fastidiosa maquinac, y se vuelve superpuesto a su vez. Pero, se pregunta Schrödinger: ¿se puede verdaderamente admitir que «*el gato vivo y el gato muerto están mezclados o embrollados en proporciones iguales*»?

¿Qué sucede con la filosofía de la física cuántica?

La filosofía de la física cuántica es una disciplina filosófica particularmente rica y multiforme. Alía **la epistemología**, en el sentido de una teoría del conocimiento, **la ontología**, en el sentido de una reflexión sobre lo que es, y **una práctica reflexiva de la física** propiamente dicha, que consiste en examinar los fundamentos de la teoría, y luego probarlos experimentalmente. El filósofo de la física se pregunta ante todo qué género de *conocimiento* se obtiene por medio de las teorías cuánticas. ¿Se obtiene un avance hacia las estructuras de la realidad «en sí misma»? ¿Logramos una descripción matemática unificada de

los fenómenos a escala atómica y subatómica? ¿O simplemente estamos logrando un procedimiento de cálculo para evaluar la probabilidad de los resultados que encontramos cuando interactuamos experimentalmente con un medio microscópico inaprensible? El filósofo de la física cuántica se pregunta entonces cómo deben *ser* las cosas que componen la naturaleza, para que sean predichas por una teoría tan desconcertante como la mecánica cuántica. Es casi seguro, como lo remarcaba **Maurice Merleau-Ponty**, que la física cuántica lo único que nos permite hacer es « *descubrimiento filosóficos negativos* » al respecto: ella sólo nos informa aquello que *no* son las cosas que se estudian. Pero saber lo que *no se puede* de la naturaleza es ya una enseñanza preciosa. Tomemos un ejemplo, tal vez el más célebre. Se trata de la [intrincación](#), o no-separabilidad, de los estados cuánticos, que **Schrödinger** describió así cuando la descubrió en 1935: « *El mejor conocimiento posible del todo no implica necesariamente el mejor conocimiento de las partes.* » Las investigaciones llevadas a cabo sobre este asunto han permitido derivar numerosos teoremas que muestran que la naturaleza *no está* de acuerdo con nuestros prejuicios plurimilenarios: ella *no está* hecha de entidades separadas, individuales, dotadas de propiedades intrínsecas estrictamente locales, como nos lo explica el filósofo-físico **Bernard d'Espagnat** en [À la recherche du réel](#) (Dunod, 2021). Dándole vuelta a esta lección negativa buscando un enunciado positivo, los investigadores han supuesto entonces que se requería « *pensar todo en términos de relaciones* » (**Carlo Rovelli**, [Helgoland. Le sens de la mécanique quantique](#), Flammarion, 2021). Además, algunos filósofos de la física cuántica no se contentan con reflexionar sobre la física cuántica. Ellos se adentran hasta el detalle de su formalismo, con la esperanza de derivar de ello consecuencias que develarían su sentido. Por ejemplo, algunos físicos-filósofos (de **Lucian Hardy** a **Giulio Chiribella**) han buscado mostrar cómo se puede reconstruir la teoría cuántica a partir de primeros principios (**Alexei Grinbaum**, « *Reconstruction of quantum theory* », 2007). Otros, en particular **Hans-Dieter Zeh & Erich Joos**, han contribuido indirectamente a las aplicaciones prácticas de la física cuántica, edificando su [teoría de la descoherencia](#). Esta teoría ha sido pensada inicialmente con el fin de responder a una pregunta filosófica: ¿cómo asegurar el acuerdo entre la superposición cuántica a pequeña escala, y la determinación clásica a gran escala? Dicho de otro modo, para utilizar una alegoría célebre, ¿cómo asegurar la compatibilidad entre el estado semi-muerto, semi-vivo, de un « gatico de Schrödinger » hecho de una o dos partículas, y el estado *ora* muerto, *ora* vivo, de un verdadero gato a nuestra escala? Pero la teoría de la descoherencia desbordó luego el campo de la filosofía para volverse uno de los pilares de la nueva tecnología del ordenador cuántico. Su estudio sobre fotones aislados le valió el premio Nobel de física en 2012 a **Serge Haroche** & a **David Wineland**.

Los creadores de la física cuántica ¿se planteaban ya preguntas sobre el alcance filosófico de sus teorías/descubrimientos?

Entre los creadores de la física cuántica, el pensamiento filosófico es el terreno de su germinación teórica. Viene antes de la teoría, más bien que como una

reflexión posterior. Es suficiente con pensar en el itinerario intelectual de **Werner Heisenberg**, reportado en su libro autobiográfico [La Parte y el Todo](#). Largas discusiones con **Niels Bohr** y **Wolfgang Pauli** sobre las imágenes del átomo, retrogradadas al rango de simple utilería mental, y sobre los enfoques operacionalistas de la ciencia, lo han preparado para la voltereta magistral de su nueva mecánica cuántica de 1925. Su gesto fundador es lo que se llama « *la reducción a los [observables](#)* ». Heisenberg renunció a aplicar una matemática continua a los movimientos (inobservables) de los constituyentes del átomo. En lugar de esto, concentró su atención en las solas cantidades observables que son las frecuencias discretas [*en el sentido matemático, por oposición « continuas »*], es decir « cuantificadas », de emisión de irradiación por el átomo; y les aplicó una matemática discontinua, derivada de la [teoría de matrices](#). Casi simultáneamente, Erwin Schrödinger elaboró una teoría que compite, que se reveló equivalente a la de Heisenberg: la [mecánica ondulatoria](#). El gesto inaugural de Schrödinger fue reemplazara, en sus modelos, una moriada de elementos separados por un solo continuum vibrante. Esta idea le fue inspirada por su vasta cultura filosófica, dominada por las concepciones post-kantianas de Schopenhauer, y por las filosofías no-dualistas de la India. En cuanto a Niels Bohr, su comprensión de la teoría cuántica, de la que fue uno de sus primeros fundadores, recibió una marca poderosa de su profesor y amigo, el filósofo danés **Harald Høffding**. Le debe en particular su concepción de la « complementariedad » entre representaciones mutuamente incompatibles (como [las de la onda y del corpúsculo](#)). En nuestros días la ósmosis físico-filosófica es sin duda mucho menos universal – algunos incluso, como el premio Nobel de física de 1979 **Steven Weinberg**, la han criticado incluso abiertamente – pero sigue siendo fecunda en numerosos círculos de reflexión. Pensamos en Carlo Rovelli, quien se declara influido por la [Monadología](#) (1714) de **Leibniz**, y por la filosofía relacional del pensador indo-búdico del siglo II° **Nāgārjuna**. Pensamos igualmente en **Christopher Fuchs**, cuyo « [bayesianismo](#) cuántico » (« [QBism](#) » en su acrónimo inglés) alía el pragmatismo y el empirismo radical de **William James**, con la filosofía probabilista del estadígrafo italiano **Bruno De Finetti**. Pensamos además en los equipos experimentales que han recibido su inspiración de una reflexión de filósofo, como la de **Alain Aspect** que trabaja de la mano de Bernard d’Espagnat, o la de **Anton Zeilinger** (en Viena) asociada al filósofo-físico austro-serbio **Časlav Brukner**. Para la vanguardia de los físicos cuánticos, la filosofía no es decididamente más que un « suplemento de alma »... Frecuentemente yace en el corazón de su actividad creadora, casi tanto como en el siglo XVII, cuando se efectuaba una reflexión semi-especulativa semi-experimental sobre el orden, los principios, y los constituyentes de la naturaleza con el nombre de « [filosofía natural](#) ».

¿Qué diferencia hace Ud. ente física clásica y física cuántica? La oscilación de la una a la otra ¿ha tenido un impacto en los envites filosóficos ligados a estas dos perspectivas?

El paso de la física clásica a la física cuántica, a comienzos del siglo XX, es considerado habitualmente como una « revolución científica »; pero se trata

también igualmente de una revolución filosófica. Para comprender el alcance de esta revolución integral del pensamiento humano, tenemos que regresar al siglo XVII, al advenimiento de la física galileo-newtoniana. Ya en aquella época no nos contentamos con mejorar conocimientos anteriores o con refinar la explicación de los procesos materiales. Lo que pasó fue que se cambió el sentido mismo de los verbos « conocer » y « explicar ». En física aristotélica, explicar los cambios de las cosas, era identificar en ellas la transición de la potencia al acto, y atribuir esta transición a un « primer motor inmóvil », a una causa última que es acto puro. Ya para **Descartes**, explicar el movimiento de los cuerpos, era sacar a luz su « mecanismo », es decir una secuencia de trayectorias, de impulsiones y de colisiones susceptibles de haberlo causado. Pero con **Isaac Newton**, la búsqueda de las causas de los procesos naturales es más o menos interrumpida; y va a ser reemplazada claramente por la formulación de leyes matemáticas que regulan la sucesión de los fenómenos medibles. De este modo Newton escribe en 1713: « *Todo lo que no se deduce de los fenómenos es una hipótesis. Las hipótesis metafísicas, físicas, mecánicas, o las cualidades ocultas no deben tener lugar en la filosofía experimental.* » De acá en adelante, explicar un fenómeno, es simplemente mostrar que él sucede a un fenómeno anterior de conformidad con una ley matemática general. La lección filosófica de esta primera gran mutación del concepto de ciencia ha sido brillantemente sacada por **Emmanuel Kant**. Según él, si la física ha cumplido las proezas que se le conocen, es porque ella abandonó el proyecto ilusorio de remontar por la razón hacia lo que son las cosas en sí mismas; y que ella supo contentarse con ponerle orden a los fenómenos experimentales por medio de reglas de sucesión, propuestas por adelantado por el entendimiento. La primera edición de su [*Crítica de la razón pura*](#) (1781) enuncia entonces el principio de causalidad en modo abiertamente newtoniano: « *Todo lo que sucede supone algo a lo que él sucede siguiendo una regla.* » La física cuántica se acompaña de una transformación aún más decisiva del concepto de ciencia. Superficialmente no difiere de la física clásica más que por algunas características [cinemáticas](#) inéditas, y por asociaciones barrocas de imágenes incompatibles. Las transiciones de un estado a otro se efectúan de aquí en adelante por « [saltos cuánticos](#) » más bien que continuamente; las leyes de sucesión son indeterministas más bien que deterministas; y las representaciones ondulatorias y corpusculares están inextricablemente mezcladas en la descripción de los fenómenos. Pero, más fundamentalmente, la física cuántica se atreve a desafiar el presupuesto según el cual los investigadores científicos pueden definir su objeto, ponerlo ahí delante de ellos (según la etimología de la palabra « objeto »), luego estudiarlo como si fuera enteramente distinto de ellos así como de sus métodos de observación. Y, por otra parte, la física cuántica trastorna como nunca el concepto de explicación, haciéndolo desplazar hacia la probabilidad de los fenómenos más bien que sobre la regla (que desaparece) de su sucesión. Como lo subrayan Richard Healey y Christopher Fuchs, la teoría cuántica no explica por qué aparece un fenómeno experimental; ella explica más bien por qué el investigador debe asignarle tal probabilidad, con el fin de ser coherente en su sistema de previsiones.

“¡Dios no juega a los dados!”: ¿cómo explicaría Ud. el debate entre Einstein y Bohr sobre el supuesto determinismo del universo?

Testigos reportaron la sabrosa réplica de Bohr a esta célebre afirmación de Einstein: « *Albert, ¡no le digas a Dios lo que debe hacer!* » Estas pintorescas frases señalan que la cuestión del determinismo fue planteada en [nuevos términos](#) por la física cuántica, y que sus protagonistas estaban [lejos de ponerse de acuerdo](#) sobre las conclusiones que había que sacar del asunto.

Indudablemente, la teoría cuántica no rige sino las *probabilidades* de los fenómenos, y no su sucesión determinada. Indudablemente, también, uno de los pilares de la teoría cuántica es el [principio \(las relaciones, las desigualdades\) de « indeterminación » de Heisenberg](#). Este principio limita de manera estricta la precisión con la que se puede fijar los valores de una pareja de variables como la velocidad y la posición, que caracterizaban en física clásica la trayectoria de las partículas materiales. En 1927, en el primer artículo en el que la enunció y demostró, Heisenberg llegó hasta declarar que ese principio significa el final de la causalidad. Oponiéndose a esta tesis de Heisenberg y Bohr, Einstein dice estar convencido de que los rasgos indeterministas de la teoría cuántica no podrían pertenecer a la naturaleza misma (vista desde el « *punto de vista de Dios* »), sino que sólo traducen un déficit de nuestras informaciones a su respecto. Según él, la teoría cuántica sólo es la descripción a grandes rasgos, y por tanto incompleta, de una gran cantidad de procesos naturales sub-yacentes que *deben* estar gobernados individualmente por leyes deterministas. Ella *debe* por tanto reunirse con la mecánica estadística clásica, que describe toscamente, a gran escala, procesos moleculares deterministas demasiado numerosos y supremamente pequeños como para ser estudiados uno por uno. Einstein estaba persuadido de que, a la manera de la mecánica estadística clásica, la teoría cuántica expresa un defecto de conocimiento, más bien que un rasgo de la naturaleza en sí misma. Y si así es, deberíamos en particular considerar las desigualdades de Heisenberg como relaciones « de incertidumbre » (*nuestra incertidumbre*), más bien que como relaciones « de indeterminación » (de la *naturaleza*). En verdad, lo que no estaba viendo bien Einstein, era que, bajo la presión de la física cuántica, Bohr y Heisenberg lo que hicieron fue disolver la dualidad misma del « nosotros » y de « la naturaleza », del sujeto y del objeto. Como lo escribe el filósofo **Ernst Cassirer** en *Determinismo e indeterminismo en física moderna* (1956), « *Heisenberg parte de la constatación de que los enunciados de la física tienen un carácter relativo, en tanto ellos expresan el estado de las cosas observadas, no ‘en sí mismas’, sino en relación con los medios de observación utilizados* » [ver también la [paradoja de Wigner](#)]. En estas condiciones, los rasgos probabilistas e indeterministas de la física cuántica no hay porque atribuirlos ni a lo que es la naturaleza independientemente de nosotros, ni a la sola imperfección de nuestros medios de conocimiento. Ellos derivan del hecho primordial de que la naturaleza es indisociable de lo que nosotros hacemos con ella para explorarla..



[Intervention](#)

¿Estamos en pleno “dé-lire” “des-leer”/delirio? Entrevista con el neurólogo Lionel Naccache

[Lionel Naccache](#), publicado el 25 de febrero de 2026

La revolución digital modificó radicalmente nuestra relación con lo escrito, pero ¿en qué sentido? ¿Y con qué impacto sobre nuestras capacidades cognitivas? El neurólogo Lionel Naccache es razonablemente optimista. ¡Y es regocijante!

¿Cuáles son los impactos de la revolución digital, en la que estamos profunda y perdurablemente inmersos, sobre nuestra identidad de « lector-redactor » que vino a sustituir la de « cazador-recolector » que prevaleció durante tanto tiempo? A esta pregunta urgente, pero bien delicada de tratar sin caer en la ideología (tanto progresista como reaccionaria) o en un pensamiento « preconcebido » que sabe por adelantado hacia dónde la conducen sus pasos, me parece útil comenzar por cuatro consideraciones no exhaustivas.

La invención de la escritura: un precedente que ayuda a pensar una revolución inédita

Una manera de tratar de tomar distancia frente al presente tal vez consista en echar acá una mirada a una revolución tecnológica y cultural al menos tan masiva como la que vivimos actualmente, y que fue lo que la hizo posible; estamos hablando de la invención de los sistemas de lectura-escritura hace aproximadamente 6.000 años, y luego su lenta generalización que transformó la inmensa mayoría de las sociedades humanas en sociedades del escrito. Desde el punto de vista cognitivo y cerebral, esta primera revolución del escrito conlleva una paradoja aparente: ¿cómo conciliar, por una parte, la aparición de facultades cognitivas nuevas (leer y escribir artefactos simbólicos inventados por el hombre y transmitidos por medio del aprendizaje socializado) y, por otra parte, la persistencia de un cerebro humano incambiado en el nacimiento, debido a la escala temporal en la que se desarrolla la evolución biológica de nuestros cerebros, que se mide en cientos de miles de años? Esta paradoja puede ser resuelta por medio de la teoría del reciclado neuronal propuesto por **Stanislas Dehaene** en *El cerebro lectores* (Odile Jacob, 2007, Buenos Aires: Siglo XXI, 2014^{**}): estos saltos de capacidad cognitiva reposarían en el reciclado cultural y socializado de redes cerebrales especializadas desde la noche de los tiempos para funciones cognitivas cercanas de la lectura. Por ejemplo, nuestro viejo cerebro de primate dispone de una vía de tratamiento cerebral de una eficacia tremenda para identificar los diferentes objetos de la escena visual. Esta vía de tratamiento cerebral está organizada en muchas regiones de la corteza que representan la escena visual en diferentes niveles que ganan progresivamente en abstracción. De paso anotemos que, la invención de las arquitecturas de la IA de tipo *Deep Learning* ha sido

^{**} < “Tenemos la suerte de que Stanislas Dehaene, el máximo referente de las neurociencias del lenguaje, sea además un escritor increíble. Sabe reunir lo cognitivo, lo cultural y lo neurológico en un relato delicioso y atrapante. Una obra reveladora.” dice Oliver Sacks de este libro. Ustedes están leyendo esta presentación como si fuera lo más natural del mundo. Todos damos por hecho que un conjunto de marcas, líneas y espacios sobre el papel significan algo y tendemos a olvidar que el acto de leer es una auténtica hazaña. Más asombroso resulta si consideramos que leemos usando un cerebro que evolucionó mucho tiempo antes de que se inventara la escritura, y lo hizo para fines completamente diferentes. Stanislas Dehaene, uno de los líderes mundiales en neurociencia cognitiva, desentraña esta inquietante paradoja y nos enseña cómo nuestro cerebro de primates logra traducir esos signos llamados letras en lenguaje. Recorriendo los últimos descubrimientos de la psicología de la lectura y los más sorprendentes hallazgos de las neurociencias, Dehaene responde con absoluta maestría a las preguntas centrales sobre esta deslumbrante habilidad humana: ¿cómo es posible que un invento cultural reciente se haya instalado con tanta naturalidad en nuestro cerebro? ¿Qué operaciones realizamos para convertir un conjunto de trazos aprehendidos por nuestro sistema visual en conceptos y sonidos? ¿Son estas operaciones universales o dependen de la lengua, el alfabeto o la cultura? ¿Cómo hacen los niños, o más bien sus cerebros, para aprender a leer? ¿Da igual qué sistema de enseñanza se utilice? ¿Qué es la dislexia y cuáles son sus causas? ¿Es posible superarla? El cerebro lector es un relato a la vez fascinante y riguroso en el que tanto simples curiosos como especialistas en el tema encontrarán todo lo que hoy se sabe sobre lo que ustedes están haciendo en este preciso momento: leer. La editorial>

explícitamente imaginada inspirándose en esta arquitectura neuronal (*Quand la machine apprend. La révolution des neurones artificiels et de l'apprentissage profond*, de **Yann Le Cun**, 2019).

Al comienzo, en el córtex visual calificado de « primario » (V1), un primer mapa cerebral codifica la escena observada bajo la forma de contrastes luminosos que golpean nuestras retinas. A través de una serie de capas de tratamiento sucesivos e interconectados, los mapas cerebrales que tratan la información última (estamos hablando del cortex infero-temporal) se representan los objetos de la escena visual independientemente de numerosos parámetros calificados de « bajo nivel » tales como su posición en nuestro campo visual, su tamaño o su orientación. Es esta vía visual llamada « ventral » la que nos permite identificar un paraguas, un rostro, una chimenea o un sombrero. Según la teoría del reciclado neuronal, algunas regiones de esta vía cortical van a ser sutilmente modificadas por los efectos del aprendizaje con el fin de codificar esos nuevos objetos visuales simbólicos que son las palabras.

Es así como hemos descubierto, desde el año 2.000, que una de esas regiones de la vía ventral produce representaciones abstractas de la forma visual de una palabra independientemente del tamaño de la palabra, de su posición en el campo visual, de la caja tipográfica utilizada para escribirla et de muchos otros parámetros llamados de « bajo nivel ». Nótese que este descubrimiento va a permitir darle carne a una predicción de las teorías cognitivas de la lectura: esa de la existencia de un nivel de representación visual abstracto de la forma de las palabras. A esa región la habíamos bautizado « Visual Word Form Area » (VWFA). Este reciclado de un circuito visual que había evolucionado desde hacía millones de años con el fin de hacerlo apto para reconocer nuevos objetos visuales ilustra muy bien la plasticidad cerebral y cognitiva. De manera interesante, este reciclado imprime igualmente sutiles modificaciones que tienen que ver con un « desaprendizaje » de la función original: por ejemplo, esta vía visual permite identificar un tigre, ya sea que venga de la izquierda de su campo visual o de la derecha. Esta invariancia para una simetría en espejo es muy cómoda para interactuar con objetos naturales, pero va a plantear dificultades para distinguir letras que son imágenes en espejo la una de la otra (una « p » y una « q », una « b » y una « d ») en un sistema de escritura dado. La observación de los errores de lectura y de escritura de los niños en CP ilustra en tiempo real el reciclaje neuronal: la confusión entre estas letras va a durar el tiempo que ¡opere al hilo del aprendizaje! la pérdida de esta invariancia para la simetría en espejo de las letras.

En suma, disponemos de recursos cerebrales y cognitivos que pueden permitir desplegar nuevas capacidades en los límites razonables de su proximidad con nuestras capacidades previas, y bajo los efectos de aprendizajes culturales socializados. Esta plasticidad cerebral podría ayudarnos a pensar el paso de la tableta de arcilla en cuneiforme... a la tableta digital que bombardea nuestras retinas. Señalemos sin embargo que este rico concepto de plasticidad cerebral a veces es deformado y utilizado al exceso en una lógica de promoción de una

concepción neoliberal de la sociedad: pretender justificar, de manera caricaturesca e incorrecta, la necesidad que tendría cada individuo de adaptarse a toda suerte de constreñimientos (profesionales, sociales, políticos), para no hablar de transformar esta apología de la sumisión en virtud.

Dibújame una palabra, ¿un futuro viejo recuerdo?

Hace algunos años des collègues paleógrafos parisinos me contaron una anécdota divertida: solicitados por un equipo de investigadores norteamericanos, ellos tuvieron la sorpresa de constatar que su experticia era requerida no para descifrar manuscritos medievales europeos, sino para descifrar una escritura manuscrita del siglo pasado ¡que no lograban leer! Nuestro abandono de la grafía manual en provecho de la lectura y de la escritura normativas con las tipografías de caracteres digitales uniformizadas ¿ha tenido consecuencias sobre nuestra relación con las palabras escritas? Desde 1881, el neurólogo vienés **Exner** había hecho la autopsia del cerebro de enfermos que presentaban una **agrafia** (un déficit en la capacidad para escribir manualmente palabras) y había descubierto la implicación de una región que desde entonces lleva su nombre: el área de Exner. Una lesión en esta región de la corteza premotora causa con frecuencia una agrafia más o menos severa. Luego, un conjunto de estudios en neuro-imágenes funcionales demostró que esta región se activa en modo automático cuando se leen palabras escritas. Y hay un hecho crucial, en el niño que aprende a leer, esta región parece jugar un rol notable en el desarrollo de su experticia de lector y en el reciclado de la región de la forma visual de las palabras que hemos descrito. Estas dos regiones están interconectadas y él mostró que la adquisición de la lectura se facilita cuando los chicos pequeños aprenden a escribir o a trazar las formas de las letras con los dedos. Una vez se adquiere esta experticia de lector, la implicación de la región de Exner –y con ella la cualidad de nuestro grafismo– deja de jugar ese papel clave en la lectura. Lo que explicaría de paso el resultado inicial de Exner: en el adulto lector, la destrucción de esa región no molestaría la lectura, sino únicamente la escritura.

No hay que dudarlo: el uso bien práctico de los teclados no nos debe llevar a privar a los niños del aprendizaje del grafismo de escritura, de la misma manera que aprendemos los fundamentos de las operaciones básicas de la aritmética antes de recurrir a nuestras calculadoras.

No saber ya leer... pero sin saberlo

Afortunadamente consideramos amplio el conjunto de los lectores expertos que han tenido la fortuna de escapar tanto del analfabetismo (« *no saber ni leer ni escribir* » según el diccionario de la Academia de la lengua) como del iletrismo (« *incapacidad de leer un texto simple y comprenderlo* »), y nos vamos a atrever a hacer la siguiente pregunta provocativa: en la mayor parte de nuestras acciones de lectura cotidianas sobre una pantalla ¿realmente

leemos cuando pensamos leer? El precioso contraste entre, por una parte, la asimilación estadística de un corpus de textos por parte de un LLM tal como ChatGPT y consortes y, por otra parte, la lectura de un texto por un *Homo sapiens*, permite aislar una componente preciosa: la experiencia subjetiva consciente del lector humano. Por esto, leer verdaderamente un texto escrito no se limita solamente a las componentes instrumentales que sin embargo son indispensables para toda lectura, que son particularmente: el reconocimiento experto de la forma visual de las palabras, el acceso lexical y semántico, así como el análisis sintáctico. Evidentemente que todo esto es absolutamente necesario a lo que se entiende por lectura, pero no es suficiente.

De una cierta manera, la verdadera odisea de la lectura –de toda lectura– comienza más allá de este primer tiempo en el que numerosas etapas pueden por lo demás operar de manera no consciente. Leer no se limita a acceder al contenido informacional intrínseco de una frase (« *El gatico está muerto* »): leer comienza en el momento de la colisión entre ese contenido al que accedemos conscientemente y nuestra representación subjetiva de nosotros mismos y del resto del mundo. En mi ensayo *Perdons-nous connaissance?* (Odile Jacob, 2010), yo resumí la experiencia del conocimiento por medio de la fórmula XYX' , en donde X se refiere al estado de esa representación subjetiva del mundo (aquí la del lector) antes de su colisión con una información Y (aquí una frase o un texto), y en la que X' describe la transformación de X. Leer no se limita pues a representar la frase leída, sino a vivir la experiencia de la transformación subjetiva engendrada por este encuentro. En esta perspectiva, leer verdaderamente un texto consistiría en hacer posible ese encuentro, más allá del simple desciframiento –incluso experto– de una palabra o de una frase.

Esta lectura rica requiere sin embargo muchos otros ingredientes: la posibilidad de mantener focalizada duraderamente su atención en el texto; la existencia de períodos de tiempo libre a lo largo de esta lectura, de divagaciones en las que dejamos a nuestro espíritu que gambetea todo conservando en un segundo plano mental el texto leído (« *mind wandering* »), de las asociaciones libres nacidas de este encuentro, la evocación de recuerdos, de las fantasías y de las resonancias entre esas frases leídas y todo lo que somos nosotros. Esta versión « premium » de la lectura no es evidentemente requerida en todos nuestros actos de lectura: nos la podemos economizar si lo que hacemos es la lectura estrictamente utilitaria de las instrucciones de manejo de la lavadora. Y sin embargo, algunos autores como **Perec**, nos han mostrado cuán brillante puede resultar entregarse a la tarea, incluso en este caso.

Si evidentemente esta versión rica de la lectura se puede vivir frente a un texto mostrado por la pantalla de un teléfono portátil, de una tableta o de un ordenador, forzoso es también constatar que muchos de los ingredientes que hemos venido citando faltan muy a menudo en los llamados del teléfono: la lectura compulsiva e impulsiva de miríadas de mensajes cortos, notificaciones o *posts* –con frecuencia venidos en imágenes y con sonido– que bombardean

nuestros córtex nos alejan evidentemente de estos encuentros entre nosotros el texto. En alguna parte entre un egotismo petrificado que sale incambiado de una lectura pobre (XYX) y un embrutecimiento des-subjektivante bajo los efectos de los *punchs* y de *uppercuts* digitales (xYx), terminamos alejándonos del XYX' que nos parece que constituye la experiencia de la lectura... frecuentemente sin que lo sepamos. Especie de burgueses gentileshombres invertidos (y quizás no menos ridículos), a veces estamos bajo el dominio de esta extraña condición: antes que « *hacer prosa sin saberlo* », nosotros ya no leemos verdaderamente... ¡sin saberlo! O más bien sin darnos cuenta. Una lectura rica y profunda sin embargo no tiene por qué ser incompatible para nada con nuestro universo digital (¡muy por el contrario!): ella exige tomar plena consciencia de todos los ingredientes necesarios, y de darse los medios para reunirlos.

Una frontera vaga entre lo oral y lo escrito

Last but not least <lo último pero no lo menos importante>, una de las especificidades de nuestra relación actual con el lenguaje tiene que ver, me parece, con el desvanecimiento de la frontera, antaño clara, entre la palabra viva oral y el texto escrito fijado, variación sobre el *verba volant scripta manent* (« *las palabras se las lleva el viento, las escritas permanecen* »), que ya hoy no resuena tan evidente. Escuchar un texto escrito, o leer una palabra hablada –y recíprocamente– se han vuelto situaciones masivamente banales en nuestras peregrinaciones cotidianas con nuestros instrumentos de comunicación digitales. Más allá de una tendencia a la indiferenciación entre lo oral y lo escrito en la recepción, es legítimo interrogarse sobre un riesgo de indiferenciación comparable en la producción de estas dos modalidades de enunciación: cuando decir es escribir, y vice versa. La coexistencia de estas dos modalidades de nuestra relación con el lenguaje me parece sin embargo extremadamente preciosa, sin que por lo demás haya que considerar a una de las dos más importante que la otra. Tomar consciencia de este riesgo de flotamiento entre lo oral y lo escrito nos podría permitir no solamente ganar en lucidez frente a nuestra condición presente, sino igualmente poner en operaciones soluciones para preservar esta coexistencia diferenciada.

Entonces... ¿estaremos ya en pleno « des-leer », o tenemos todavía la posibilidad de continuar viviendo experiencias de lectura auténticas y ricas? Espero que en su humilde medida, estas pequeñas palabras escritas hayan podido suscitar en Ud. una experiencia de tío XYX', lo que, más allá del placer que me daría, tendería a sugerir que leer es no solamente aún posible, sino que esta posibilidad está al alcance de la mano, o ¡más bien de nuestro cerebro!

Traducido por Luis Alfonso Paláu, Envigado, co, julio 29 de 2026



Entrevista

El “J-Space” de Claude o cómo la IA se pone a parecerse a la consciencia

Lionel Naccache, conversación tenida con [Martin Legros](#), publicada el 22 de julio de 2026

Los investigadores de Anthropic han integrado a Claude, su modelo de lenguaje, una modelización de la consciencia en forma de « *espacio de trabajo neuronal global* » elaborado por los neurocientíficos, con primeros resultados muy halagadores. **Lionel Naccache**, quien participó en este experimento, nos explica.

¿Puede Ud. explicarnos la modelización de la consciencia que Uds. han elaborado y que ha servido de base para el experimento de Anthropic?

Lionel Naccache: La teoría del espacio de trabajo neuronal global [*Global Neuronal Workspace, ou GNW*] que hemos elaborado con **Stanislas Dehaene**, **Jean-Pierre Changeux**, **Claire Sergent** y yo, reposa sobre una propiedad fundamental de la consciencia subrayada ya por **Bernard Baars** desde finales de los años 1980: la « *disponibilidad cognitiva* ». Cuando tomamos consciencia de una percepción, de un recuerdo o de un sentimiento, se vuelve inmediatamente accesible al conjunto de nuestras facultades cognitivas de alto nivel. Entonces se lo puede nombrar, se lo puede recordar, sacar de él una

decisión. La toma de consciencia corresponde al paso de un espacio no consciente, especializado, « modular », hacia un espacio consciente global: el espacio de trabajo neuronal. La entrada de una representación mental en el espacio de trabajo global consciente explicaría su disponibilidad cognitiva. Nosotros hemos propuesto una versión neuronal de esta propiedad cognitiva.

En el curso de su experimento, los investigadores de Anthropic han visto aparecer un “espacio de trabajo” análogo donde la plataforma Claude parece almacenar representaciones de alto nivel que le permitirían asegurar el funcionamiento de sus operaciones...

El enfoque original desarrollado por el equipo de **Jack Lindsey** de Anthropic reposa sobre un método matemático elegante [*la lupa jacobina basada en una herramienta matemática llamada la matriz de Jacobi*]: permite identificar las representaciones de palabras únicas latentes, los « *tokens* » del vocabulario del LLM (gran modelo de lenguaje), que son elaboradas en cada una de las decenas de capas sucesivas de la red y que influyen la respuesta final legible sobre la última capa. Es así como descubrieron el « J-Space » [« *J* » de *Jacobi*]. De acá se desprenden cuatro resultados principales.

Primero, este J-Space es identificable en las capas intermediarios del LLM, a imagen de lo que ocurre en el espacio de trabajo neuronal global qui reside en las regiones asociativas del córtex y no en las regiones sensoriales o motrices. Segundo, las palabras activadas en este J-Space presentan una flexibilidad evocadora de una forma de disponibilidad cognitiva. Tercero, cuando se sondea las relaciones internas del LLM, sus respuestas parecen presentes en el seno del J-Space, que parece pues contener una especie de discurso reflexivo. Cuarto, es posible intervenir en el J-Space, ya sea sustituyendo una palabra por otra, ya sea procediendo a una ablación de elementos del J-Space: perturbaciones estas que permiten distinguir las performances del LLM que resisten a esas perturbaciones de aquellas que desaparecen. Esas lesiones del J-Space no afectan las tareas automáticas del LLM como, por ejemplo, la traducción de una lengua a la otra, pero específicamente las tareas estratégicas de alto nivel. Y hay un hecho interesante: este J-Space emergió en la fase de entrenamiento sin instrucciones explícitas.

Vertiginoso, este resultado parece hacer emerger el equivalente de una consciencia en el sentido funcional del término.

La arquitectura funcional del J-Space presenta propiedades a veces próximas de la del GNW. Sin embargo subsisten numerosas diferencias: el LLM no tiene cuerpo, ni memoria episódica, ni espontaneidad... Y aquí tenemos los tres ingredientes fundamentales para la emergencia de un Sí mismo consciente. Además, el funcionamiento de un LLM está desprovisto de una propiedad esencial: la recurrencia. En un cerebro, la consciencia requiere una doble circulación de las informaciones entre las regiones que están organizadas de manera jerárquica: una circulación ascendente (*bottom-up*) y una circulación

descendente (*top-down*). Ahora bien, el funcionamiento de LLM entrenado ya no es bidireccional y no presenta recurrencia. Si la cuestión de la « consciencia » de un LLM requiere que se tenga en cuenta estas similitudes y diferencias, este trabajo muestra que propiedades cognitivas específicas de la consciencia parecen emerger espontáneamente en algunos modelos de lenguaje por inteligencia artificial.

Traducido por Luis Alfonso Paláu, Envigado, co, julio 29 de 2026.

Le prochain ouvrage de Lionel Naccache, *Habeas corpus*, aparece en septembre de 2026 aux Éditions Odile Jacob. 240 p., 22,90€, [disponible ici en précommande](#).