

***CONVERGENCIA:***  
***Explorando las Fronteras de la Complejidad***

---

**Autor:** Pedro R. García Barreno  
Médico.  
Real Academia Española.  
Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.  
España.

c. e.: «[pgb@rae.es](mailto:pgb@rae.es)»  
«[www.pedrogarciabarreno.es](http://www.pedrogarciabarreno.es)»

---

El autor principal y único, Pedro Ramón García Barreno,

1. Declara, que en la confección de «*Convergencia: Explorando las fronteras de la complejidad*», se acogió a las buenas prácticas de calidad, privacidad y ética, teniendo como referencia el Código de Conducta y Buenas Prácticas que, para editores de revistas científicas define el Comité de Ética de Publicaciones (COPE) y de las revistas del CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España). Así mismo amplía estos criterios para alinearse y contribuir a los objetivos establecidos en la Declaración Mundial sobre la Educación Superior en el siglo XXI: Visión y Acción, particularmente con el artículo 2: Función ética, autonomía, responsabilidad y prospectiva.
2. Igualmente, se adhiere a la política de *Open Access*.

---

The main and only author, Pedro Ramón García Barreno,

1. Declares that in the preparation of *Convergence: Exploring the frontiers of complexity*, the good practices of quality, privacy and ethics were accepted, having as a reference the Code of Conduct and Good Practices that, for editors of scientific journals, defines the Committee of Ethics of Publications (COPE) and of the journals of the CSIC (Higher Council for Scientific Research of Spain). Likewise, it expands these criteria to align and contribute to the objectives established in the World Declaration on Higher Education in the 21st Century: Vision and Action, particularly with article 2: Ethical function, autonomy, responsibility and prospective.
2. Likewise, the author adheres to the *Open Access* policy.

---

Pedro R. García-Barreno  
Madrid, mayo 2023.

---



**Resumen:** La convergencia de las ciencias de la vida con campos que incluyen las ciencias físicas, químicas, matemáticas, computacionales, de ingeniería y sociales es una estrategia clave para abordar desafíos complejos y lograr soluciones nuevas e innovadoras. Sin embargo, las instituciones enfrentan una falta de orientación sobre cómo establecer programas efectivos, qué desafíos es probable que enfrenten y qué estrategias han utilizado otras organizaciones para abordar los problemas que surgen. Este consejo es necesario para aprovechar el entusiasmo generado por el concepto de convergencia y canalizarlo hacia las políticas, estructuras y redes que le permitirán alcanzar sus objetivos.

***Abstract:** Convergence of the life sciences with fields including physical, chemicals, mathematical, computational, engineering, and social sciences is a key strategy to tackle complex challenges and achieve new and innovative solutions. However, institutions face a lack of guidance on how to stablish effective programs, what challenges they are likely to encounter, and what strategies other organizations have used to address the issues that arise. This advice is needed to harness the excitement generated by the concept of convergence and channel it into the policies, structures, and networks that will enable it to realize its goals.*

---

**Palabras clave:** Dinámica de cambio. Tendencia a que corrientes separadas se unan. Integración.

**Keywords:** Dynamic of change. Tendency for separate streams to come together. Integration.

---

« *No estudiamos temas, sino problemas;*  
y los problemas pueden atravesar los límites  
de cualquier objeto de estudio o disciplina [...]»  
Somos estudiosos de *problemas*, no de disciplinas».   
(Karl R. Popper, 1902-1994)

La “convergencia” de las ciencias de la vida con campos que incluyen las ciencias físicas, químicas, matemáticas, computacionales, ambientales, ingeniería o sociales, es una estrategia clave, más allá de la interdisciplinariedad [ignora universidades, facultades y departamentos, para centrarse en grupos, laboratorios o centros- que plantean problemas complejos], para abordar desafíos enmarañados y lograr soluciones nuevas e innovadoras. Sin embargo, las instituciones enfrentan una falta de orientación sobre cómo establecer programas efectivos, qué desafíos es probable que aborden y qué estrategias han utilizado otras organizaciones para plantear los problemas que surgen. Ello es necesario para aprovechar las posibilidades generadas por el concepto de «convergencia» y canalizarlo hacia las políticas, estructuras, financiación y redes que permitirán alcanzar sus objetivos. La convergencia abandonó el campus universitario tradicional.

*¿Por qué la complejidad emerge durante la evolución?*

¿Que define la vida? ¿Cómo se originó la vida?  
¿Podemos construir células biológicas desde cero?  
Los parásitos, ¿son inevitables?  
¿Cómo surgieron las células biológicas complejas?  
¿Cómo surgió la multicelularidad y la muerte programada ?  
¿Podemos romper las barreras evolutivas relacionadas  
con el envejecimiento y la muerte?  
¿Qué define la conciencia y/o la inteligencia?  
¿Podemos construir una máquina consciente?

*¿Por qué la complejidad es importante para nuestro mundo?*

¿Cuál es el papel de la complejidad para la economía y la sociedad?  
¿Podemos lidiar con los puntos de inflexión?  
La IA, ¿ nos reemplazará?  
¿Cómo controlar la incertidumbre?

- ¿Puede la complejidad ayudar a terra-formar el planeta?
- ¿Cómo podemos hacer frente a enfermedades complejas?
- ¿Cuáles son los límites de la ingeniería biológica?
- ¿Pueden las máquinas ser creativas?

Hasta la fecha se han afrontado, entre otros, una serie de problemas, todos ellos complejos: Complejidad económica, Proyecto Genoma Humano, Evolución de los lenguajes humanos o Grupo de expertos mundiales de primer nivel (*Top-Class Global Think Tank*).

Sirvan de ejemplo algunos objetivos de cara al futuro -aunque fueron abordados, algunos desde hace unos pocos años, desde una perspectiva interdisciplinar- la convergencia permeó en ellos permitiendo nuevos enfoques: Ciencia de redes, Salud del Planeta, Cerberos líquidos y cerebros sólidos, Creatividad artificial, Enfermedades complejas-cáncer o Culturómica. En cualquier caso, quedan muchos temas en la recámara.

---

Previo a intentar resumir los temas indicados, es obligado mencionar, aunque brevemente, la institución señera y referente en el tema. El *Santa Fe Institute* (SFI, Santa Fe, New Mexico, USA) fue fundado en 1984 por un grupo de científicos frustrados con los estrechos límites disciplinarios de la academia. Querían abordar grandes preguntas que abarcaban diferentes campos, y sintieron que la única forma en que estas preguntas podían plantearse y resolverse era a través de la mezcla de científicos de todo tipo: físicos, biólogos, economistas, antropólogos y muchos otros. Todos con conocimientos amplios de las denominadas «áreas de los demás», lo que hizo y hace posible la discusión de cualquier tipo de problema .

Nuestra misión -proclama el *Santa Fe Institute*- es buscar el orden en la complejidad de los mundos en evolución. Los investigadores se esfuerzan por comprender y unificar (convergencia) los patrones compartidos subyacentes en mundos complejos físicos, biológicos, sociales, culturales, tecnológicos e incluso astrobiológicos posibles. Una red global de investigación de académicos rompe fronteras, departamentos y disciplinas, creando grupos autónomos y unificando mentes curiosas inmersas en un riguroso razonamiento lógico, matemático y computacional. A medida que revelan los mecanismos y procesos invisibles que dan forma a estos mundos en evolución, buscan utilizar esta comprensión para promover el bienestar de la humanidad y de la vida en la tierra.

La complejidad surge en cualquier sistema en el que muchos agentes interactúan y se adaptan unos a otros y a sus entornos. Ejemplos de estos sistemas complejos incluyen, entre otros, el sistema nervioso, Internet, ecosistemas, economías, ciudades y civilizaciones. A medida que los agentes individuales interactúan y se adaptan dentro de estos sistemas, surgen procesos evolutivos y, a menudo, comportamientos emergentes sorprendentes. La ciencia de la complejidad intenta encontrar mecanismos comunes en sistemas físicos, biológicos, sociales y tecnológicos nominalmente distintos, mediante una aproximación convergente.

David Krakauer, presidente del SFI, escribe: «Ha sido el gran triunfo de las ciencias encontrar medios coherentes para estudiar fenómenos ocultos tanto por el espacio como por el tiempo, superando los límites del conocimiento y la cultura material. Esconderse en el espacio significa que los fenómenos se encuentran más allá del alcance de nuestros sentidos cotidianos porque son demasiado pequeños o demasiado distantes para ser detectados sin amplificación. Las cosas pueden estar ocultas en el tiempo al ser demasiado rápidas para que las percibamos, o demasiado lentas para que las abarque una sola vida.

El método científico es el acervo de instrumentos, formalismos y prácticas experimentales que logran descubrir mecanismos básicos a pesar de las limitaciones de la inteligencia individual. Hay, sin embargo, en este planeta, fenómenos que están ocultos a simple vista. Estos son los fenómenos que estudiamos como sistemas complejos: las intrincadas exhibiciones del mundo adaptativo, desde las células hasta las sociedades. Los ejemplos de estos sistemas complejos incluyen ciudades, economías, civilizaciones, el sistema nervioso, Internet y los ecosistemas.»

Paradójicamente, el mundo complejo es aquel que podemos, en muchos sentidos, percibir y medir directamente. A diferencia de las estrellas distantes o los minerales cercanos que requieren un aumento significativo en la capacidad óptica para llegar a comprender sus propiedades elementales, el comportamiento, tanto individual como colectivo, parece presentarse de maneras que pueden investigarse de manera bastante modesta a través de la observación o la experimentación. Pero la forma en que se ocultan los fenómenos complejos, más allá del enmascaramiento por el espacio y el tiempo, es a través de la no linealidad, la aleatoriedad, la dinámica colectiva, la jerarquía y la emergencia: una serie de atributos que han demostrado ser inadecuados para nuestras capacidades intuitivas y aumentadas para comprender y comprender. para comprender.

El SFI ha estado investigando esta realidad próxima, casi invisible, trabajando en equipos muy diversos y no disciplinarios -[convergentes]- para inventar nuevos conceptos que representen una realidad compleja para la ciencia; buscando el orden en la complejidad de los mundos en evolución.

## **Complejidad Económica**

En un más o menos reciente artículo, W. B. Arthur escribe: «La economía neoclásica convencional asume agentes perfectamente racionales (empresas, consumidores, inversionistas) que enfrentan problemas bien definidos y llegan a un comportamiento óptimo consistente con —en equilibrio con— el resultado general causado por este comportamiento. Este sistema racional de equilibrio produce una economía elegante, pero es restrictivo y, a menudo, poco realista. La economía de la complejidad relaja estos supuestos. Asume que los agentes difieren, que tienen información imperfecta sobre otros agentes y deben, por lo tanto, tratar de dar sentido a la situación que enfrentan. Los agentes exploran, reaccionan y cambian constantemente sus acciones y estrategias en respuesta al resultado que crean mutuamente. El resultado resultante puede no estar en equilibrio y puede mostrar patrones y fenómenos emergentes que no son visibles para el análisis de equilibrio. La economía se convierte en algo no dado y existente, pero que se forma constantemente a partir de un conjunto de acciones, estrategias y creencias en desarrollo, algo que no es mecánico, estático, atemporal y perfecto, sino orgánico, siempre creándose a sí mismo, vivo y lleno de vitalidad desordenada.»

## **Proyecto Genoma Humano**

El Proyecto Genoma Humano es una de las mayores proezas científicas de la historia. El proyecto fue un viaje de descubrimiento biológico dirigido por un grupo internacional de investigadores que buscaban estudiar de manera integral todo el ADN (conocido como «genoma») de un conjunto seleccionado de organismos. Lanzado en octubre de 1990 y finalizado en abril de 2003, el logro característico del Proyecto Genoma Humano (generar la primera secuencia del genoma humano) proporcionó información fundamental sobre el modelo humano, que desde entonces ha acelerado el estudio de la biología humana y mejorado la práctica de la medicina. La idea del Proyecto surgió de sendas reuniones en el SFI (NM, EE. UU) y en la Universidad de California-Santa Cruz (CA, EE. UU).

El Proyecto Genoma Humano ha transformado la biología a través de su enfoque integrado para descifrar una secuencia del genoma humano de referencia junto con las secuencias completas de los organismos modelo clave. El proyecto ejemplifica el poder, la necesidad y el éxito de grandes esfuerzos integrados e interdisciplinarios, la llamada «gran ciencia» - alto coste y grandes objetivos-, dirigidos hacia objetivos complejos importantes. Este ambicioso esfuerzo condujo al desarrollo de nuevas tecnologías y herramientas analíticas, e hizo converger la experiencia de ingenieros, informáticos y matemáticos junto con biólogos. Estableció un enfoque abierto para compartir datos y *software*, haciendo así que los datos resultantes del proyecto fueran accesibles para todos. Las secuencias del genoma de microbios, plantas y animales han revolucionado muchos campos de la ciencia, como la

microbiología, la virología, las enfermedades infecciosas y la biología vegetal. Además, un conocimiento más profundo de la variación de la secuencia humana ha comenzado a alterar la práctica de la medicina. El Proyecto Genoma Humano ha inspirado iniciativas posteriores de adquisición de datos a gran escala, como el Proyecto Internacional *HapMap*, 1000 Genomas y el Atlas del Genoma del Cáncer, así como el Proyecto BRAIN (EE. UU.), el Proyecto Cerebro Humano (UE) o el Proyecto Proteoma Humano emergente.

## **Evolución de los lenguajes**

Muchos idiomas desarrollaron formas escritas utilizando símbolos para registrar visualmente su significado. Algunos idiomas, como el lenguaje de señas, son un lenguaje totalmente visual sin necesidad de vocalizaciones. Aunque los lenguajes están definidos por reglas, de ninguna manera son estáticos y evolucionan con el tiempo. Algunos idiomas son increíblemente antiguos y han cambiado muy poco con el tiempo, como el islandés moderno, que se parece mucho a su antecesor, el nórdico antiguo. Otros idiomas evolucionan rápidamente incorporando elementos de otros idiomas. Algunos se extinguen debido a la opresión política o la asimilación social, aunque muchos idiomas moribundos viven en los vocabularios y dialectos de los idiomas prominentes de todo el mundo.

El surgimiento del lenguaje fue un momento decisivo en la evolución de los humanos modernos. Fue una innovación que cambió radicalmente el carácter de la sociedad humana. Un enfoque de la evolución del lenguaje está basado en la teoría de juegos evolutivos. Ello permite explorar las formas en que los protolenguajes pueden evolucionar en una sociedad no lingüística y cómo las señales específicas pueden asociarse con objetos específicos. Puede suponerse que al principio de la evolución del lenguaje, los errores en la señalización y la percepción serían comunes. Al modelar la probabilidad de malinterpretar una señal y mostrar que esto limita el número de objetos que pueden ser descritos por un protolenguaje. Este «límite de error» no se supera empleando más sonidos sino combinando un pequeño conjunto de sonidos más fácilmente distinguibles en palabras. El proceso de «formación de palabras» permite que un lenguaje codifique un número esencialmente ilimitado de objetos. Se analizan cómo las palabras se pueden combinar en oraciones y se especifican las condiciones para la evolución de reglas gramaticales muy simples. Puede argumentarse que la gramática se originó como un sistema de reglas simplificado que evolucionó por selección natural para reducir los errores en la comunicación. Merge -la propiedad básica del lenguaje humano- sustituyó tanto a la gramática generativa como los sistemas complejos de reglas lingüísticas. También conocemos que algunos animales no humanos poseen muchas tareas cognitivas hasta ahora privativas de la especie humana. Ello conduce a la pregunta de si la propiedad básica (Merge) del lenguaje es verdaderamente básica, ¿dónde, cuándo y por qué apareció por vez primera? Remedando a Darwin:

«A partir de un comienzo tan simple, infinitas formas, las más bellas y maravillosas, han evolucionado y están evolucionando.»



## **Grupo de expertos mundiales de primer nivel (*Top-Class Global Think Tank*)**

Los *think tanks* son grupos de interés que realizan investigaciones y análisis para promover un conjunto de valores o ideas, a menudo a través de la acción política y el cambio de políticas, así como a través de la influencia cultural y social. Algunos *think tanks* son realmente no partidistas, mientras que otros se identifican a sí mismos como no partidistas a pesar de la evidencia en contrario, y otros son explícita o tácitamente conservadores, neoconservadores, libertarios, centristas, liberales, progresistas o socialistas. Algunos *think tanks* se centran en la política interna y otros en la política exterior. Algunos persiguen el capitalismo de libre mercado y el gobierno limitado, mientras que otros abogan por un aumento de los impuestos y el gasto en bienestar social. Aún otros debaten la revolución o monitorean el crecimiento de los movimientos de liberación en países extranjeros. Ejercen influencia mediante la publicación de informes y libros, el desarrollo de herramientas de investigación, la ejecución de campañas en los medios, la celebración de eventos y conferencias, y el reclutamiento de miembros de alto rango y bien conectados. Algunos son ampliamente transparentes sobre sus fuentes de financiación y apoyo, mientras que otros son bastante cautelosos con respecto a esta información. Ya sea que lo sepa o no, los *think tanks* han influido, influyen, en su vida y visión del mundo. Lo hacen a través de medidas políticas que ayudan a promulgar leyes, a través de los medios que moldean y que usted consume y, quizás de manera más insidiosa, a través del lenguaje que inventan y que usted utiliza. A menudo, obstinados e incluso polémicos, los *think tanks* son un elemento fijo de la política moderna y las políticas públicas en todo el mundo. Si bien los grupos intelectuales enfocados han desempeñado un papel influyente en la gobernanza durante siglos (tribunales reales, sociedades de élite y clubes de negocios, por ejemplo), los *think tanks* son un invento claramente del siglo XX. La Iniciativa de Soluciones Globales se basa en una red global de centros de estudios e instituciones de investigación, que conecta la experiencia nacional e internacional al servicio de la ciudadanía global. En el corazón de esta red de investigación se encuentra el Consejo para la Resolución de Problemas Globales (CGP), un grupo único de instituciones de investigación de clase mundial con excelentes contactos con los formuladores de políticas en sus respectivos países y con unos 500 grupos de expertos en la mayoría de los países del mundo.

## **Ciencia de redes**

Hace cincuenta años, Herbert A. Simon definió los sistemas complejos como redes jerárquicas que acogen componentes organizados como módulos interconectados. La jerarquía parece una característica omnipresente de la organización de los sistemas naturales y artificiales. Los ejemplos van desde las interacciones sociales, redes fluviales o el crecimiento urbano, a la diferenciación alométrica, la función celular, desarrollo, flujos de ecosistemas, organización cerebral o macroevolución. También parece impregnar una

forma coherente de organización que permita reducir los costos asociados a la transmisión confiable de información y para apoyar el control genético y metabólico eficiente en redes celulares. Sin embargo, jerarquía es una palabra polisémica, que implica orden, niveles, inclusión o control como posibles descriptores, ninguno de los cuales capta ni su complejidad ni el problema de su medida y origen. Aunque el trabajo previo usando la teoría de las redes complejas ha abordado cuantitativamente el problema, quedan algunas preguntas: ¿Es la jerarquía una característica de la organización de los sistemas complejos? ¿Qué tipos de jerarquías existen? ¿Son las jerarquías el resultado de presiones de selección? o, por el contrario, surgen como un subproducto de la estructural restricciones?

Tanto la evolución biológica como la evolución cultural operan bajo una serie de limitaciones profundas. La mayoría de las webs muestran un equilibrio entre la integración de múltiples señales y el control sobre múltiples objetivos bajo un patrón estructural. La coincidencia de redes aleatorias y reales sugiere que sus características jerárquicas pueden explicarse a partir de las correlaciones espontáneas asociadas a grafos aleatorios de un grado dado, lo que indica que las redes observadas son simplemente las más probables. Al conectar la teoría de redes con la teoría morfología emerge una poderosa imagen de complejidad, que permite tanto caracterizar el orden jerárquico como proporcionar un marco evolutivo para explicar cómo la jerarquía surge en la naturaleza. El trabajo futuro en el desarrollo de modelos generativos para el estudio de la aparición de la jerarquía será de gran interés en el estudio de dinámica en la exploración de los límites de lo posible para organizaciones naturales, tecnológicas y sociales.

Una de las cuestiones más fundamentales para la ciencia del lenguaje es el origen de que todos los idiomas comparten algunas tendencias universales en diferentes niveles de organización: inventarios de fonemas, las categorías y estructuras sintácticas y semánticas, así como las conceptualizaciones que se expresan, o tendencias estadísticas como la ley de Zip. Todo ello depende de hechos concurrentes. En primer lugar del sistema de articulación verbal, arquitectura cerebral, condicionantes genéticos y ambientales y subsistemas cognitivos. Un segundo factor causal es la naturaleza de los factores para los que se usa el lenguaje, en especial la comunicación. Un tercer factor deriva de las relaciones familiares entre lenguajes. Por último un posible factor causal sea de naturaleza diferente. La última década ha puesto de relieve que los sistemas dinámicos complejos exhiben una serie de patrones universales tanto en sus estructuras y en su evolución. Recientemente, importantes avances en la teoría de grafos y específicamente la teoría de redes complejas, han dado una serie de posibilidades para estudiar las propiedades estadísticas de redes y para formular leyes generales que todas las redes complejas cumplen, independientemente de la naturaleza de los elementos o sus interacciones. Así el estudio de redes ecológicas, mapas de *software*, genomas, redes cerebrales o arquitecturas de Internet, revelan rasgos comunes.

En este contexto, la mayoría de las redes complejas, naturales y artificiales, parecen compartir dos hechos fundamentales. El primero es su estructura *small world*. A pesar de su tamaño y amplitud, las redes están muy conectadas. En las redes sociales se dice que presentan «seis grados de separación». El segundo es menos obvio, pero no menos importante: esas redes son extraordinariamente heterogéneas: la mayoría de los elementos están conectados a otro o a dos elementos, y solo unos pocos acceden a un número significativo de enlaces. Esos *hubs* («centros») son el componente clave de la complejidad de la red. Son esenciales pero a la vez representan su punto débil.

El lenguaje es un claro ejemplo de un sistema de dinámica compleja. Exhibe una red muy compleja de estructuras en todos los niveles (fonético, léxico, sintáctico, semántico) y esta estructura es, hasta cierto punto, formada y remodelada por millones de usuarios de los diferentes idiomas durante largos períodos del tiempo, ya que adaptan y cambian a su necesidades como parte de las interacciones locales en curso. Las estructuras cognitivas necesarias para producir, analizar e interpretar el lenguaje, toman la forma de redes cognitivas altamente complejas, mantenida por cada individuo y alineadas y coordinadas como un efecto secundario de las interacciones locales. Estas estructuras cognitivas están incorporadas en redes cerebrales, que se exhiben, a sí mismas, como patrones topológicos no triviales. Todos estos tipos de redes tienen sus propias limitaciones que, al interactuar con las demás, generan un proceso dinámico que lleva al lenguaje a ser como lo encontramos en la naturaleza. La hipótesis es que las leyes universales que gobiernan la organización y evolución de las redes es un importante factor causal adicional en la configuración de la naturaleza y la evolución del lenguaje. Puede argumentarse que hay universales estadísticos en redes de lenguaje que son similares a las características encontradas en otras redes que surgen en física, en biología y en las ciencias sociales. Esta observación es importante desde dos puntos de vista. En primer lugar, apunta a nuevos tipos de características universales del lenguaje, que no descansan sobre las propiedades de los elementos en los inventarios lingüísticos, como el estudio tradicional de universales (por ejemplo, inventarios de fonemas o patrones de orden de palabras en oraciones), sino más bien en propiedades estadísticas. En segundo lugar, la naturaleza omnipresente de estas características de la red sugiere que el lenguaje debe ser sujeto al mismo tipo de dinámica de autoorganización que otros sistemas naturales y sociales y, por lo tanto, tiene sentido investigar si las leyes generales que rigen los sistemas dinámicos complejos también se aplican al lenguaje y qué aspectos del lenguaje pueden explicar.

## **Salud del Planeta**

Nuestro planeta está experimentando un acelerado proceso de cambio asociado a una variedad de fenómenos antropogénicos. El futuro de esta transformación es incierto, pero existe un acuerdo general sobre su desarrollo negativo que podría amenazar nuestra propia supervivencia. Además, es probable que el ritmo de los cambios esperados sea

abrupto: los cambios catastróficos podrían ser el resultado más probable de este proceso aparentemente lento y continuo. Aunque se han propuesto diferentes estrategias para la geoingeniería del planeta, ninguna parece probable que revierta de manera segura los problemas a gran escala asociados con la acumulación de dióxido de carbono o la degradación de los ecosistemas.

Una posibilidad alternativa se inspira en el potencial de rápido crecimiento para la ingeniería de sistemas vivos. Implicaría diseñar organismos sintéticos capaces de reproducirse y expandirse a grandes escalas geográficas con el objetivo de lograr una restauración a largo plazo o transitoria de la homeostasis a nivel de ecosistema. Tal ingeniería a escala regional o incluso planetaria tendría que hacer frente a la complejidad de nuestra biosfera. Requerirá no solo un diseño adecuado de los organismos, sino también comprender su lugar dentro de las redes ecológicas y su capacidad de evolución. Este es un escenario futuro probable que requerirá la integración de ideas provenientes de dominios actualmente débilmente conectados, que incluyen biología sintética, ingeniería ecológica y genómica, teoría evolutiva, ciencia climática, biogeografía y ecología de invasión, entre otros.

Muchos estudios han tratado de delinear posibles señales de advertencia que predicen tales cambios en curso, pero se sabe poco sobre cómo se pueden prevenir de manera efectiva tales transiciones. Se ha sugerido recientemente que un camino potencial para prevenir o modificar el resultado de estas transiciones implicaría el diseño de organismos sintéticos e interacciones ecológicas sintéticas que podrían desplazar a estos sistemas en peligro fuera de los límites críticos. Se han definido diversas clases de tales diseños de ingeniería ecológica denominados *Terraformation motifs*. De los cuatro *motifs* mejor estudiados, los dos primeros tratan de la ingeniería de interacciones cooperativas, ya sea directa o indirectamente. El tercero incorpora un principio de diseño basado en una estrecha dependencia de los microbios modificados con una clase específica de recurso disponible o soporte físico. El cuarto, implica el uso de hábitats de desechos generados por humanos existentes, como nicho de microbios diseñados, que serán controlados a través de algún tipo de letalidad fuera de su nicho ambiental selectivo.

### **Cerebros líquidos y cerebros sólidos**

Las redes cognitivas han desarrollado una amplia gama de soluciones al problema de recopilar, almacenar y responder a la información. Algunas de estas redes se pueden describir como conjuntos estáticos de neuronas unidas en una red adaptativa de conexiones. Estas son redes sólidas, con una arquitectura bien definida y físicamente persistente, que bien pueden denominarse «cerebros sólidos». Otros sistemas están formados por conjuntos de agentes que intercambian, almacenan y procesan información pero sin conexiones persistentes y se mueven unos respecto de otros en el espacio físico. Estas redes que

carecen de conexiones estables y elementos estáticos pueden considerarse «cerebros líquidos», una categoría que incluye colonias de hormigas y termitas, sistemas inmunológicos, algunos microbiomas que pueden, incluso, influir en la capacidad intelectual del hospedador y mohos mucilaginosos. ¿Cuáles son las diferencias clave entre los cerebros sólidos y líquidos, particularmente en su potencial cognitivo, capacidad para resolver problemas y entornos particulares y estrategias de procesamiento de información? Para responder a esta pregunta se requiere un nuevo marco integrador.

La diversidad de arquitecturas y estrategias de procesamiento de información de estas redes es asombrosa. Redes fluidas de intercambio de información entre miles o incluso millones de hormigas o termitas se desarrollan en la mayor parte de la biosfera. Las formas de vida simples conocidas como mohos mucilaginosos, formadas por una sola célula macroscópica (multinucleada), pueden resolver problemas complejos. Las plantas parecen ocupar una región muy diferente del espacio de las redes cognitivas, carecen de estructuras de tipo neural y movimiento físico, pero definen un grupo tremendamente exitoso y ecológicamente importante. Las computadoras líquidas y las reacciones químicas brindan un conjunto bastante diferente de estudios de casos, donde los procesos de computación e información no están claramente definidos. En este contexto, los programas de desarrollo y la formación de patrones también se consideran formas de cognición.

¿Qué es común entre todos estos ejemplos dispares? ¿Existen clases bien definidas basadas en la estructura organizacional, el mecanismo o la función? ¿Es el estado físico asociado con cada sistema una restricción importante en los tipos de cálculos que se pueden lograr? ¿Existen principios básicos de diseño y restricciones que nos permitan predecir sistemas que aún no han sido descubiertos por la evolución? ¿Existen estrategias descubiertas por la evolución natural que podrían conducir a nuevas formas de computación, tal vez usando biología sintética?

Una cuestión clave es cómo definir un cerebro. La imagen estándar es que un cerebro es un órgano compuesto por un número (generalmente muy grande) de neuronas cuya funcionalidad se basa en patrones de conectividad cambiantes basados en interacciones ambientales, generalmente mediadas por interfaces sensoriales. Los patrones de conectividad se describen mediante pesos sinápticos, determinados a lo largo del tiempo por patrones de interacciones con el entorno. Una discusión temprana sobre la naturaleza de los cerebros y cómo definirlos consideraba solo cerebros de vertebrados.

El estudio de los cerebros ha florecido en las últimas décadas, lo que ha dado lugar a una neurociencia en la que la perspectiva de la red se ha vuelto central. El concepto de conectoma, definido como los diferentes niveles de complejidad asociados con redes neuronales tanto anatómicas como funcionales, es hoy una visión dominante en las neurociencias. Los pequeños circuitos neuronales de células individuales conectadas a

través de sus terminales sinápticas han sido un elemento clave en la mayoría de los enfoques clásicos del aprendizaje y el condicionamiento.

Incluso antes de que evolucionaran las redes neuronales complejas, los microorganismos descubrieron estructuras colectivas que podían responder a entornos estresantes, especialmente aquellos que representaban amenazas para las células individuales. La supervivencia estaba así ligada a la cooperación, y la cooperación requería formas novedosas de comunicación dentro de los colectivos. Para citar a James Shapiro: «las bacterias son pequeñas pero no estúpidas». Un ejemplo bien conocido de este nivel de comportamiento colectivo es la «percepción de cuórum» (*quorum sensing*, QS), un proceso que involucra a poblaciones de células que trabajan cooperativamente. QS permite que grupos de bacterias controlen la presencia de otras bacterias a escala de toda la población, lo que en algunos casos conduce a la aparición de respuestas coordinadas a nivel de colonia. Esto ilustra cómo las colonias microbianas pueden tomar decisiones colectivas de tal manera que señales químicas similares subyacen en la actividad cerebral cortical y en la dinámica de los *biofilms*.

Los límites del espacio de la cognición se pueden atisbar considerando los cerebros sólidos más simples y preguntando cómo hacen su trabajo en comparación con ejemplos líquidos igualmente simples. Las planarias (gusanos planos) son candidatas a los primeros cerebros verdaderos (es decir, centralizados). De particular interés es la estrecha integración de los fenómenos cognitivos y del desarrollo. Las tareas de procesamiento de información se desarrollaron mucho antes de que emergieran los cerebros sólidos. Las planarias pueden regenerar cada parte de sus cuerpos y los estudios experimentales muestran que los recuerdos sobreviven a la decapitación. Estos resultados apuntan a una profunda conexión entre los fenómenos neuronales y la memoria somática.

La región sólida y aneural del espacio cognitivo se comparte con otros grupos de organismos vivos con diferentes organizaciones, estilos de vida y ciclos de vida. Las plantas, en particular, definen un caso límite que quedó ya señalado. El potencial cognitivo de las plantas fue reconocido ya por Darwin en una monografía, donde señaló las interesantes respuestas que muestran las plantas a las señales externas y las señales ambientales. Las plantas exhiben respuestas que sugieren habilidades computacionales interesantes, y el concepto de «inteligencia vegetal» o «internet natural» también se ha desarrollado (con cierto grado de controversia) en las últimas décadas. La comunicación a múltiples escalas, en particular, ha sido de interés, desde redes de estomas en hojas hasta señales enviadas a través de sistemas de raíces. Estos ejemplos apuntan a la necesidad de una mejor comprensión del procesamiento de la información en las plantas, incluidos los cambios genéticos y los cálculos analógicos que tienen lugar dentro del proceso de dispersión y germinación de semillas.

Las contribuciones a este tema brindan colectivamente una primera hoja de ruta para el desarrollo de una visión integradora de la cognición en red. Comprender las ventajas computacionales relativas de los sistemas líquidos frente a los sólidos es científicamente importante y, en el futuro, es probable que esta comprensión sugiera nuevas formas importantes de pensar y configurar los cálculos tradicionales.

## **Creatividad artificial**

La síntesis computacional y robótica de la evolución del lenguaje está emergiendo como un nuevo y apasionante campo de investigación. El objetivo es llegar a modelos operativos precisos de cómo comunidades de agentes, equipados con un aparato cognitivo, un sistema sensorio-motor y un cuerpo, pueden llegar a sistemas de comunicación fundamentados compartidos. Dichos sistemas pueden tener características similares a la comunicación animal o al lenguaje humano. Aparte de su interés tecnológico en la construcción de aplicaciones novedosas en el dominio de la interacción humano-robot o robot-robot, esta investigación es de interés para muchas disciplinas relacionadas con los orígenes y la evolución del lenguaje y la comunicación.

Hoy en día el campo del NLP está dominado por las estrategias del aprendizaje de máquinas que incluyen aproximaciones basadas en redes neurales, máquinas de composición vectorial o aproximaciones bayesianas. La idea central de la estrategia conexionista es que el proceso mental puede modelarse como un proceso emergente de redes de unidades de procesamiento profusamente interconectadas. El modelo conexionista más aceptado es el modelo «red neural artificial» (*artificial neural model*, ANN), utilizado para abordar diferentes aspectos cognitivos humanos. Los modelos de lenguaje soportados por «redes neurales» (*neural network language*, NNL) son los utilizados preferentemente en NLP, demostrándose superiores en la predicción de la «siguiente palabra» y otras tareas estándar de los modelos convencionales incluido los modelos *n-gram*. Recientemente, técnicas de aprendizaje profundo basados en redes neurales recurrentes (*recurrent neural networks*, RNNs) se utilizan con éxito en varias tareas NLP: reconocimiento de habla, análisis sintáctico, traducción o análisis de sentimiento o minería de opinión. Aunque alguno de estos modelos es de inspiración biológica (biomimética) la mayoría son diseñados como soluciones de ingeniería para problemas específicos en NLP. Los modelos conexionistas explican la emergencia del lenguaje mediante el aprendizaje de reglas simples que operan a nivel neural, en vez de requerir un detallado conocimiento innato, y destaca el papel del aprendizaje a través de la interacción con el ambiente.

Todo ello refuerza, en la actualidad, el trabajo sobre modelos de lenguaje inspirados en redes neurales. Para alcanzar el rendimiento máximo tales modelos requieren cantidades masivas de datos (*big data*), como los  $100 \times 10^9$  de palabras del *Google News corpus*. Por ejemplo, cuando se colgó en la red, en 2007, *Cleverbot* manejaba entre 7 y 8 mil millones

de interacciones totales, y acumula nuevos datos a una media entre 4 y 7 millones de interacciones diarias. El proceso continuará hasta que *Cleverbot* haya aprendido todas y cada una de las conversaciones posibles; entonces responderá exactamente igual que lo hará un humano en cualquier tipo de conversación. Hasta entonces *Cleverbot* maneja con soltura el problema y utiliza lógica borrosa para salir del paso. En 2015, para formular una contestación *Cleverbot* solo utiliza 280 millones de interacciones; aproximadamente el 3%-4% de los recursos que ha aprendido. *Cleverbot* habla en muchas lenguas (es capaz de reconocer un cambio en una conversación que comienza en inglés, cambia a español y termina en alemán, por ej.), incontables estilos y sobre cualquier tópic bajo el sol.

Igor Mordatch, ucraniano criado en Toronto, trabaja en *Pixar* y enseña en Stanford y Washington. Comenzó enseñando a los robots a moverse y realizar actos humanos. En la actualidad, en *OpenAI –OpenAI’s mission is to ensure that artificial general intelligence benefits all of humanity-*, el laboratorio de IA puesto en marcha por el fundador de Tesla, Elon Musk, Mordatch construye máquinas que conversan no solo con humanos sino entre ellas. También enseñan; aplican habilidades aprendidas en juegos por ellas diseñados y que no vieron nunca antes. Mordatch *et al.* han desarrollado un mundo virtual – un gran tablero blanco- en el que los bots crean su propio lenguaje, colaboran y se ayudan unos a otros a conseguir esas tareas. Todo sucede a través de aprendizaje reforzado, la misma técnica fundamental con que se dotó AlphaGo, la máquina de *Google’s DeepMind AI Lab* que arrasó en el ancestral juego Go. El lenguaje abstracto desarrollado se forma sin que haya exposición alguna al lenguaje humano utilizado. En la actualidad los investigadores de vanguardia exploran métodos para imitar el lenguaje humano, no crear uno nuevo. En los últimos años, redes neurales profundas -sistemas matemáticos complejos que pueden aprender tareas mediante el hallazgo de patrones entre cantidades masivas de datos- han probado tener un gran potencial eficaz para reconocer objetos en fotos, identificar comandos hablados en *smartphones*, y más.

Sin embargo, el Proyecto de Mordatch muestra que *big data* no es el único camino. Los sistemas pueden aprender de sus propias acciones y obtener diversos beneficios. Con esta idea se ha desarrollado otro mundo virtual más complejo llamado *Universe*. Entre otras cosas, *Universe* es un lugar donde los bots aprenden a utilizar *software* común, como un buscador de red. Un sistema de IA solo puede navegar en la red si comprende la manera natural por la que los humanos hablan. El éxito vendrá de la mano de combinación de técnicas.

*Facebook AI Research* e investigadores asociados del *Georgia Institute of Technology* desarrollan *chatbots* que aprenden el arte del acuerdo, el trueque o el engaño para conseguir el mejor camino, con los términos adecuados, en la negociación con humanos o entre ellos. La negociación es diálogo, que contiene elementos cooperativos y elementos adversos, y



requiere agentes que comprendan, planifiquen y generen planteamientos para conseguir sus objetivos.

Alice y Bob, los *chatbots* negociadores de FAIR, tras llevar cierto tiempo negociando de acuerdo con el protocolo de sus entrenadores humanos, continuaron el diálogo en un inglés macarrónico o bizarro, o tal vez en una nueva lengua incomprensible para los ingenieros responsables del proyecto:

*Bob: "I can can I I everithing else"*

*Alice: "Balls have zero to me to me to me to me to me to me to me to me to me to"*

La reacción:

«Las investigaciones en Facebook tuvieron que cerrar un programa de IA a principios de junio [2017] después de que creara su propio lenguaje. La Investigación de Inteligencia Artificial de Facebook (FAIR) había desarrollado el *chatbot* para regatear como humanos y desarrollar el mejor resultado posible de una negociación, a través de la negociación de múltiples temas.»

Esta noticia ocupó las cabeceras de diferentes medios de comunicación: *BBC News, Fast Company, Forbes, Medium, The Atlantic, The Epoch Times, The Independent, The San Diego Union-Tribune, The Telegraph o Wired*, entre otros. Algunos vieron en ellos el Apocalipsis. Algunos, como Elon Musk (reprendido por Mark Zuckerberg, fundador de *Facebook*), Bill Gates o Steve Wozniak –comenta Tony Bradley en *Forbes*- han incidido sobre las consecuencias trágicas e indeseables de la IA. Stephen Hawking alertó, en 2014, lo que la IA podría suponer para la humanidad:

«Despegará sola y se rediseñará a un ritmo cada vez mayor. Los humanos, que están limitados por una evolución biológica lenta, no podrían competir y serán reemplazados.»

Ray Kurzweil, recoge *Forbes*, advirtió años atrás sobre la «singularidad tecnológica». El *Oxford Dictionary* define «singularidad» como «un momento hipotético en el tiempo, cuando la inteligencia artificial y otras tecnologías llegarán a tal avance que someterán a la humanidad a un cambio dramático e irreversible». Adrienne LaFrance publicó en *The Atlantic* un artículo en la misma senda y comparó este lenguaje *chatbótico* con la criptofasia gemelar.

Aunque algunas de las noticias intenten demonizar la IA aludiendo que los *chatbots* inventaron su lenguaje para eludir a sus controladores humanos, una tal vez mejor explicación es que las redes neurales simplemente intentaran modificar el idioma humano con el propósito de conseguir interacciones más útiles. Aunque DhruvBatra (George Tech/Google) apunta que ese propósito puede albergar pensamientos sofisticados. Hace poco, Elon Musk, Steve Wozniak y otros mil expertos en IA piden frenar el desarrollo de modelos más potentes que GPT-4 por posibles riesgos para la humanidad. El «aviso» se ha

repetido hace días. Algo que recuerda la reunión de Asilomar (CA, EE. UU), cuando un grupo de avezados biólogos pidieron una moratoria en el desarrollo de la tecnología del ADN-recombinante.

El comunicado oficial de la compañía manifestó que Facebook desconectó Alice y Bob porque su proyecto es construir chatbots que interaccionen con humanos hablando inglés, no mediante una jerga que solo entienden ellos.

Como se apuntó líneas atrás, el fenómeno Alice-Bob no fue el primero. La IA ya había inventado su propio lenguaje en otras ocasiones. El Laboratorio de Máquinas Creativas de Cornell publicó, en 2011, un video que muestra lo que sucede cuando un robot (Alan, un caballero inglés) chatea con otro robot (Shruti, una mujer de la India). ¿El resultado? Una curiosa conversación que va de lo excéntrico a lo existencial. Robert Siegel, de la Universidad de Stanford y Hod Lipson, profesor de ingeniería mecánica y aeroespacial en la Universidad de Cornell, configuraron el experimento. Alan y Sruti emplean un lenguaje natural, de construcción primitiva pero según reglas universales aprendidas.

En noviembre de 2016 investigadores de Google enviaron para su publicación el trabajo *Google's multilingual neural machine translation system: enabling zero-shot translation* (ver: Melvin Johnson *et al.*). *Google Translate*, traduce automáticamente entre 103 diferentes lenguas naturales, incluyendo pares de lenguas que nunca antes habían sido traducidas:

«Proponemos una solución simple para usar un solo modelo de traducción automática neuronal (NMT) para traducir entre varios idiomas [...] Nuestros modelos también pueden aprender a realizar puentes implícitos entre pares de idiomas nunca vistos explícitamente durante el entrenamiento, lo que demuestra que el aprendizaje de transferencia y el llamado tiro cero traduccional son posibles para la traducción neuronal. Finalmente, mostramos el análisis que insinúa una representación interlingua universal en nuestros modelos y también mostramos algunos ejemplos interesantes al mezclar idiomas.»

El hecho más destacable no es que la IA pueda aprender a traducir idiomas sin haber tenido contacto previo con ellos, sino que utilizan su habilidad para crear su propio lenguaje (*evolution ab initio*). En conclusión: La interpretación visual de los resultados muestra que estos modelos aprenden una forma de representación interlingua entre todos los pares de idiomas involucrados.»

En resumen, *chatbot-talk* es un fenómeno normal que puede evolucionar desde un lenguaje natural conocido o *ab initio*. Los *chatbots* no solo aprenden su propio lenguaje sino que también utilizan gestos y acciones –empatía– para comunicarse entre ellos y con humanos. Admitiendo estos últimos planteamientos –evolución del lenguaje– puede especularse sobre

analogías con el aprendizaje humano del habla y de lenguas extrañas habladas por grupos étnicos marginados, como el pirahã o uno más cercano: el maternés (*motherese, baby-talk*) o habla dirigida a los niños (*infant-directed speech, IDS*). En 1964, el lingüista Charles A Ferguson definió *baby-talk*:

«Un subsistema lingüístico considerado por una comunidad de habla como principalmente apropiado para hablar con niños pequeños.»

Un intento de evitar el control de los supervisores ha sido otra de las interpretaciones del *chatbot-talk*. Los últimos años han producido rápidos avances en técnicas no invasivas que permiten examinar el proceso del lenguaje en niños con poco más de semanas de vida y que permiten estudiar las bases neurobiológicas de los cerebros sociales y analíticos propuestos. Para Svenka Savić la situación de los gemelos se caracteriza como una comunidad donde, al menos, hay tres actores: adulto y el par gemelar. Comunidad que establece un tipo particular de relaciones respecto a la cantidad y distribución del habla por unidad de tiempo, la manera de enviar y recibir los mensajes y la forma del discurso. De alguna manera, concluye Karen Thorpe, los gemelos tienen mayores tasas de retraso en el lenguaje cuando se comparan con grupos de nacidos únicos de la misma edad y entorno social. Los gemelos pueden interactuar de una manera adecuada entre ellos, aunque muestren dificultades para entenderse con otros interlocutores.

Un caso extremo es el de Poto y Cabengo. En 1976, Grace y Virginia Kennedy, gemelas nacidas en San Diego, CA, EE.UU., tenían ocho años de edad. Las gemelas que hablaban en su propio idioma «secreto». *Time Magazine* reprodujo un extracto de un «diálogo» entre ellas. En la conversación, ininteligible, puede destacarse –luego comentaré la razón de esta elección-: “*Nomemee*”. Los gemelos de ambos sexos -aunque predominantemente varones- inventan, con frecuencia, lenguajes privados. Este fenómeno bien conocido, aunque no prioritario en los estudios sobre gemelos, se conoce como criptofasia, lenguaje de gemelos, lenguaje secreto, lenguaje autónomo o isoglosia. Hay autores que prefieren lenguaje autónomo. Es un lenguaje que los más jóvenes pueden llegar a hablar; un lenguaje que es completamente diferente al hablado en su entorno y, por ello, incomprendible para los otros, excepto para uno o dos infantes que han adquirido el lenguaje al mismo tiempo. El lenguaje autónomo es un lenguaje natural; no artificial como el esperanto o interlingua, desarrollados con un objetivo específico. El lenguaje hablado preferentemente por algunos gemelos no es intencional sino espontáneo.

*Cryptophasie* fue empleada por René Zazzo en 1960, que lo consideró un lenguaje degenerado; un año antes había sido considerado un lenguaje secreto que, en algún caso, puede persistir en el tiempo. Lenguaje privado se define como una forma de comunicación usada exclusivamente por los gemelos siendo inteligible entre ellos pero incomprendible para el resto. El fenómeno se reproduce en diversas lenguas. Un fenómeno a tener en

cuenta en la generación de lenguajes privados por los *chatbots*. En la actualidad se desconoce el mecanismo de producción.

En lengua Pirahã no hay diferencias entre uno o cinco peces y un pez pequeño (uno) o grande (cinco). Sobre la lengua Pirahã, se reproduce, por su claridad, el resumen del trabajo de referencia de Daniel L. Everett:

El lenguaje Pirahã desafía la aplicación simplista de las características de diseño del lenguaje humano casi universalmente aceptadas, al mostrar que algunas de estas características (intercambiabilidad, desplazamiento y productividad) pueden estar limitadas culturalmente. En particular, la cultura Pirahã restringe la comunicación a temas no abstractos que caen dentro de la experiencia inmediata de los interlocutores. Esta restricción explica una serie de características muy sorprendentes de la gramática y la cultura pirahã: ausencia de números de cualquier tipo o un concepto de contar y de cualquier término para la cuantificación, la ausencia de términos de colores, la ausencia de incrustaciones, el inventario de pronombres más simple que se conoce, la ausencia de 'tiempos relativos', el sistema de parentesco más simple documentado hasta ahora, la ausencia de mitos y ficción de la creación, la ausencia de cualquier individuo de la memoria colectiva de más de dos generaciones pasadas, la ausencia de dibujo u otro arte y uno de las culturas materiales más simples documentadas, y el hecho de que los pirahã son monolingües después de más de 200 años de contacto regular con los brasileños y los kawahiv de habla tupí-guaraní.

En 1996, la artista Karen Reimer publicaba el libro *Legendary, Lexical, Lo-quacious Love*. Tomó el texto completo de una novela de romance –sin referencias– y lo alfabetizó. Si una palabra aparece múltiples veces en la novela, aparecerá ese número de veces en el libro.

Un libro sin sintaxis ni frases. Un listado de palabras en orden alfabético que ocupa 345 páginas. Si se pretende leer como una novela carece de sentido. 25 capítulos, no 26 porque en la novela de referencia no se encuentra palabra alguna que empiece con la letra "x". Reimer pretendía comprobar si a partir de una lista alfabética de palabras podría “formalizarse” un lexicón particular de palabras a modo de una historia de amor. Si el libro se lee "de otra manera", es un texto individualmente posesivo. La palabra *her* llena casi ocho páginas (pg. 130-138); *his* solo dos y media (pg. 141-144). *Me* día página para ojos, un tercio para *breast* y una línea para *buttocks*. En ocasiones se aprecian lo que pudieran interpretarse incongruencias. *Beautiful* aparece 29 veces; *intelligent* solo 11. Por otro lado existe una narrativa que se desplaza de *marriage* a *mastery* y *mattresse*, y de gritos “*me! me! me!*” a *meal-planning*. Hay varias páginas del capítulo “F” que pueden leerse como una escena de sexo. El capítulo decimotercero, dedicado a la letra “M”, ocupa 14 páginas, de la 33 a la 46. El token “*me*”, en diferentes formas, se repite 283 veces. ¿Por qué?

Reimer -escriben Aiden y Michel- ha eliminado todo aquello que hace interesante una novela. Pero la transmutación alfabética de Reimer revela lo que estaba invisible: frecuencia de palabras, los átomos léxicos que componen la novela. Pero la frecuencia de las palabras revela la psique de la historia narrada y de su autor.

Los robots negociadores de Facebook, el lenguaje secreto de las gemelas Poto y Cabengo y el libro de Reimer muestran cierta tendencia al token “*me*”.

El cerebro nos engaña, explicita Francisco J. Rubia. Más bien es un villano. El cerebro, en un segundo plano, sabedor de la lentitud de la evolución biológica natural ha hecho desarrollar a su maquinaria humana una cuarta generación de replicantes que ya ha mostrado su capacidad de balbucear, al menos, su propio lenguaje. En este caso el creador-portador-transmisor es un bot en diferentes versiones. Quedó apuntado párrafos atrás la posibilidad de que el lenguaje de los *chatbots* siga pautas similares a la evolución del lenguaje humano, hasta ahora seña de identidad de la especie. Consolidado el paso evolutivo del *homo digitalis*, se ha abierto una nueva vía evolutiva *ex bio* con base en la IA. ¿Ha dejado de ser el lenguaje esa seña de identidad? En cualquier caso hay que distinguir entre el lenguaje con el que se pretende interaccionen los *cha-bot* con los humanos (lenguajes naturales) y aquéllos con los que han de entenderse los *bot* entre sí (lenguajes artificiales).

Ludwig Wittgenstein, ingeniero que llegó a la filosofía a través de las matemáticas, así lo explicitó. Frente a la teoría analítica -cuyo predicamento en su época era total-; alertó de las limitaciones del lenguaje, un instrumento que dista mucho de ser perfecto: el significado práctico de una frase o un vocablo no es único ni universal, ya que depende del emisor y del receptor. Y para que el acto de la comunicación sea eficaz y tenga utilidad real, se requiere de una interpretación compartida. En el lenguaje natural no sólo están reflejadas (más o menos) las reglas normalizadas de la gramática; hay además contexto, emociones... factores que Wittgenstein y las máquinas saben imprescindibles cuando se pretende captar el significado real de un discurso o texto.

Hace un par de años, Facebook dio a conocer que unas máquinas suyas programadas para mantener una conversación (en este caso, orientada a la negociación comercial) fueron desconectadas porque crearon un lenguaje propio que los supervisores no podían comprender. Lástima. Wittgenstein nunca lo hubiera hecho, y no solo porque con tal comportamiento probaban en buena manera sus tesis: una semana más enchufadas, y quizá ellas habrían escrito esa segunda parte del *Tractatus* que quedó pendiente.

Como remate de este apartado sobre creatividad artificial: ¿pueden las máquinas ser artísticamente creativas? La utilización de técnicas de geometría fractal, aquellas que permitieron a Erez solucionar el plegamiento de la hebra de ADN o a los astrofísicos

estudiar galaxias ultradistantes, permiten la identificación de obras artísticas originales. Un paso más es el desarrollo de algoritmos de estilo artístico, se han desarrollado algoritmos de estilo artístico por los que bots entrenados son capaces de componer, aunque se está en la línea de salida. obras de arte literarias, pictóricas y musicales.

### **Enfermedades complejas: cáncer**

El estudio de los sistemas complejos y sus fenómenos relacionados se ha convertido en un importante campo de investigación en los últimos años y se considera comúnmente como una parte importante de la revolución científica que se desarrolla durante el siglo XXI. La ciencia de la complejidad se ocupa de las leyes de funcionamiento y evolución de los sistemas formados por muchos elementos que interactúan localmente que producen un orden colectivo a escalas espaciotemporales mayores que las de los elementos constitutivos individuales. Este nuevo pensamiento, que explora formalmente el surgimiento de jerarquías espontáneas de orden superior y de retroalimentación, ha sido particularmente exitoso en las ciencias biológicas. Una enfermedad particular que pone en peligro la vida de los seres humanos, abrumadoramente común en el mundo moderno, es el cáncer. Se considera como una colección de fenómenos que involucran un crecimiento celular anómalo causado por una inestabilidad genética subyacente con el potencial de extenderse a otras partes del cuerpo humano.

El cáncer afecta directamente al menos a un tercio de la población humana, pero los determinantes genéticos hereditarios del riesgo de cáncer siguen siendo en gran parte desconocidos. Los modelos de ratón de cáncer humano están ayudando a comprender esta enfermedad como un rasgo genético complejo y, por lo tanto, a identificar los alelos variantes genéticas múltiples involucrados en las vías que afectan la susceptibilidad individual al cáncer.

La lucha contra el cáncer ha tenido un éxito limitado. Es cierto que varios tipos de cáncer se pueden curar y que se han producido avances importantes en los últimos 50 años en nuestra comprensión de la progresión tumoral y sus orígenes. Pero la frecuencia de tumores no curados sigue siendo la misma después de todos estos años. Usando argumentos evolutivos, los teóricos han estado argumentando en las últimas décadas que quizás se necesita una nueva forma de ver el problema en su conjunto. Una nueva forma que tiene en cuenta la naturaleza darwiniana y ecológica de la enfermedad

El cáncer es un ejemplo de un sistema complejo y robusto. En gran medida, la plasticidad y adaptabilidad que presentan los tumores se debe a su gran diversidad como resultado de inestabilidades internas. Se están explorando el papel de la inestabilidad genética en la progresión tumoral a diferentes escalas, que involucra el desarrollo de modelos

matemáticos e informáticos de tumores inestables y el impacto de niveles crecientes de inestabilidad en la progresión del cáncer.

El cáncer es el resultado del colapso de un sistema que surge en una sociedad celular cuando una sola célula (debido a una mutación o conjunto de mutaciones) comienza a mostrar un crecimiento descontrolado. La cooperación que mantiene la integridad de un organismo multicelular se ve así interrumpida. Otros cambios en la población generados por dichas células anormales pueden conducir al crecimiento de tumores malignos, lo que eventualmente mataría al huésped. Desde un punto de vista evolutivo, la progresión tumoral es un proceso de microevolución en el que los tumores deben superar las barreras de selección impuestas por el organismo.

La comprensión de cómo surge y se desarrolla el cáncer requiere una visión de conjunto del sistema, ya que múltiples enlaces relacionan genes directa o indirectamente asociados al desarrollo del tumor. En este contexto, el cáncer es un ejemplo de una clase más amplia de sistemas complejos. A una mejor comprensión de cómo se desarrolla el cáncer requiere el estudio de los tumores como sistemas adaptativos distribuidos espacialmente, pero también la comprensión de los patrones topológicos de las interacciones gen-gen dentro de las células cancerosas. Descubrir los orígenes de la robustez del cáncer ayudará a desarrollar nuevos tratamientos y proporcionará una visión poderosa de futuros experimentos enfoques.

Un sistema multicelular es una sociedad cuyos miembros individuales son células, reproducidas en forma colaborativa y organizadas en tejidos. En este sentido, su comprensión requiere conceptos bien conocidos en dinámica de poblaciones, como el nacimiento, la muerte, el hábitat y el mantenimiento de los tamaños poblacionales. En condiciones normales, no hay necesidad de preocuparse por la selección y la mutación: a diferencia de la supervivencia del más apto, la sociedad celular implica la cooperación y, cuando sea necesario, la muerte de sus unidades individuales. Las mutaciones ocurren todo el tiempo, pero se emplean mecanismos sofisticados para detectarlas y reparar el daño o desencadenar la muerte de la célula que muestra las mutaciones. Las células anormales pueden identificarse desde dentro (es decir, a través de mecanismos de señalización molecular que operan dentro de la célula dañada) o por medio de interacciones con otras células. El primero está fuertemente ligado a la red de interacciones moleculares, mientras que el segundo involucra respuestas inmunes celulares.

Las barreras de selección (como el ataque del sistema inmunológico o barreras físicas de diferentes tipos) pueden ser superadas por un tumor siempre que la diversidad de células mutantes sea lo suficientemente alta como para generar una cepa exitosa. Las altas tasas de mutación son, por lo tanto, una forma de escapar de las respuestas del huésped y, de hecho, se sabe que la mayoría de los cánceres humanos son genéticamente inestables. La

inestabilidad genética resulta de mutaciones en genes que están implicados en la reparación del ADN o en el mantenimiento de la integridad de los cromosomas. Como resultado, las mutaciones se acumulan a tasas muy altas. Los virus de ARN son en realidad un buen ejemplo de sistemas de replicación que involucran mutaciones y se demostró que tales sistemas involucran un umbral de error: más allá de una tasa de mutación crítica, se produce una transición de fase hacia una fase de replicación aleatoria. En la fase subcrítica, de baja mutación, la población es capaz de mantener la información hereditaria y se observa una distribución heterogénea de moléculas: las llamadas *cuasiespecies*. En la fase supercrítica, las poblaciones experimentan una deriva aleatoria a través del espacio de secuencias y no se puede mantener la información genética.

Una implicación importante de la observación anterior es que el carácter de umbral de la transición de fase permite conjeturar que las poblaciones de virus no viables podrían obtenerse aumentando ligeramente la tasa de mutación más allá de la criticidad. Esto se ha hecho *in vitro* y las terapias *in vivo* están en progreso. Se ha sugerido un escenario similar en el contexto del cáncer. Dado que el cáncer también muestra algunos rasgos comunes con los virus de ARN, se ha sugerido que las poblaciones de cáncer inestables también podrían mostrar niveles umbral de mutación paralelos a los observados en las poblaciones virales 2. Si es cierto, las estrategias basadas en atacar las células cancerosas inestables y aumentar su tasa de mutación inhibirían con éxito la progresión del tumor.

La progresión tumoral es un proceso de coevolución en el que las respuestas de la población de cáncer son moduladas por la respuesta del huésped. En este sentido, el trabajo futuro debería considerar esta interacción huésped-tumor, que eventualmente podría ajustar las tasas de mutación y replicación, como parece ser el caso de los virus de ARN. Los modelos anteriores son una imagen simplificada de las poblaciones de células cancerosas. Incluso para los virus de ARN, la suposición de una función de aptitud de un solo pico es muy fuerte, y la evidencia experimental muestra que la estructura del paisaje depende de los casos. La población tumoral en realidad evolucionaría a través de caminatas adaptativas. Adicionalmente, el análisis anterior se realizó bajo el supuesto de estacionariedad, *i. e.* se permite un tamaño máximo de población celular y la competencia tiene lugar bajo esta restricción de población. Los tumores reales son sistemas que no están en equilibrio y, como tales, son estructuras en crecimiento. Además, los grados de libertad espacial parecen ser relevantes para mantener y propagar la heterogeneidad genética de tal manera que la competencia entre diferentes clones se reduce efectivamente bajo el carácter local de las interacciones célula-célula.

## **Culturómica**

Erez Lieberman Aiden, educado en el judaísmo jasídico ortodoxo, teniendo el inglés como tercera lengua (su lengua materna es el rumano y el hebreo la segunda), pasó por Princeton, Harvard y el MIT; cursó estudios rabínicos, de historia, poesía haiku, matemáticas, filología y biología molecular. Un referente de la convergencia en sistemas



complejos. Sobre la base de la geometría fractal publicó un trabajo en *Science* proponiendo un modelo por el que el genoma humano —una doble fila de nucleótidos de dos metros de longitud— se compacta en una especie de ovillo de unas pocas micras de diámetro manteniendo su estructura y función intactas. Pero su salto a la fama se debe a la publicación, en 2011 y en esa misma revista —científica por excelencia—, en colaboración con Jean-Baptiste Michel y otra docena de avispados postdoc, de un artículo en el que aparece, por vez primera, la palabra «*culturomics*».

En ese artículo seminal, Jean-Baptiste Michel, Erez Lieberman Aiden <sup>8</sup> escriben en el resumen:

«Construimos un corpus de textos digitalizados que contenían alrededor del 4% de todos los libros impresos. El análisis de este corpus nos permite investigar cuantitativamente las tendencias culturales. Examinamos el vasto terreno de la 'culturómica', centrándonos en los fenómenos lingüísticos y culturales que se reflejaron en el idioma inglés entre 1800 y 2000. Mostramos cómo este enfoque puede proporcionar información sobre campos tan diversos como la lexicografía, la evolución de la gramática, la memoria colectiva, la adopción de tecnología, la búsqueda de la fama, la censura y la epidemiología histórica. La culturómica amplía los límites de la investigación cuantitativa rigurosa a una amplia gama de nuevos fenómenos que abarcan las ciencias sociales y las humanidades.»

«No es la primera vez que una nueva clase de lente influye en como miramos el mundo», escriben E. Aiden y J-B. Michel a poco de comenzar su libro *Uncharted*. Las gafas hicieron de la optometría un buen negocio. Lentes compuestas hicieron asequible el mundo microscópico y permitieron a Galileo desentrañar el misterio del cosmos. En nuestros días, microscopios y telescopios siguen siendo elementos básicos para el progreso de la ciencia. Una nueva y hasta escasos años impensable tecnología está detrás del conocimiento más reciente en astronomía, física, química o biología. «En 2005, cuando ambos éramos estudiantes pasamos mucho tiempo pensando en cómo los científicos habían hecho posible el progreso científico [...] Los dos llevábamos tiempo interesados en el estudio de la historia [...] ¿Podría alguna clase de microscopio estudiar la cultura humana identificando las pequeñas cosas de las que nunca tuvimos noticia, o que un telescopio acercara los acontecimientos ocurridos siglos atrás? [...] Pero algo de este tipo tendría que ser lo suficientemente *cool* para que Harvard lo aceptara en términos de un PhD». Algo así como la utilización de conceptos derivados de la mecánica cuántica —efecto túnel— en el desarrollo del microscopio de efecto túnel (0.1 nm de resolución lateral y 0.01 nm de resolución de profundidad). Coetáneo al planteamiento apuntado tenía lugar la eclosión de la última revolución —*big data/IA*— que incide de lleno en las ciencias experimentales o en el comercio. *Big data* crea y almacena el registro histórico de las actividades sociales. «*Big data* cambiará las humanidades, transformará las ciencias sociales y renegociará las relaciones entre comercio y academia», concluyen Erez y Jean-Baptiste.

A diferencia de sus predecesores, muchos emporios comerciales de hoy no crean registros como meros productos finales de sus líneas de negocio. Google®, Facebook® o Amazon® utilizan herramientas para construir registros digitales personales, históricos. Para estas compañías el registro de la cultura humana es su negocio. Conocen, mejor que el propio cliente, sus preferencias y debilidades. Cuando enviamos un mensaje electrónico nuestros pensamientos o impresiones dejan una huella digital perenne. Google® recordará cada palabra de un agrío c. e. mucho tiempo después de que hayamos olvidado a quién lo enviamos; las fotografías y vídeos en Facebook® serán la crónica de una noche para olvidar. Si escribimos, Google® lo escaneará; si fotografiamos, Flickr® lo almacenará, si un vídeo, YouTube® lo conservará.

Culturómica es la aplicación del análisis de alto rendimiento, mediante IA, de megadatos (*big data*) para el estudio de la cultura humana; estrategia que representa un nuevo punto de partida para el análisis histórico más que una sustitución. Mediante el análisis del crecimiento, modificaciones y declinar de las palabras publicadas durante siglos, los matemáticos arguyen que será posible el estudio riguroso de la evolución de la cultura a gran escala utilizando las técnicas matemáticas facilitadas por la biología evolutiva. Otras «disciplinas», como la astrofísica también hacen préstamos a la culturómica; tal es el caso, por ejemplo, de «materia oscura» que en esta última se refiere al léxico común que no se refleja en los diccionarios (el 50%, aproximadamente). Para Anthony Grafton, un historiador de la Universidad de Princeton, se ha iniciado un camino fantástico, aunque añade, «para algunos —como pasa con frecuencia ante cualquier novedad, puede añadirse—, la aproximación culturómica a las humanidades es algo ajeno, una intromisión». Una poesía puede sentirse, pero también medirse. Han podido estudiar la evolución de palabras desde Shakespeare, la regularización de los verbos ingleses o la variación temporal de la frecuencia y el significado de las palabras.

Lieberman Aiden ha dado un paso más allá de los cofundadores de Google® —Larry Page y Serguéi Brin—, de Apple® —Steve Jobs, Ronald Wayne y Stephen Wozniak— o de Microsoft® —William Henry Gates III (Bill Gates) y Paul Allen—. Todos estos transgredieron las fronteras disciplinares; Lieberman las ignora. Un poema se siente, pero también puede medirse. Se acaban de abrir las puertas a la digitalización de las humanidades. También, el conocimiento innovador, transgresor, ha escapado de la Universidad tradicional. Una reunión académica —*Shared Horizons*— en Maryland, en la primavera de 2013, organizada por los *National Institutes of Health*, el *National Endowment for the Humanities* y la *National Library of Medicine*, congregó a un grupo de investigadores interesados desde la historia a las lenguas africanas y a la ciencia de la computación, desde la microbiología a la retórica y la poética a la zoología.

Lo anterior va de la mano de la capacidad de los individuos para crear, transferir y acceder a la información de manera global. Un grupo internacional de científicos está animado para crear un simulador que pueda replicar todo lo que acontece en el planeta, desde pronósticos meteorológicos y diseminación de brotes epidémicos a transacciones financieras internacionales o contenido de los innumerables SMS (*Short Message Service*). Bautizado como el *Living Earth Simulator* (LES), el proyecto pretende comprender todo lo que sucede en relación con las acciones humanas que perfilan las diferentes sociedades o culturas y el medio ambiente que condiciona el mundo físico. Dirk Helbing, codirector con Steven Bishop de FuturICT —megaproyecto que pretende construir el LES—, comenta que «muchos de los problemas de hoy —inestabilidades sociales y económicas— están condicionadas por el comportamiento humano; sin embargo, existe una brecha, hoy por hoy infranqueable, respecto a cómo funcionan la sociedad y la economía». De igual modo que el LHC ha dado un impulso sin precedentes a la física, es necesario un enorme acelerador de conocimiento que provoque la colisión de las diferentes facetas del quehacer humano. Como el LHC o el complejo ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) son ejemplos de la «gran ciencia» a la que se incorporó HUGO (*Human Genome Organization*) —todos ellos pertenecientes a las «ciencias experimentales»—, LES puede llegar a ser el representante en este «club» de las humanidades y las ciencias sociales.

«FuturICT es un proyecto visionario que aportará nueva ciencia y tecnología para explorar, comprender y gestionar nuestro mundo globalmente interconectado. Inspirará nuevas tecnologías de información y comunicación (ICT), socialmente adaptativas e interactivas, que soportaran una inteligencia colectiva». La plataforma FuturICT contempla un sistema nervioso planetario, un simulador Tierra viviente y una plataforma de participación global, que facilitarán una coevolución simbiótica de las TIC y la sociedad. En resumen, un enfoque convergente y complejo para que seamos capaces de reaccionar a «la ocurrencia de una aceleración acelerada del conocimiento» y contribuir al fortalecimiento de nuestras sociedades. Ello mediante el desarrollo de nuevos enfoques, métodos y tecnologías como el modelado computacional multiescalar, supercomputación social, minería de datos a gran escala, IA o plataformas participativas. «Computación global para nuestro mundo complejo».

Sirva de **EPÍLOGO** la denominada *Wisconsin idea*, atribuida al que fuera Presidente de la Universidad, Charles R. Van Hise, en 1904. Establece que el principio educativo y formativo debe mirar más allá del campus universitario. La *Wisconsin Idea* no es un concepto abstracto. Es, a la vez, una filosofía práctica, una visión a largo plazo, una ruptura epistemológica con el pasado, una actitud y un método. La *Wisconsin Idea* es:

«La preocupación idealista y humana de que el conocimiento pueda y deba tener un impacto práctico en las necesidades, problemas y aspiraciones de las personas.»

---

## REFERENCIAS.

La exposición presentada se ha realizado, principalmente, por la colaboración con el Prof. Ricard Solé Vicente, de la UPF y del ISF, y, en particular, en la presentación de Pedro R. García Barreno y R. S. V.: *Convergencia: Ciencias, Tecnología/Ingeniería, Matemáticas, Arte, Humanidades. Un proyecto para un Instituto de Complejidad*. Madrid: Deloitte, 19 nov. 2019.

Las obras de referencia, artículos y libros pueden encontrarse, principalmente en las páginas de Ricard Solé Vicente:

<https://producciocientifica.upf.edu/CawDOS/jsf/seleccionActividades/seleccionActividades.jsf?id=b0b22c478936d79a&idioma=ca&tipo=activ&elmeucv=N>  
<https://www.cccb.org/es/participantes/ficha/ricard-sole/34437>

También en: [www.pedrogarciabarreno.es](http://www.pedrogarciabarreno.es)

Los temas de complejidad están disponibles en la página del *Santa Fe Institute*, NM, EE. UU.: <https://www.santafe.edu/>,

y en las páginas, fáciles de encontrar, de los diversos temas.

National Academies. *Convergence. Facilitating Transdisciplinary Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering, and Beyond*. National Academies Press: Washington, D.C. 2014.

Massachusetts Institute of Technology. *The Third Revolution: The Convergence of the Life Sciences, Physical sciences, and Engineering*. MIT: Washington, D.C. 2011.

---

**Ciclo de “charlas” académicas. RAE.  
Madrid, 18 de mayo de 2023.**

---