

EL CEREBRO ¿UNA MÁQUINA ANALÓGICA CON FUNCIONAMIENTO CUÁNTICO?

MARTA MARTÍNEZ-MORGA^{1, 2}, DANIEL GARRIGÓS², SALVADOR MARTÍNEZ¹¹Instituto de Neurociencias UMH-CSIC, San Juan de Alicante, ²Departamento de Anatomía Humana y Psicobiología. Fac. Medicina. IMIB-Arrixaca. Univ. Murcia.

Resumen La neurociencia moderna aborda el problema de funcionamiento global del cerebro para poder comprender los procesos neurobiológicos que subyacen a las funciones mentales, y especialmente, a la consciencia. La actividad cerebral está basada en el intercambio de información entre neuronas a través de contactos llamados sinapsis. Las neuronas forman redes de conexión entre ellas (circuitos), que están dedicados a procesar una parcela específica de información (visual, auditiva, motora...). Los circuitos establecen redes entre ellos, combinando diferentes modalidades de información para generar lo que conocemos como actividad mental. El estudio de las conexiones entre regiones corticales, que se ha llamado conectoma, está siendo abordado mediante técnicas de neuroimagen como la resonancia magnética nuclear, que aportan datos sobre la densidad de conexiones del cerebro. La capacidad del cerebro de crear nuevas conexiones en función de la experiencia (plasticidad cerebral), sugiere que el conectoma es una estructura dinámica en constante interacción con estímulos externos e internos. La pregunta sobre si el conocimiento del conectoma de un individuo nos permitiría predecir su conducta parece que todavía no tiene respuesta clara, porque no conocemos los parámetros físicos que ligan la complejidad de las conexiones del cerebro con la aparición de las funciones mentales y de la consciencia. Por el momento, parece que la compleja e impredecible conducta no es el simple resultado de procesos lineales de interacción neuronal. La incertidumbre prima al determinismo, lo que abre la puerta a la posibilidad de un mecanismo cuántico para explicar la consciencia.

Palabras clave: redes neuronales, neurobiología cuántica, mente cuántica, conectoma cuántico

Abstract *The brain. An analogic machine with quantum functioning?* Modern neuroscience addresses the problem of the global functioning of the brain in order to understand the neurobiological processes that underlie mental functions, and especially, consciousness. Brain activity is based on the exchange of information between neurons through contacts or synapses. Neurons form networks of connection between them (circuits), which are dedicated to processing a specific type of information (visual, auditory, motor...). The circuits establish networks among themselves, combining different modalities of information to generate what we know as mental activity. The study of connections between cortical regions, which has been called connectome, is being approached through neuroimaging techniques such as nuclear magnetic resonance that provide data on the density of connections in the brain. The brain's ability to create new connections based on experience (brain plasticity) suggests that the connectome is a dynamic structure in constant interaction with external and internal stimuli. The question about whether knowledge of an individual's connectome would allow us to predict his or her behavior seems to have no clear answer yet, because we do not know the physical parameters that link the complexity of the brain's connections with the appearance of mental functions and consciousness. At the moment, it seems that the complex and unpredictable behavior is not the simple result of linear processes of neuronal interaction. Uncertainty prevails over determinism, which opens the door to the possibility of a quantum mechanism to explain consciousness.

Key words: neural networks, quantum neurobiology, quantum mind, quantum connectome

El abordaje reduccionista y el determinismo biológico siguen siendo los principales paradigmas de la biología actual, incluida la neurobiología. La creencia dominante es que "cualquier cosa puede reducirse a interacciones mecánicas simples y obvias". La idea cartesiana del hombre-máquina sigue presente en la actualidad: "La célula es una máquina, el animal es una máquina y el

hombre es una máquina"¹. Como alternativa a este reduccionismo mecanicista, basado en fenómenos causales químicos y físicos (mecánica clásica) que determinan que los procesos ocurran de forma predecible, hay datos experimentales que demuestran que la evolución ha podido seleccionar y explotar características de la mecánica cuántica para un procesamiento rápido y eficiente. Por ejemplo, la coherencia cuántica se ha encontrado tanto en bacterias fotosintéticas como en algas marinas². Otro ejemplo de dinámica cuántica en sistemas vivos se encuentra en los fotorreceptores de la retina: con técnicas

de resonancia magnética nuclear y espectroscópica de alta resolución se revelaron ondas cuánticas coherentes en la molécula de rodopsina³. También se han descrito efectos cuánticos en el sistema olfativo de roedores^{4, 5} y en la magneto-recepción en las aves⁶. Fenómenos de entrelazamiento cuántico⁷ de larga duración en los cromosomas de la retina parecen respaldar la sensibilidad del ojo de un pájaro a los campos magnéticos.

Es, por lo tanto, posible que existan efectos cuánticos en la interacción entre estructura y función del cerebro, es decir, que expliquen cómo de la compleja red de conexiones neurales puedan surgir los procesos que identificamos como actividad mental y consciencia. En esta revisión nos vamos a centrar en los aspectos relacionados con el desarrollo de los procesos neurobiológicos que puedan ser relevantes para entender las capacidades mentales y la consciencia, sin entrar en discusiones más amplias acerca de la significación metafísica de la consciencia y la panspícosis en relación con la mecánica cuántica⁸.

El cerebro: la frontera del conocimiento

Pensar en el cerebro como una máquina que realiza cálculos computacionales de estímulo-respuesta clásicos y deterministas sigue siendo muy popular en la neurociencia. De hecho, se habla de “computación neural” cuando se refiere al manejo de la información sensorial en los circuitos cerebrales. Sin embargo, la capacidad de explicar el funcionamiento del sistema nervioso mediante modelos lineales, predecibles, de computación está muy lejos de ser satisfactoria⁹. Como alternativa, hay evidencia experimental directa a favor de la hipótesis del cerebro como un órgano que funciona influenciado por fenómenos cuánticos, que desafiaría la visión determinista dominante del cerebro humano como una máquina sofisticada de procesamiento lineal clásico. Roger Penrose, matemático de la Universidad de Oxford y Premio Nobel de Física en 2020, ha desarrollado un amplio campo de conocimiento basado en la necesidad de implicar fenómenos de la física cuántica para entender la mente humana y la aparición de la consciencia¹⁰. Esto se apoya en datos experimentales que indican que el sistema nervioso es un sistema complejo dinámico no lineal con una actividad altamente estocástica. Parece pues, que necesitamos un “cambio de paradigma de los conceptos conductistas de estímulo-respuesta hacia nociones de codificación predictiva en redes recurrentes auto-organizadas con dinámicas dimensionales altas”¹¹.

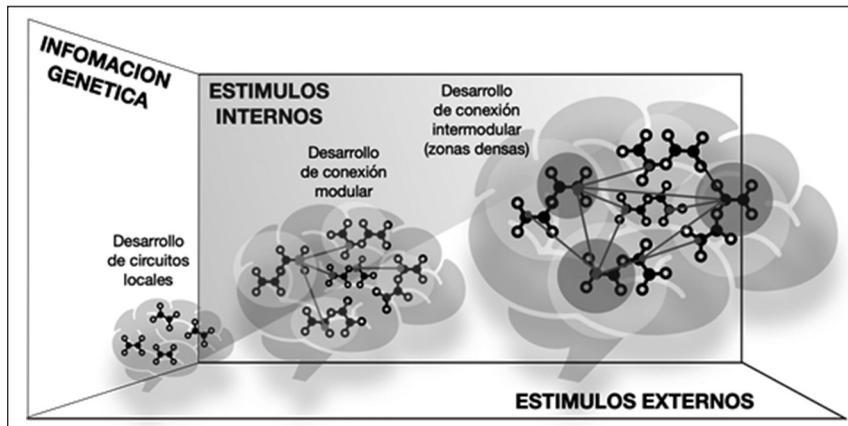
Las redes neuronales: el conectoma como sustrato de la mente

Las redes neuronales consisten en neuronas conectadas de manera no lineal, formando circuitos donde el flujo de la información se distribuye de forma progresiva con

bucles de retroalimentación. Las neuronas en los circuitos establecen conexiones en función del tipo de información que van a transmitir, con la formación de circuitos característicos de la especie, cuya construcción estará regulada por la información genética. El genoma codifica el patrón espacio-temporal de señales que durante el desarrollo van a guiar la formación de las conexiones entre neuronas^{12, 13}. Posteriormente, durante la vida postnatal, y sobre todo en la infancia y la adolescencia, la actividad de estos circuitos va a regular la densidad de conexiones mediante procesos de plasticidad sináptica, manteniendo y aumentando las conexiones en las partes activas de los circuitos y perdiendo las inactivas¹⁴. No se ha estudiado bien cómo se determina el patrón inicial de las conexiones neuronales en un circuito y el sentido del flujo de información, aunque se sabe que los procesos de actividad espontánea en algunas regiones del cerebro en desarrollo establecen los patrones iniciales de conectividad en circuitos lineales de conexión^{15, 16}. Por ejemplo, ondas de actividad espontánea en la retina establecen el patrón de conexión de sus proyecciones sobre el núcleo geniculado lateral y la actividad espontánea del tálamo, el patrón de la conectividad tálamo-cortical en la corteza cerebral. La actividad del circuito determinará la distribución de la información, creando subconjuntos dinámicos de neuronas con una conexión más densa y, por lo tanto, mayor relevancia en el procesamiento de información y en el resultado de la actividad del circuito. Los circuitos, a su vez, se conectan entre sí, creando módulos de mayor conexión de carácter multimodal (procesando diferentes tipos de información), también dependientes de la actividad, que irán concentrando el flujo de información más compleja y se convertirán en las regiones directrices de la conducta en un momento determinado^{13, 17} (Fig. 1).

El patrón de conexiones neuronales del cerebro en un momento determinado se conoce como el conectoma. Los procesos de plasticidad sináptica implican que el conectoma sea un patrón inestable, cambiante, que se adapta a las circunstancias del ambiente y que puede generar dinámicas complejas en función de las circunstancias, originando conductas muy diversas. Las respuestas del cerebro son más variables y ricas de lo esperado al observarlas de forma reduccionista. Debido a la complejidad estructural y plasticidad (adaptabilidad) del conectoma, es posible que, con el aumento del conocimiento de los procesos lineales (procesos que podemos definir como computacionales con resultados predecibles) que ocurren en una determinada circunstancia, podamos predecir la conducta y entender los procesos mentales. Esto implica la posibilidad de que computadores complejos, con alto poder computacional, puedan, en algún momento, desarrollar capacidades mentales y tener autoconsciencia. Como crítica a esta posibilidad sabemos que, en términos de capacidad de computación biológica, hay regiones en el cerebro, como es el cerebelo, donde hay muchas más

Fig.1.– Modelo de desarrollo de la conectividad en las redes neuronales. El patrón de conexiones generado bajo el control genético, se hace más complejo y plástico influenciado por estímulos externos (ambientales y del organismo) e internos (actividad espontánea)



neuronas y circuitos que en la corteza cerebral, y su actividad de control del sistema motor es mayoritariamente inconsciente.

Las fluctuaciones cuánticas y las redes neuronales

En contra de la hipótesis de la explicación cuántica de la mente y la consciencia, se acepta que, en nuestro cerebro y, en general, en los sistemas biológicos que se caracterizan por ser abiertos, húmedos y calientes, las fluctuaciones cuánticas que pueden ocurrir a nivel subatómico se auto-equilibran (cancelan) y, por lo tanto, no pueden contribuir a la dinámica funcional del órgano o sistema. Parece entonces que el sistema nervioso no puede mostrar comportamientos cuánticos a escala macroscópica, como el entrelazamiento cuántico, la superposición o la tunelización; y es por lo que la opinión predominante ha sido que los procesos cuánticos son irrelevantes para la función cerebral. Como alternativa, existen importantes trabajos que contrariamente identifican procesos de mecánica cuántica en los mecanismos más elementales de la biología y a lo largo de todo el proceso evolutivo¹⁸.

Que las fluctuaciones minúsculas de los estados funcionales de los órganos y sistemas, incluidos los eventos cuánticos, se cancelan a nivel macroscópico no tiene por qué ser cierto en sistemas altamente no lineales, como los circuitos neuronales del cerebro. El sistema nervioso puede entenderse como un patrón jerárquico y dinámico de redes complejas no lineales de moléculas, células, circuitos y redes neuronales, englobado dentro del concepto de conectoma. Podemos aceptar que, en jerarquías interactivas con dinámicas no lineales, como el conectoma cerebral, las fluctuaciones pequeñas (incluso infinitesimales) no se cancelan mutuamente, y que

pueden incluso amplificarse. Además, las fluctuaciones cuánticas en el nivel más bajo de la escala, circuitos locales de pocas neuronas, pueden influir en el estado inicial del siguiente nivel de la escala, a través de patrones de conexión entre módulos, mientras que los niveles más altos, áreas de conexión densa multimodal, dan forma a las condiciones límite, condiciones críticas de activación, de los más bajos. Así, esta jerarquía de redes dinámicas con muchos bucles de retroalimentación explota en lugar de cancelar los efectos cuánticos.

Se han obtenido evidencias experimentales de que las redes neuronales puedan producir patrones complejos de actividad colectiva, que se denominan “avalanchas neuronales”. Estas avalanchas se producen con un patrón de distribución característico: cada avalancha involucra a un número variable de neuronas, pero se observan muchas más avalanchas pequeñas (pocas neuronas activas) que avalanchas grandes (de muchas neuronas). Por lo tanto, el patrón de activación en las redes neuronales está cerca de las condiciones límite (que se inicie o no la avalancha) y son propensas a mostrar actividad compleja emergente al establecer combinaciones nuevas (impredecibles). Apoyando estas predicciones, mediante resonancia magnética funcional se han obtenido resultados que respaldan la criticidad de los patrones de activación cortical en el cerebro¹⁹. También ayudan a entender la generación de la actividad espontánea que dirige la formación de patrones de conexiones neuronales durante el desarrollo²⁰.

Dinámica funcional del conectoma: incertidumbre de los procesos mentales

En general, podemos observar tres tipos posibles de dinámicas de propagación de la información en el co-

nectoma cerebral: (1) dinámica ordenada/subcrítica, que consiste en actividad sincrónica oscilatoria con los rasgos característicos de alta coordinación y baja variabilidad, no activa avalanchas y representa el substrato de conexiones funcionando, por defecto, de manera determinista, (2) dinámica aleatoria/supracrítica, que consiste en actividad irregular asincrónica con baja coordinación y alta variabilidad, de gran variabilidad en patrones de avalanchas, ineficaces para influir en el sistema, y (3) dinámicas complejas/críticas con alta coordinación y alta variabilidad, las avalanchas son eficaces permitiendo propagación en las redes neuronales y el establecimiento de flujos de información coherentes. Por lo tanto, los estados cerebrales que exhiben dinámicas complejas/críticas son los más interesantes porque respaldan el procesamiento de información más eficiente y, sobre ellos, subyace el procesamiento de información que origina la actividad mental y la consciencia²¹.

En el punto crítico entre el orden y el desorden (es decir, al borde de la inestabilidad), las neuronas pueden comunicarse mejor, ya que en ese punto están coordinadas, pero no estancadas en un determinado estado durante mucho tiempo y pueden establecer correlaciones de largo alcance, explicables por procesos de mecánica cuántica. Finalmente, en el punto crítico de aparición de una avalancha o no (¡límite entre que el fenómeno ocurra o no!), se observa la mayor sensibilidad a las pequeñas fluctuaciones del estado de excitación: incluso la perturbación de una sola neurona tiene una probabilidad pequeña pero distinta de cero de desencadenar una avalancha.

Conclusión

La incertidumbre y las propiedades emergentes de la función cerebral son consecuencia del estado de desequilibrio crítico de la actividad en las redes neuronales del conectoma. La mecánica cuántica puede permitir desvelar la base física y química de los procesos mentales y la consciencia. En un mundo de actividad subcrítico (determinista), todo sería uniforme y predecible, no habría nada nuevo que aprender y por tanto no se necesitaría un cerebro crítico, motivado en el cambio, y plástico para adaptarse a las circunstancias. En un mundo supracrítico, todo estaría siempre cambiando sin regularidades que aprender, no hay patrones y la actividad tendería al caos. En nuestro mundo crítico (complejo e inestable), ocurren eventos sorprendentes (impresibles, originales), pero también hay regularidades (basadas en los límites físicos y biológicos del conectoma) que nos permiten diseñar conductas adaptativas, por lo que el cerebro necesita

registrar, pero también actualizar (evocar) los recuerdos almacenados.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no tienen ningún tipo de conflicto de intereses en el presente artículo.

Bibliografía

1. Monod J. BBC lecture. En: *Beyond Chance and Necessity*, ed. J. Lewis. London: Garnstone Press, 1974.
2. Amador-Bedolla C, Aspuru-Guzik A. La biología cuántica ¿un nuevo campo de la química? *Duc Quim* 2011; 22: 8-11.
3. Sia PI, Lutien AN, Stace TM, Wood JPM, Casson RJ and Franzco P. Quantum biology in the retina. *Clin Exp Ophthalmol* 2014; 6: 582-9.
4. Arndt M, Juffmann T, Vedral V. Quantum physics meets biology. *HFSP J* 2009; 3: 386-400.
5. Brookes J. Olfaction: the physics of how smell works? *Contemporary Physics* 2011; 52: 385-402.
6. Holland RA. True navigation in birds: from quantum physics to global migration. *J Zoology* 2014. 293:1-15.
7. Plenio MB, Virmani S. An introduction to entanglement measures. *Quantum Physics* 2001; 7: 1-51.
8. Goff P. Galileo's error. New York: Vintage Press ;2020.
9. Jedlicka P. Revisiting the Quantum Brain Hypothesis: Towards Quantum (Neuro)biology?. *Front Mol Neurosci* 2017; 10: 366.
10. Hameroff S, Penrose R. Consciousness in the Universe: a review of the 'Orch OR' theory. *Phys. Life Rev* 2014; 11, 39-78.
11. Singer W. Complexity as substrate for neuronal computations. *Complexity and Analogy in Science: Theoretical, Methodological and Epistemological Aspects*, 2015; 22: 209-218.
12. Martínez-Morga M, Martínez S. Desarrollo y plasticidad del cerebro. *Rev Neurol* 2016; 62S: 3-8
13. Cao M, Huang H; He Y. Developmental connectomics: from the infancy through early childhood. *TINS* 2017; 40: 8.
14. Martínez-Morga M, Martínez S. Plasticidad neuronal: la sinaptogénesis durante el desarrollo normal y su implicación en la discapacidad intelectual. *Rev Neurol* 2017; 64S: 45-50.
15. Blankenship AG, Feller MB. Mechanisms underlying spontaneous patterned activity in developing neural circuits. *Nat Rev Neurosci* 2010; 11: 18-29.
16. Kirkby LA, Sack GS, Firl A, Feller MB. A role for correlated spontaneous activity in the assembly of neural circuits. *Neuron* 2013; 80: 1129-44.
17. Dajani DR; Uddin LQ. Demystifying cognitive flexibility: implications for clinical and developmental biology. *TINS* 2015; 38: 571-8.
18. Torday JS. Quantum mechanics predicts evolutionary biology. *Prog Biophysics MolBiol* 2018; 135:11-5.
18. Deco G, Jirsa VK. Ongoing cortical activity at rest: criticality, multistability, and ghost attractors. *J Neurosci* 2012; 32: 3366-75.
20. Landmann S, Baumgarten L, Bornholdt S. Self-organized critically in neuronal networks from activity-base rewiring. *Phys res* 2021; 103: 032304.
21. Beegs JM, Timme N. Being critical of criticality in the brain. *Front Physiology* 2012; 3: 163.