

Cambio conceptual e innovación técnica: los desafíos de las neurociencias a la filosofía de las revoluciones científicas

Conceptual Change and Tool Development: The Challenges of the Neurosciences to the Philosophy of Scientific Revolutions

Sergio Daniel Barberis

CONICET-UNQ / UBA / UDESA, Argentina

sbarberis@filo.uba.ar

Resumen

El papel determinante que desempeña la innovación técnica en el progreso neurocientífico plantea desafíos especiales a la filosofía del cambio científico de raigambre kuhniana. Algunos filósofos de la neurociencia sostienen que las revoluciones en neurociencia no involucran cambios de paradigma, sino que dependen exclusivamente de la innovación técnica o experimental. Mediante el estudio del episodio histórico del descubrimiento de la neurona (1873-1909), argumento que las revoluciones en neurociencia, como muchas otras revoluciones de laboratorio, están frecuentemente impulsadas por el entrelazamiento de innovaciones técnicas y cambio conceptual.

Palabras clave: revolución científica, cambio conceptual, innovación técnica, método de Golgi, neurona.

Abstract

The determining role that tool development plays in neuroscientific progress poses special challenges to the Kuhnian-rooted philosophy of scientific change. Some philosophers of neuroscience argue that revolutions in neuroscience do not involve paradigm shifts, but instead depend exclusively on technical or experimental innovation.



Received: 21/08/2022. Final version: 14/11/2022

eISSN 0719-4242 – © 2022 Instituto de Filosofía, Universidad de Valparaíso

This article is distributed under the terms of the

Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License



CC BY-NC-ND

By studying the historical episode of the discovery of the neuron (1873-1909), I argue that revolutions in neuroscience, like many other laboratory revolutions, are frequently driven by the intertwining of technical innovations and conceptual change.

Keywords: scientific revolution, conceptual change, tool development, Golgi's method, neuron doctrine.

1. Introducción

¿Qué nos puede enseñar la historia de las neurociencias acerca de la estructura de las revoluciones científicas? El papel determinante que desempeña la innovación técnica en el progreso neurocientífico plantea desafíos especiales a la filosofía del cambio científico de raigambre kuhniana, centrada en el cambio conceptual.

Según el análisis de las revoluciones científicas de Thomas Kuhn (1970; 2000), la historia de una disciplina científica particular se puede dividir en distintas etapas. La etapa de desarrollo pre-paradigmático de una disciplina muestra una gran cantidad de escuelas en competencia y la ausencia de un enfoque dominante para la resolución de problemas. Hay científicos y científicas, pero no hay comunidad científica, dice Kuhn. A través de una revolución científica inicial, el enfoque de una escuela logra imponerse como paradigma dentro del campo. Todos los y las profesionales aprenden las leyes del paradigma, sus metáforas predilectas, sus técnicas experimentales y las aplicaciones empíricas más destacadas. Sobreviene entonces la etapa de ciencia normal, durante la cual el paradigma progresa poco a poco, de manera acumulativa. Sin embargo, por la naturaleza misma de la investigación normal, comienzan a surgir anomalías, problemas cuya solución resulta intuitivamente prometedora dentro del paradigma, pero que se muestran recalcitrantes a la integración. Si las anomalías se acumulan, el paradigma entra en crisis. Durante la crisis, los y las practicantes conservadores se aferran al paradigma aún dominante y continúan persiguiendo la ciencia normal; los y las practicantes radicales, a menudo científicos y científicas más jóvenes, comienzan a articular un nuevo paradigma, con nuevas leyes, nuevos conceptos y nuevas aplicaciones empíricas. En esta etapa sobreviene la ciencia revolucionaria, un proceso de polarización de la comunidad que no puede resolverse solamente apelando a la evidencia y al argumento racional. La ciencia revolucionaria se caracteriza por dificultades en la comunicación comunitaria, como si los defensores y defensoras de paradigmas en competencia hablaran lenguajes parcialmente intraducibles entre sí. Esta intraducibilidad es un síntoma de la inconmensurabilidad entre las clasificaciones de la naturaleza de un paradigma y otro. Las revoluciones científicas exitosas implican un cambio en la *ontología* básica de la disciplina (Hoyningen-Huene 1993; Kuhn



2017). Cuando el nuevo paradigma triunfa, el anteriormente dominante se abandona, a menudo porque sus defensores se jubilan o mueren; la agenda básica del nuevo paradigma se lleva adelante y sobreviene un nuevo período de ciencia normal.¹

¿Es posible aplicar el llamado “ciclo de Kuhn” a las neurociencias? A menudo se argumenta que las revoluciones reales en neurociencia no se ajustan al modelo de Kuhn. Ian Hacking (2012) recuerda que el primer modelo de Kuhn se basaba principalmente en la historia de la física y la química y que, cuando se publicó la *Estructura...* la biología molecular, y no la física, era el campo donde realmente estaba la acción. Curiosamente, según la historiografía del llamado “Nuevo Mecanicismo”, que es la concepción dominante en filosofía de la neurociencia (y en la filosofía de la biología funcional, en general), o bien no existen revoluciones en la historia de la neurociencia (Craver & Alexandrova 2008; Craver & Darden 2013)², o bien el cambio “revolucionario” no tiene la estructura de las revoluciones kuhnianas (Piccinini & Boone 2016).³ Entre estos últimos, algunos filósofos de la neurociencia sostienen que las revoluciones en neurociencia dependen exclusivamente de la innovación técnica o experimental (Bickle 2016; 2022). En particular, John Bickle (2016) se pregunta si la “influencia equivocada” del modelo de Kuhn no será “una reliquia persistente de la filosofía de la ciencia de mediados

¹ En sus últimos trabajos, Kuhn revisó y perfeccionó sustancialmente su modelo original (Kuhn 2000). Se centró cada vez más en la red conceptual, la taxonomía o el léxico de las teorías científicas como unidades de análisis, y en la inconmensurabilidad semántica entre taxonomías como marca del cambio científico revolucionario. Caracterizó este último como el descubrimiento de una entidad que viola el principio de no solapamiento, según el cual dos términos de género no pueden superponerse en sus referentes a menos que estén relacionados como especie con el género. Por ejemplo, el descubrimiento del movimiento de la Tierra por parte de Copérnico violó la clasificación preexistente de los cuerpos celestes, es decir, la extensión del planeta después del descubrimiento de Copérnico se superpuso parcialmente con la extensión de su homólogo precopernicano, violando el principio de no superposición. Así, el cambio revolucionario implica un cambio en los criterios para determinar la pertenencia a una especie taxonómica y una redistribución de referentes entre categorías preexistentes. A pesar de los esfuerzos analíticos tardíos de Kuhn, sigue sin estar claro cómo individualizar la taxonomía, el léxico o la red conceptual adecuada de una teoría determinada y, por lo tanto, no está claro cómo se puede determinar una violación real del principio de no solapamiento (Politi 2020; Ginnobili & Barberis, en prensa).

² Carl Craver (2007) señala que la neurociencia “normal” alberga una diversidad de disciplinas, tradiciones y grupos de investigación relativamente autónomos, que conforman un mosaico de esquemas explicativos y estilos representacionales en proyectos interdisciplinarios locales, sin nuclearse en torno a ningún principio o generalización simbólica unificadora. En este sentido, las neurociencias exhiben una forma de progreso *normal* en ausencia de un paradigma teórico dominante.

³ El concepto de “revolución científica” no se encuentra muy explorado en la literatura mecanicista reciente en filosofía de la neurociencia. Encuentro sólo dos papers donde el concepto se menciona, aunque no se lo elucida, Piccinini & Boone (2016) y Milkowski et al (2018). En ambos casos, una revolución mecanicista consiste en el surgimiento y desarrollo de esquemas mecanicistas en campos científicos en los cuales no había ningún esquema mecanicista dominante (la ciencia cognitiva clásica y la ciencia cognitiva 4E, respectivamente).

del siglo XX”, cuando la física era considerada la reina de las ciencias. Las revoluciones en neurociencia, afirma Bickle, no giran en torno a la acumulación de anomalías, ni dependen de paradigmas en competencia, sino que dependen exclusivamente del desarrollo de nuevas herramientas.

Mediante el estudio del episodio histórico del descubrimiento de la neurona (1873-1909), argumento que las revoluciones en neurociencia, como muchas otras revoluciones de laboratorio, están frecuentemente impulsadas por el entrelazamiento de innovaciones técnicas y cambio conceptual. El plan de exposición es el siguiente. En la sección 2, aplico el marco metateórico que Bickle ofrece de las revoluciones impulsadas por la innovación técnica para elucidar los esfuerzos que llevaron a la consolidación del método de Golgi. En la sección 3, argumento que reconocer el potencial revolucionario de una innovación técnica no es incompatible con la admisión del potencial revolucionario del cambio conceptual. En particular, rechazo el escepticismo de David Parker (2018), quien en su afán de reivindicar a Kuhn desestima el papel potencialmente revolucionario del desarrollo de herramientas. En la sección 4, muestro cómo la innovación conceptual y el desarrollo de herramientas se amalgaman en el caso del descubrimiento de la neurona. Finalmente, ofrezco algunas conclusiones.

2. Revoluciones impulsadas por la técnica: el caso de la tinción de Golgi

En esta sección, aplico el marco metateórico que Bickle ofrece de las revoluciones impulsadas por la innovación técnica para elucidar los esfuerzos de Camillo Golgi y Santiago Ramón y Cajal que llevaron a la consolidación del método de Golgi como base de la neuroanatomía moderna. Bickle (2016) despliega originalmente su tesis mediante el análisis de cuatro estudios de caso, tomados de la historia de la neurociencia de la memoria. En primer lugar, en la década de 1950, la invención, por parte de David Hubel y Torsten Wiesel, de los micro-electrodos de alta impedancia para el registro de la actividad de neuronas individuales en animales vivos, fue el desencadenante de la revolución de la neurociencia de la visión (Hubel & Wiesel 1959). En segundo lugar, a comienzos de la década del noventa, el desarrollo de las técnicas de ingeniería genética que permitían “noquear” la actividad de genes específicos en ratones, desencadenó la neurociencia molecular de la conducta (Silva et al., 1992). En tercer lugar, el desarrollo de las técnicas de neuroimagen, como la tomografía por emisión de positrones y la resonancia magnética funcional, fue el fundamento de la explosión de las neurociencias cognitivas en la década de 1990 (Kwong et al. 1992). Por último, la optogenética, una técnica de 2005 que permite activar o desactivar tipos específicos de neuronas mediante un haz de luz, se perfila como una nueva revolución en la neurociencia molecular de la conducta (Boyden et al. 2005). Bickle analiza la estructura de estas revoluciones impulsadas por la innovación técnica en neurociencias mediante tres conceptos meta-científicos (no kuhnianos), a saber: el *problema motivador*, el *gancho experimental inicial* y el *gancho experimental de segunda fase*.

El problema motivador es multifacético, una combinación de múltiples problemas técnicos con una dinámica interactiva. No es una anomalía paradigmática, es decir, los intentos en la dirección de la nueva herramienta son esperables bajo el paradigma, pero la comunidad le asigna una baja probabilidad de éxito. Por ejemplo, Francis Krick, el padre de la neurociencia de la conciencia, había sugerido en 1979 que podría utilizarse luz para estimular tipos específicos de neuronas, en este sentido, la idea no era nueva. Pero hasta el resultado del laboratorio de Karl Deisseroth de 2005, nadie sabía cómo hacerlo exitosamente. El gancho experimental inicial viene dado por los primeros resultados publicados usando la nueva herramienta. Típicamente se trata de un paper (o de una serie de papers) que se publican en una revista top del campo; en este paper, los y las neurocientíficas aplican específicamente la herramienta a una población *target* y dan cuenta de un fenómeno de interés para la comunidad. El primer gancho captura, de esta manera, un nuevo eslabón en la cadena causal que explica un fenómeno (Haueis 2022). Por último, el gancho experimental de segunda fase consiste en un resultado publicado que le provee a la herramienta experimental un campo mayor de aplicación. El segundo gancho demuestra, en este sentido, la textura abierta de la técnica, su versatilidad para participar de la identificación de otros eslabones causales en la explicación de otros fenómenos de interés (Haueis 2022).

¿Existen ejemplos de revoluciones motorizadas por la innovación técnica anteriores a 1950, quizá más fundacionales del campo neurocientífico? En la revolución científica que dio origen a la neurociencia moderna como tal, y que tuvo lugar en el último tercio del siglo diecinueve, encontramos fácilmente los componentes del ciclo de Bickle. Hacia 1860 estaba claro que el tejido nervioso contenía cuerpos celulares, por un lado, y fibras nerviosas, por el otro, pero la relación entre células y fibras era una incógnita. Las células nerviosas, en general, tienen una estructura ramificada, algunas de esas ramas nacen del cuerpo celular y recorren largas distancias, enredándose a lo largo del camino con las ramas provenientes de otras células. Guido Cimino (1999, 434) describe esa etapa de la investigación sobre la estructura microscópica del sistema nervioso en los siguientes términos:

El progreso (en la investigación histológica) estuvo estrechamente relacionado con las innovaciones en los instrumentos y técnicas de observación microscópica. Los microscopios no solo eran cada vez más potentes y técnicamente refinados, sino cada vez más avanzados (técnicas de fijación, endurecimiento, inclusión, seccionamiento y coloración). Entre estas técnicas, los métodos empleados para la coloración o impregnación adquirieron una gran importancia, en parte gracias al progreso de la industria química que producía los colorantes, y en parte a la conciencia de que varios tejidos, y por lo tanto varios tipos de células, reaccionaban de manera diferente a diferentes sustancias y se tiñen de manera diferente.

El problema motivador consistía, entonces, en desarrollar una técnica de tinción del tejido nervioso que permitiese visualizar, bajo el microscopio, sus elementos componentes, con claridad y distinción. Esto quiere decir: visualizar la célula nerviosa en toda su extensión, hasta la terminación de sus ramas más distantes, y de manera separada, distinguiendo la

célula individual sobre el trasfondo del bosque celular (DeFelipe & Jones 1992; Mazzarello 2010; Fiorentini 2011). El gancho experimental inicial vino dado por la invención, por parte del histólogo italiano Camillo Golgi, del método de tinción del tejido nervioso basado en el nitrato de plata, la *reazione nera* o reacción negra. Varios historiadores de la ciencia lo llaman un “método revolucionario” (Cimino 1999; Shepherd 2015; Bentivoglio et al. 2019). Por mecanismos todavía desconocidos, el método permite visualizar selectivamente, en color negro, los cuerpos celulares, dendritas y axones de algunas pocas células por pieza, sobre un trasfondo de color amarillo. En palabras de Cajal (1909, 29):

¡Qué visión inesperada! Sobre un fondo amarillo perfectamente translúcido aparecen, dispersos aquí y allá, filamentos negros, lisos y delgados, o espinosos y gruesos, ¡cuerpos negros en forma de triángulos, estrellas o tubos! Se podría decir que eran dibujos hechos con tinta china sobre papel japonés. El ojo que estaba acostumbrado a los enredos inextricables de las secciones de carmín y hematoxilina -que obligaban a la mente a hacer enormes esfuerzos de interpretación y crítica- ahora está bastante consternado. Aquí todo es simple, claro y sin confusión. Ya no queda nada por interpretar; basta ver y observar esta célula con sus intrincadas ramas múltiples, cubiertas de escarcha, abrazando con sus ondulaciones un espacio extraordinariamente grande; esta fibra lisa y uniforme que, surgiendo de la célula, se aleja para recorrer una enorme distancia y de repente se despliega en un ramillete de innumerables fibras en ciernes (...) El ojo queda atónito y no puede apartarse de esta contemplación. *El sueño técnico se ha hecho realidad*. La impregnación metálica ha dado lugar a esta imagen inesperada. Este es el método de Golgi.

Golgi publica la primera y escueta descripción del método, así como el primer reporte de resultados, en una comunicación preliminar publicada en la *Gaceta Médica Italiana* de 1873:

Aprovechando el método, encontrado por mí, de la tinción negra de los elementos del cerebro, tinción obtenida por la inmersión prolongada de las piezas, previamente endurecidas con bicromato de potasio o amonio, en una solución al 0,50 o al 1,0% de nitrato de plata, descubrí algunos hechos sobre la estructura de la materia gris cerebral que creo que merecen comunicación inmediata.” (Golgi 1873)

En un artículo de 1875, Golgi describe por primera vez la morfología de las células del bulbo olfatorio del perro, incluyendo una extraordinaria lámina con la primera visualización de la arquitectura completa de una región cerebral (Golgi 1875) (Fig.1).



Figura 1. Bulbo olfatorio del perro, impregnado por el método de Golgi (Golgi 1875; reimpresso en Shepherd et al. 2011).

Desde una perspectiva fisiológica, según Golgi, las distintas “provincias” del sistema nervioso compartían la estructura de una única red difusa, continua y compleja, conformada por el entrelazamiento de los axones de las distintas células. Esta red nerviosa, como totalidad, era el verdadero órgano de la percepción, el pensamiento y la acción. Esta idea aparece completamente desarrollada en su exitoso atlas de anatomía del sistema nervioso (Golgi 1885). Volveré sobre esta idea más adelante.

El método de Golgi tuvo una recepción mixta en la comunidad internacional y permaneció latente hasta 1888, cuando ocurrió el segundo gancho experimental, de la mano de los estudios micrográficos del tejido nervioso del anatomista español Santiago Ramón y Cajal (Cajal 1888). Cajal mejoró el método de Golgi de diversas maneras. Inventó un procedimiento de doble impregnación, que mejoró la nitidez de las piezas y la replicabilidad de los resultados (DeFelipe & Jones 1992). A diferencia de Golgi, Cajal aplicó la técnica principalmente sobre tejido nervioso embrionario. En los embriones, los axones todavía no están recubiertos de mielina, por lo que pueden impregnarse mejor y visualizarse hasta su terminación.

[El] gran enigma de la organización del cerebro se cifra en averiguar el modo de terminarse las ramificaciones nerviosas y de enlazarse recíprocamente las neuronas. Reproduciendo un símil ya mencionado, tratábase de inquirir cómo rematan las raíces y las ramas de esos árboles de la sustancia gris, de esa selva tan densa que, por refinamiento de complicación, carece de vacíos, de suerte que los troncos, ramas y hojas se tocan por todas partes. Dos medios ocurren para indagar adecuadamente la forma real de los elementos de este bosque inextricable. El más natural y sencillo al parecer, pero en realidad el más difícil, consiste en explorar intrépidamente la selva adulta, limpiando el terreno de arbustos y plantas parásitas, y aislando, en fin, cada especie arbórea, tanto de sus parásitos como de sus congéneres. (...) El segundo camino ofrecido a la razón constituye lo que, en términos biológicos, se designa método ontogénico o embriológico. Puesto que la selva adulta resulta impenetrable e indefinible, ¿por qué no recurrir al estudio del bosque joven, como si dijéramos, en estado de vivero? Tal fue la sencillísima idea inspiradora de mis reiterados ensayos del método argéntico en los embriones de ave y de mamífero. Escogiendo bien la fase evolutiva, o más claro, aplicando el método antes de la aparición de la vaina medular de los axones (obstáculo casi infranqueable a la reacción), las células nerviosas, relativamente pequeñas, destacan íntegras dentro de cada corte; las ramificaciones terminales del cilindro-eje dibújanse clarísimas y perfectamente libres; los nidos pericelulares, esto es, las articulaciones interneuronales, aparecen sencillos, adquiriendo gradualmente intrincamiento y extensión; en suma, surge ante nuestros ojos, con admirable claridad y precisión, el plan fundamental de la composición histológica de la sustancia gris. Para colmo de fortuna, la reacción cromo-argéntica, incompleta y azarosa en el adulto, proporciona en los embriones coloraciones espléndidas, singularmente extensas y constantes. (Cajal 2006, 402-403)

Por último, Cajal nunca creyó en la existencia de una red difusa, continua y compleja de axones. Sus dibujos micrográficos, que son verdaderas obras de arte, además de documentos científicos, demuestran visualmente que cada célula nerviosa constituye un “cantón completamente autónomo” (Cajal 1888) desde el punto de vista anatómico, fisiológico y del desarrollo, como los árboles individuales que conjuntamente componen un tupido bosque. De esta manera, el trabajo de Cajal permitió independizar la técnica de Golgi de los presupuestos reticularistas de su creador, dándole a la técnica una vida propia en biología y ampliando indefinidamente su campo de aplicación.

3. Escepticismo respecto de las revoluciones guiadas por la técnica

En esta sección, argumento que reconocer el potencial revolucionario de una innovación técnica no es incompatible con la admisión del potencial revolucionario del cambio conceptual. En particular, rechazo el escepticismo de David Parker (2018), quien en su afán de reivindicar el concepto kuhniano de revolución científica en neurociencia desestima el papel potencialmente revolucionario del desarrollo de herramientas.

En primer lugar, Parker (2018) argumenta que los ejemplos de revoluciones técnicas que ofrece Bickle no son ejemplos genuinos de revoluciones científicas, porque no involucran ningún tipo de cambio conceptual y, por lo tanto, no implican ningún tipo de inconmensurabilidad entre los viejos y los nuevos esquemas clasificatorios. No hay un cambio en la ontología de la disciplina. Las nuevas herramientas se acumulan normalmente, sin sustitución. Las herramientas y técnicas experimentales prerrevolucionarias no se extinguen después de una revolución técnica, al menos no como se abandonan las teorías paradigmáticas después de una revolución kuhniana. Su uso en investigación puede disminuir abruptamente y su campo de aplicación puede reformarse, pero pueden recuperar popularidad debido a cambios en la agenda científica. Respecto de este primer argumento, cabe señalar que no todas las revoluciones kuhnianas son destructivas. Algunos filósofos y filósofas de la ciencia sostienen que la forma de desarrollo teórico denominada “incrustación teórica”, aunque es muy diferente de la ciencia normal, es, no obstante, marcadamente continuo y acumulativo (Caamaño Alegre 2018)

En segundo lugar, Parker identifica varios paradigmas específicos de la neurociencia cuyos itinerarios históricos evocan la estructura de las revoluciones kuhnianas: el paradigma de la electricidad animal, el de la localización cortical, la doctrina de la neurona, el paradigma de los neurotransmisores y el de la neurogénesis adulta. Por razones de espacio y capacidad, me limitaré al caso de la doctrina de la neurona. Según esta doctrina, la célula nerviosa individual, compuesta por el cuerpo celular, las expansiones dendríticas, el axón y las colaterales y ramillas terminales del axón, es la unidad anatómica, fisiológica y de desarrollo del sistema nervioso. Cada neurona constituye, en sí misma, una unidad de funcionamiento y está conectada con otras neuronas sólo a través de ciertos “puntos específicos de contacto” (según la expresión de Cajal 1889), a los cuales el fisiólogo británico Charles Sherrington, en 1897, llamará “sinapsis” (Sherrington 1897). Según esta doctrina toda función del sistema nervioso debe explicarse, en última instancia, por la actividad de los distintos tipos de neuronas, verdaderas “mariposas del alma”, en palabras de Cajal (2006).

Para Parker (2018), el descubrimiento de la neurona refleja una revolución kuhniana inicial, un desarrollo a partir de un estado pre-paradigmático, caracterizado en este caso por la controversia entre una escuela reticularista (integrada, con diferencias, por Joseph von Gerlach y Golgi) y una escuela neuronista (integrada por Wilhelm His, Auguste Forel, Fridtjof Nansen, y el propio Cajal) (Shepherd 2015). De manera crucial, el desarrollo de la tinción de Golgi no pudo haber disparado el paradigma neuronal, como sostendría Bickle, justamente

porque la tinción cromoargéntica fue utilizada para defender tanto el paradigma reticularista, con Golgi, como el paradigma neuronista, con Cajal. Este estudio de caso sugiere, entonces, que el desarrollo de nuevas herramientas ha desempeñado un papel *menor* en las revoluciones neurocientíficas.

Al respecto, cabe señalar que esta última sugerencia no es estrictamente kuhniana. La idea de “anomalía” del Kuhn temprano (Kuhn 1951), a partir del estudio de la revolución química, sugiere que, muchas veces y en casos típicos, el desarrollo de herramientas puede conducir al descubrimiento de entidades que impulsen el cambio conceptual revolucionario. Parker argumenta que la técnica de tinción de Golgi no podría haber sido revolucionaria porque fue aceptada tanto por las escuelas reticularistas como por las neuronistas. Pero lo mismo podría decirse del telescopio en la polémica entre copernicanos y ticomónicos en el siglo XVII. Tanto Galileo como Grassi aceptaron el telescopio. Sin embargo, hay un sentido interesante (justamente, el sentido de “anomalía” de Kuhn 1951) en el que el desarrollo del telescopio fue revolucionario.

Por otra parte, el cambio conceptual clave en el descubrimiento de la neurona fue, según Parker, el “insight conceptual” de Cajal de trabajar con sistemas más simples, en las primeras etapas de desarrollo. Sin embargo, este insight podría interpretarse como una simple extrapolación del método experimental adoptado por el trabajo embriológico de His (1886). Otros historiadores consideran que se trata de una convicción teórica fundada en última instancia en la ley epigenética de Haeckel, es decir, en la teoría de la recapitulación (Lain Entralgo 1949). En cualquier caso, no está nada claro que la decisión de trabajar con embriones, es decir, el “método ontogenético” de Cajal, fuera una innovación “conceptual” o “técnica” o una mezcla de ambas.

4. Revoluciones impulsadas por ideas y técnicas: el caso del descubrimiento de la neurona

Pero entonces, ¿el cambio conceptual no desempeña ningún papel importante en las revoluciones neurocientíficas? ¿Es posible reconciliar las visiones unilaterales de Bickle y Parker acerca de las revoluciones en neurociencia? El filósofo de la neurociencia alemán Philipp Haueis (2022) sostiene que, aún en los casos genuinos de cambio científico guiados por la innovación técnica, como los ejemplos enfatizados por Bickle, el desarrollo de herramientas y la formación de nuevos conceptos están frecuentemente entrelazados. En esta sección, muestro cómo la innovación conceptual y el desarrollo de herramientas se entrelazan en el descubrimiento de la neurona.

El propio Bickle (2016) admite que su foco exclusivo en las revoluciones en la neurobiología de la memoria a partir de 1950 podría ocultar una “distinción potencialmente intrigante” entre el desarrollo de herramientas (no kuhniano) y el desarrollo conceptual (amigable con Kuhn). Una perspectiva temporal más amplia sobre las revoluciones en la neurociencia moderna, en general, ofrece una imagen más nítida de los papeles que la innovación técnica y el cambio

conceptual pueden desempeñar en el progreso de la disciplina. En el descubrimiento de la neurona podemos observar el entrelazamiento de ambos tipos de prácticas científicas. Por un lado, hay una innovación técnica indispensable, vinculada al desarrollo y justificación del método de Golgi. Sin la reacción cromoargéntica, la neurona individual hubiese permanecido invisible a los científicos y las científicas por un tiempo indefinido. La técnica permitió anclar la neurona individual como entidad en medio de la textura microscópica, saturada y compleja del tejido neuronal. En los ojos y en las manos de Cajal, además, la técnica permitió entender los principios anatómicos, fisiológicos, las pautas de desarrollo y de deterioro específicos de esta nueva entidad.

Sin embargo, la detección de la neurona como entidad independiente requirió algo más que el dominio de la herramienta. Cuando Golgi, en su laboratorio doméstico, aplicó por primera vez la *reazione nera* al tejido nervioso, en la década de 1870, rápidamente realizó un descubrimiento que resultó incompatible con la teoría reticularista vigente en su comunidad. Siguiendo las demostraciones visuales del anatomista alemán Joseph von Gerlach, basadas en la tinción con carmín y con cloruro de oro, se pensaba, antes de Golgi, que el órgano principal del sistema nervioso era una red continua conformada por las dendritas que nacían de los cuerpos celulares.

Si Deiters hubiera dado un paso más, habría descubierto el fino plexo de fibras nerviosas; pero (...) como el método del [cloruro] de oro le era desconocido, el plexo de fibras nerviosas debió permanecer oculto para él. Puedo confirmar las observaciones de Deiters que se han citado, pero, además, las ramas más finas de los procesos protoplásmicos finalmente toman parte en la formación de la fina red de fibras nerviosas que considero un constituyente esencial de la materia gris de la médula espinal. (von Gerlach 1871; citado en Shepherd 2015, 57-58)

Golgi descubrió que las dendritas terminaban libremente, sin anastomosis, sin continuidad con las dendritas de otras células. Esta observación es incompatible con la idea de una red dendrítica. Sin embargo, Golgi interpreta de manera conservadora este descubrimiento. Si las dendritas no pueden conformar una red, razonó Golgi, entonces no deben tener una función nerviosa. El presupuesto reticularista de esta inferencia es que sólo una red puede generar la función nerviosa. Para Golgi, las dendritas tenían una función nutritiva, como las raíces que alimentan a la célula.

Golgi trae a colación un segundo descubrimiento: el axón de la célula nerviosa no continúa en línea recta durante todo su recorrido, sino que a cierta distancia del cuerpo se ramifica, en ángulos rectos, dando origen a diversas ramas colaterales del axón. El descubrimiento de las ramas colaterales del axón le sugirió a Golgi una salida elegante, aunque conservadora, de la crisis reticularista. El órgano principal del sistema nervioso es efectivamente una red continua y compleja, no podría ser de otra manera, pero la red está compuesta de las ramificaciones terminales de los axones celulares. Así, Golgi propone una red de axones, en lugar de una red de dendritas.

En lo que respecta a la mayor parte de los centros nerviosos, lejos de las conexiones individuales y aisladas descritas entre células y fibras nerviosas se ve, por el contrario, una disposición evidentemente directa, por la cual se efectúa la mayor complicación posible en las relaciones entre las dos. El concepto de la llamada localización de las funciones cerebrales, si se insistiera en aceptarlo de forma rigurosa, no estaría en perfecta armonía con los datos anatómicos. Una fibra nerviosa está en relación con extensos grupos de células ganglionares, y que los elementos ganglionares de todas las provincias, y también de varias provincias vecinas, están unidas por medios de una red difusa, para cuya formación todas las diversas categorías de las células y fibras nerviosas de estas provincias contribuyen. (Golgi 1885)

Cajal aceptó los descubrimientos anatómicos de Golgi, y por lo tanto asimiló el impacto de la crisis reticularista, pero los interpretó bajo un tamiz conceptual revolucionario. En primer lugar, si bien las colaterales del axón son reales, no estaba claro para Cajal que eventualmente perdieran su individualidad en una red difusa. Nunca pudo observar anastomosis, continuidad de tejido, entre las terminaciones de los axones de células nerviosas, en ninguna región cerebral, en ninguna especie, en ninguna etapa del desarrollo. Por parsimonia, es necesario concluir que los axones pueden desempeñar su función de transmisión nerviosa aún terminando libremente, *sin conformar una red*. En segundo lugar, y por las mismas razones, las dendritas pueden desempeñar una función nerviosa, aun cuando, como descubrió Golgi, terminen libremente. El contorno y los componentes anatómicos principales de la célula nerviosa quedan así delineados: un cuerpo celular del cual nacen tanto las dendritas como el axón, en distintas configuraciones, ambos con función nerviosa.

Pero nosotros, que nunca hemos podido ver una malla de semejante red, ni en el cerebro ni en la médula, ni en el cerebelo, ni en la retina, ni en el bulbo olfatorio, etc., creemos que es hora ya de desligar la histología de todo compromiso fisiológico, y adoptar sencillamente la única opinión que está en armonía con los hechos, a saber: que las células nerviosas son elementos independientes jamás anastomosados ni por sus expansiones protoplasmáticas ni por las ramas de su prolongación de Deiters, y que la propagación de la acción nerviosa se verifica por contactos a nivel de ciertos aparatos o disposiciones de engranaje, cuyo objeto es fijar la conexión, multiplicando considerablemente las superficies de influencia. (Cajal 1889)

La observación microscópica de la manera en la cual las terminaciones de los axones se colocaban en relación con las dendritas o el cuerpo celular de sus células vecinas, por ejemplo, la manera en la cual los penachos de las células estrelladas del cerebelo envuelven, como una canasta, el cuerpo de las células de Purkinje (Fig. 2), le sugirió a Cajal (1891) una generalización fisiológica acerca de la dirección de la comunicación del impulso nervioso entre las partes de una misma célula y entre células vecinas, a saber, la ley de polarización dinámica. Esta ley permite especificar el principio guía de la teoría celular, según el cual la célula es la unidad funcional del sistema.

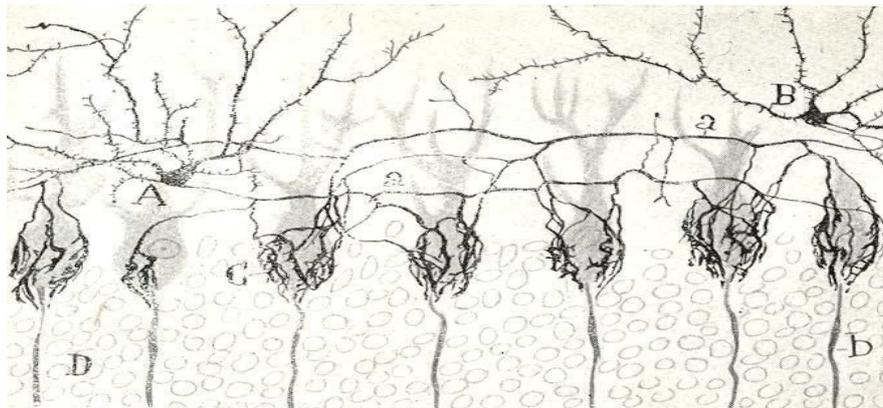


Figura 2. Esquema de un corte transversal de una lámina cerebelosa. A y B son células estrelladas de la capa molecular (células de cesta), cuyo axón (a) genera “nidos” terminales en torno de las células de Purkinje (C); b, axón de estos últimos corpúsculos. Tomado de Cajal (2006, p. 793).

Las preguntas en las que Cajal (1891) estaba interesado eran las siguientes: ¿Cuál es la dirección de las corrientes que atraviesan la neurona? ¿Las corrientes corren desde el cilindro-eje hasta la célula y las expansiones protoplásmicas, o se mueven en la otra dirección, desde las dendritas y a través del axón hasta las arborizaciones terminales del axón? La estrategia de Cajal para resolver el problema es imaginar, en primer lugar, la dirección de la corriente en esos órganos nerviosos, como la retina, el bulbo olfatorio y las vías motoras centrales, en las que el punto de partida del impulso nervioso es bien conocido. Consideremos la mucosa olfativa y el bulbo olfatorio. El impulso nervioso comienza a partir de las expansiones dendríticas de las células bipolares y pasa a través de un axón muy delgado al glomérulo correspondiente. A partir de ahí, la excitación es recibida por las ramas dendríticas de las grandes células piramidales dentro del bulbo, que transmiten el impulso a través de axones gruesos hacia el bulbo olfatorio. Por analogía, Cajal sostiene que la misma polarización funcional se observa en las vías centrales del sistema nervioso, por ejemplo, en la corteza cerebral. Se sabe que las células piramidales de la corteza cerebral envían un tallo dendrítico a la capa molecular de la sustancia gris, que se ramifica en un plexo de ramas gruesas y diminutas. Muchas otras fibras nerviosas también se ramifican en la misma región. Por lo tanto, es fácil concebir que el movimiento comienza en las dendritas de las células piramidales y pasa luego a través de sus expansiones axónicas por la vía piramidal. Es evidente que las arborizaciones dendríticas siempre reciben el impulso nervioso y lo envían por ramas nerviosas, todo el camino hasta el cerebro. La conducción dendo-somática (desde la dendrita al soma) es opcional: la corriente atraviesa el cuerpo celular solo cuando se encuentra en el camino más corto hacia el axón. No hay necesidad de atravesar el cuerpo celular si no está en la ruta más directa desde las dendritas hasta el axón.

Según la ley de polarización dinámica, entonces, el impulso nervioso va siempre desde la dendrita, que funciona como mecanismo de input, hasta la terminación del axón, que funciona como output; desde allí, el impulso se transmite a la dendrita o al cuerpo celular de la neurona siguiente (Cajal 1891). La ley introduce un concepto no anatómico: la *dirección* de la conducción del impulso nervioso en relación con las partes de la célula. Solo hay dos direcciones permitidas para la conducción interneuronal: axodendrítica (desde el axón de una neurona a la dendrita de otra) y axosomática (desde el axón de una neurona al soma, o cuerpo celular, de otra). No hay lugar en la teoría para la conducción dendro-dendrítica (como sostenía von Gerlach), somato-dendrítica, ni axo-axónica (como sostenía Golgi). En este sentido, la ley de la polarización dinámica de Cajal puede interpretarse como un algoritmo morfológico que “transforma la morfología en función” (Mazzarello 2018), de la siguiente manera:

1. El axón de la neurona N_1 es contiguo a la dendrita o al soma de la neurona N_2 . (Dato anatómico).
2. La dirección de la conducción nerviosa es axo-dendrítica o axo-somática. (Ley de polarización dinámica).
3. Por lo tanto, N_1 conduce el impulso hacia N_2 . (Conclusión fisiológica).

En el episodio del descubrimiento de la neurona, entonces, hay dos tipos de innovaciones neurocientíficas involucradas. Por un lado, hay una innovación técnica o experimental, vinculada al desarrollo y justificación de la tinción argéntica. La selectividad y exhaustividad de la técnica de Golgi fueron revolucionarias para los histólogos porque les permitieron determinar los componentes relevantes de la maquinaria nerviosa en el nivel microscópico, y porque también les permitieron formular hipótesis sobre la organización de circuitos y las actividades biológicas de esas partes de una manera que era inimaginable desde las tecnologías disponibles en ese momento. Cajal y Golgi son aliados en este desarrollo. Por otro lado, hay una innovación conceptual, vinculada al paso del reticularismo al neuronismo. Cajal y Golgi son competidores en esta controversia. La peculiaridad del caso de la doctrina de la neurona, la “extraña paradoja” en el seno de la neurociencia moderna (Mazzarello 2018), o la “paradoja histórica” (Cimino 1999), es que la revolución técnica se logró mediante sucesivas aplicaciones que contribuyeron, de hecho, a esquemas de mecanismos en competencia, es decir, a esquemas incompatibles para el mismo fenómeno. Cajal pudo descubrir la neurona como entidad biológica a través de la impregnación argéntica y la técnica micrográfica sólo porque abandonó, al mismo tiempo, la idea de la acción unitaria del tejido nervioso y la reemplazó por la idea de la unidad funcional de la célula nerviosa, liberando así todo el potencial revolucionario de la técnica de Golgi.⁴

⁴ La enemistad entre Golgi y Cajal se desarrolló veladamente hasta el otoño de 1906, cuando el Instituto Karolinska en Suecia anunció que el premio Nobel de medicina sería compartido, por primera vez, por ambos científicos. Nunca había sucedido, y no volverá a suceder, que el premio Nobel se

5. Conclusiones

Las revoluciones en neurociencia, como muchas otras revoluciones de laboratorio, están frecuentemente impulsadas por el entrelazamiento de innovaciones técnicas y cambio conceptual. Los enfoques filosóficos que enfatizan unilateralmente alguno de estos dos motores resulta necesariamente unilaterales e incompletos. El análisis metateórico del episodio del descubrimiento de la neurona, y plausiblemente el de otros episodios de la historia de la neurociencia, demanda incorporar ambos factores.

Agradecimientos

Agradezco a los integrantes del Grupo Anfibio (www.anfibio.com.ar) y a los integrantes del Centro de Neurociencias Cognitivas de la Universidad de San Andrés, con quienes discutí versiones anteriores de este trabajo. Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación PICT-2018-3454 (ANPCyT, Argentina) y UBACyT 20020190200360BA (Universidad de Buenos Aires, Argentina).

Referencias bibliográficas

- Alegre, M. C. (2018). La estructura de las revoluciones kuhnianas. *Perspectivas*, 3(2), 89-120.
- Bentivoglio, M., Cotrufo, T., Ferrari, S., Tesoriero, C., Mariotto, S., Bertini, G., Berzero, A., Mazzarello, P. (2019). The original histological slides of Camillo Golgi and his discoveries on neuronal structure. *Frontiers in neuroanatomy*, 13, 3.
- Bickle, J. (2016). Revolutions in neuroscience: Tool development. *Frontiers in systems neuroscience*, 10, 24.
- Bickle, J. (2022). Tinkering in the Lab. In Bickle, J., Craver, C. F., Barwich, A. S. (Eds.), *The Tools of Neuroscience Experiment*, pp. 13-36. Nueva York: Routledge.

entregue a dos científicos que sostienen ideas radicalmente opuestas acerca del mismo tema de estudio. De esta manera, los destinos de Golgi y Cajal, mal que les pese, quedaron sellados y unificados indisolublemente. Por supuesto, tampoco se pusieron de acuerdo en sus discursos de aceptación, Cajal defendió la doctrina de la neurona, y Golgi defendió su versión del reticularismo, afirmando que no podía “abandonar la idea de una acción unitaria del sistema nervioso”. El período revolucionario, sin embargo, se cierra tempranamente, en 1896, con la publicación de la sexta edición del manual de histología de Kölliker manifestando el consenso de la comunidad en torno al esquema neuronal; o si se prefiere, en 1909, con la publicación de la *Histologie du système nerveux de l'homme et des vertébrés* de Cajal. La cuestión empírica, por otra parte, recién pudo cerrarse en 1955, cuando Sanford Palay y George Palade (Palay & Palade 1955), por un lado, y el neurobiólogo argentino Eduardo De Robertis y Stanley Bennett (De Robertis & Bennett, 1955), por otro, corroboraron, utilizando una innovación técnica, el microscopio electrónico, que los elementos presinápticos y postsinápticos estaban separados entre sí por una hendidura sináptica de unos 20 a 30 nm de diámetro.



- Boone, W., & Piccinini, G. (2016). The cognitive neuroscience revolution. *Synthese*, 193(5), 1509-1534.
- Boyden, E. S., Zhang, F., Bamberg, E., Nagel, G., Deisseroth, K. (2005). Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity. *Nature neuroscience*, 8(9), 1263-1268.
- Cajal, S. (1888). Estructura de los centros nerviosos de las aves. *Revista trimestral de histología normal y patológica*, 1. Madrid.
- Cajal, S. (1889) Conexión general de los elementos nerviosos, *La Medicina Práctica*, 88, 341-346.
- Cajal, S. (1909) *Histologie du système nerveux de l'homme & des vertébrés*.
- Cajal, S. (2006). *Recuerdos de mi vida*. Barcelona: Crítica, Fundación Iberdrola.
- Cajal, S. (1891) Significación fisiológica de las expansiones protoplasmáticas y nerviosas de las células de la sustancia gris. *Revista de Ciencias Médicas de Barcelona*, (22/23).
- Cimino, G. (1999). Reticular theory versus neuron theory in the work of Camillo Golgi. *Physis. rivista internazionale di storia della scienza*, 36(2), 431-472.
- Craver, C. F., Alexandrova, A. (2008). No revolution necessary: neural mechanisms for economics. *Economics & Philosophy*, 24(3), 381-406.
- Craver, C. F., Darden, L. (2013). *In search of mechanisms: Discoveries across the life sciences*. Chicago: University of Chicago Press.
- Craver, C. F. (2007). *Explaining the brain: Mechanisms and the mosaic unity of neuroscience*. Oxford: Clarendon Press.
- DeFelipe, J., Jones, E. G. (1992). Santiago Ramón y Cajal and methods in neurohistology. *Trends in neurosciences*, 15(7), 237-246.
- De Robertis, E. D., Bennett, H. S. (1955). Some features of the submicroscopic morphology of synapses in frog and earthworm. *The Journal of Cell Biology*, 1(1), 47-58.
- Florentini, E. (2011). Inducing visibilities: An attempt at Santiago Ramón y Cajal's aesthetic epistemology. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(4), 391-394.
- Ginnobili, S., Barberis, S. (en prensa). Inconmensurabilidad y solapamiento. ¿Es adecuado un enfoque puramente extensional para dar cuenta de la inconmensurabilidad semántica?
- Golgi, C. (1873). Sulla sostanza grigia del cervello. *Gazetta Medica Italiana*, 33, 244-246.
- Golgi, C. (1875). Sulla fina struttura dei bulbi olfattoria. *Riv. Sper. Freniatria Med. Legal.*, 1, 66-78.
- Golgi, C. (1885). *Sulla fina anatomia degli organi centrali del sistema nervoso*. Milán: Ulrico Hoepli.
- Hacking, I. (2012). Introduction. En Kuhn, T. (2012). *The Structure of Scientific Revolutions*, pp. 1-9. Chicago/London: University of Chicago Press.
- Haueis, P. (2022). Exploratory concept formation and tool development in neuroscience. *Philosophy of Science*, 1-44. <https://doi.org/10.1017/psa.2022.79>



- His, W. (1886). *Zur Geschichte des menschlichen Rückenmarkes und der Nerven-wurzeln*. Leipzig: S. Hirscl. Abhandl. Math. -Phys. Class. Königl. säch. Gesellsch. Wiss., Leipzig 13: 147–209, 477–513.
- Hoyningen-Huene, P. (1993). *Reconstructing scientific revolutions: Thomas S. Kuhn's philosophy of science*. Chicago: University of Chicago Press.
- Hubel, D. H., Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex. *The Journal of physiology*, 148(3), 574.
- Kuhn, T. (2021), *The Quest for Physical Theory: Problems in the Methodology of Scientific Research*. Cambridge: MIT Libraries.
- Kuhn, T. (1970) *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kuhn, T. (2000) *The Road Since 'Structure': Philosophical Essays, 1970-1993, with an Autobiographical Interview*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kuhn, T. (2017) *Desarrollo científico y cambio de léxico*. Montevideo: FIC-UDELAR/ ANII /SADAF.
- Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Chesler, D. A., Goldberg, I. E., Weisskoff, R. M., Poncelet, B. P., *et al* (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(12), 5675-5679.
- Laín Entralgo, P. (1949). *Dos biólogos: Claudio Bernard y Ramón y Cajal*. Buenos Aires: Espasa-Calpe.
- Mazzarello, P. (2010). *The Hidden Structure. A Scientific Biography of Camillo Golgi*. Oxford: OUP.
- Mazzarello, P. (2018). From images to physiology: a strange paradox at the origin of modern neuroscience. *Progress in brain research*, 243, 233-256.
- Miłkowski, M., Clowes, R., Rucińska, Z., Przegalińska, A., Zawidzki, T., Krueger, J., *et al* (2018). From wide cognition to mechanisms: A silent revolution. *Frontiers in Psychology*, 2393.
- Palay, S. L., Palade, G. E. (1955). The fine structure of neurons. *The Journal of biophysical and biochemical cytology*, 1(1), 69.
- Parker, D. (2018). Kuhnian revolutions in neuroscience: the role of tool development. *Biology & Philosophy*, 33(3), 1-25.
- Politi, V. (2020). Taxonomies, Networks, and Lexicons: A Study of Kuhn's Post-'Linguistic Turn' Philosophy. *International Studies in the Philosophy of Science*, 33(2), 87-103.
- Shepherd, G. M., Greer, C. A., Mazzarello, P., Sassoè-Pognetto, M. (2011). The first images of nerve cells: Golgi on the olfactory bulb 1875. *Brain research reviews*, 66(1-2), 92-105.
- Shepherd, G. M. (2015). *Foundations of the neuron doctrine*. Oxford University Press.
- Sherrington, Charles Scott (1897). The central nervous system. En Foster, M. (Ed.), *A Text-Book of Physiology*, pp. 928-929. Londres: Macmillan.
- Silva, A. J., Stevens, C. F., Tonegawa, S., Wang, Y. (1992). Deficient hippocampal long-term potentiation in α -calcium-calmodulin kinase II mutant mice. *Science*, 257(5067), 201-206.