

Rupturas conceptuales

Edición para público general

Juan Seguro · All Rights Reserved

El universo y sus observadores

Este libro sigue diecinueve cambios en lo que podía explicarse, medirse o demostrarse. Cada capítulo ofrece una narración autónoma de un problema conceptual, de la evidencia o del argumento que lo cambió y de los límites de la explicación resultante. El orden sigue la edición científica que lo acompaña, en lugar de una única historia cronológica continua.

Las narraciones se adaptan de los capítulos correspondientes de la edición científica. Omiten los cálculos resueltos y las deducciones formales, pero conservan las distinciones necesarias para interpretar la evidencia. Las referencias se mantienen en cada capítulo. El testimonio histórico, una demostración matemática y un resultado empírico se tratan como formas diferentes de apoyo.

Índice

Movimiento sin un motor continuo	3
La extinción se convierte en un hecho de la historia natural	5
La vida se abre a la explicación fisicoquímica	7
Las células se convierten en unidades de organización viva	9
La geometría deja de tener una única forma inevitable	11
El infinito se convierte en objeto de comparación exacta	13
Las moléculas gigantes se convierten en una posibilidad química	15
Poner a prueba la gravedad: de 1915 a 1975	17
Los fundamentos cuánticos pasan a ser distinguibles experimentalmente	19
Las leyes deterministas dejan de garantizar la predicción práctica	21
De los infinitos electrodinámicos a las escalas de Wilson	23
Genes discretos y variación continua: una reconciliación estadística	26
Descifrar el código genético: de 1954 a 1966	28
Evolución sin una explicación adaptativa para cada cambio	30
La inmunidad se convierte en selección entre variantes biológicas	32
La demostración formal encuentra límites internos	34
Hacer medible la sensación: psicofísica y cronometría mental	36
Recordar se convierte en reconstruir	38
El cerebro adulto se convierte en un sistema cambiante	40

Movimiento sin un motor continuo

Una piedra lanzada abandona la mano, pero sigue moviéndose. Esa escena familiar plantea una pregunta menos familiar: ¿qué necesita exactamente una causa? Podemos preguntar qué mantiene la piedra en movimiento o, por el contrario, qué cambia su rapidez y su dirección. La diferencia entre esas preguntas contribuyó a transformar la mecánica.

Buridán situó en el proyectil una cualidad motriz, el ímpetu. Podía sostener el movimiento una vez terminado el contacto con quien lo había lanzado, mientras que la resistencia y las tendencias contrarias podían disminuirlo. Era una alternativa importante a atribuir esa función al aire circundante. Seguía formando parte de un marco aristotélico más amplio, sin sustituirlo por completo. [1]

Sería engañoso rebautizar el ímpetu como «cantidad de movimiento» y afirmar que la mecánica moderna ya estaba presente. Las semejanzas en el lenguaje sobre rapidez y materia no establecen una misma magnitud matemática ni unas mismas reglas de interacción. La explicación histórica seguía recurriendo a algo que el cuerpo poseía para explicar la continuidad del movimiento. Una explicación inercial cambiaría la propia exigencia de esa causa sustentadora.

La persistencia también deja una pregunta sobre la trayectoria. Seguir recorriendo un círculo a rapidez constante no es lo mismo que continuar en línea recta: la dirección cambia continuamente. Descartes distinguió la persistencia en un estado del carácter rectilíneo del movimiento. Su explicación más amplia contenía

dificultades que no deben sustituirse tácitamente por la física de manual posterior. [2]

El cambio resultante redistribuye la tarea explicativa. En el marco inercial moderno, las interacciones explican los cambios de velocidad, mientras que el movimiento rectilíneo uniforme no necesita una fuerza sustentadora adicional. Un objeto que se desliza sobre una mesa y se detiene sigue encontrando resistencia. Por tanto, su detención no resuelve qué haría un cuerpo sin perturbaciones.

Esta historia no proporciona una cadena automática de transmisión de Buridán a Galileo y a Newton. La influencia exige documentos; la semejanza por sí sola no la demuestra. El cambio conceptual es más claro y más exigente: distinguir persistencia y cambio, especificar las condiciones pertinentes e investigar las interacciones responsables de las desviaciones respecto a una trayectoria sin perturbaciones.

Referencias

- [1] Zupko, J. "John Buridan." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sección sobre filosofía natural e ímpetu. <https://plato.stanford.edu/entries/buridan/>
- [2] Slowik, E. "Descartes' Physics." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, secciones sobre las leyes del movimiento y las fuerzas de los cuerpos. <https://plato.stanford.edu/entries/descartes-physics/>

La extinción se convierte en un hecho de la historia natural

Un fósil puede mostrar que un animal existió. Mostrar que los de su especie ya no existen es más difícil. Quizá sobrevivan en algún lugar donde nadie ha buscado. La aceptación de la extinción dependió de someter esa posibilidad a la evidencia, en lugar de tratar cada hueso desconocido como una especie desaparecida.

Cuvier conectó la comparación anatómica con un argumento sobre los animales vivos. Los dientes, las mandíbulas y otras partes restringían las identificaciones posibles. También había que comparar las diferencias con la variación ordinaria: dos huesos distintos no tienen por qué pertenecer a especies diferentes. La exposición posterior utilizada aquí es su ensayo en la quinta edición inglesa, con las adiciones de Jameson, no una transcripción de la discusión original sobre los elefantes fósiles. [1]

Incluso una identificación convincente dejaba abierta la pregunta sobre la supervivencia. Cuvier distinguió los animales terrestres llamativos de las formas marinas que los métodos de recolección podían pasar por alto fácilmente. Los viajes y el conocimiento existente parecían más informativos para algunos grandes animales terrestres, aunque seguía siendo necesario considerar refugios inexplorados. Su confianza en la cobertura disponible también podía cuestionarse. [1]

La idea duradera es que no encontrar algo significa más cuando ha habido una buena oportunidad de encontrarlo. Buscar repetidamente en el mismo lugar inadecuado no aporta la misma evidencia que búsquedas independientes en hábitats probables. Una ausencia resulta informativa por las condiciones de observación, no solo por la repetición.

Establecer una desaparición también difiere de explicar su causa. Cuvier conectó los fósiles con las revoluciones terrestres, pero la conclusión de que una especie animal había desaparecido no tenía por qué sostenerse o caer junto con cada parte de esa explicación geológica. La identidad anatómica, la supervivencia continuada y el mecanismo de extinción son afirmaciones distintas. [1]

Un mundo genuinamente histórico podía contener ahora formas sin representantes vivos. Las colecciones actuales seguían siendo útiles, pero no podían constituir el inventario completo de toda la vida pasada. El cambio abrió una nueva pregunta: ¿qué justifica concluir que una historia ha terminado? Ni siquiera el último fósil encontrado tiene por qué señalar al último individuo que vivió.

Referencias

- [1] Cuvier, G. *Essay on the Theory of the Earth*. Quinta edición, con ilustraciones geológicas de Robert Jameson. Edimburgo: William Blackwood, 1827. Ensayo del autor, especialmente las secciones sobre cuadrúpedos fósiles, determinación anatómica y posibilidades de descubrir grandes animales desconocidos. <https://www.gutenberg.org/ebooks/62918>

La vida se abre a la explicación fisicoquímica

«¿Qué es la vida?» es una pregunta amplia. «¿Puede continuar esta reacción después de romper las células?» es una pregunta que una preparación experimental puede ayudar a responder. La fermentación sin células importó porque eliminó una dependencia concreta, no porque explicara de una vez todos los rasgos de un organismo vivo.

Las distintas afirmaciones sobre un papel especial de la vida se enfrentaban a comprobaciones diferentes. Fabricar urea fuera de un organismo cuestionaba una restricción sobre la producción de una sustancia orgánica. No establecía que la fermentación pudiera ocurrir sin levadura intacta. La conferencia Nobel posterior de Buchner describe un debate con varias propuestas químicas y celulares rivales, incluidos intentos anteriores de extraer un agente fermentador. [1]

Una extracción fallida era ambigua. Podía no existir una actividad separable, o el método podía destruir lo que pretendía revelar. La preparación formaba parte del argumento. Buchner describió la obtención de jugo de levadura por presión en el que podía ocurrir la fermentación. El resultado separó la integridad continuada de células completas de una actividad química realizada por material procedente de ellas. [1]

«Sin células» no significaba que los ingredientes carecieran de origen biológico. Tampoco significaba que el líquido contuviera un único agente purificado. La conclusión más acotada ya era poderosa: bajo las condiciones examinadas, las células vivas completas de levadura no eran indispensables para la transformación.

La nueva preparación hizo posibles más experimentos. Los investigadores podían separar componentes e investigar qué combinaciones restablecían la actividad. La conferencia de Buchner describe contribuciones de componentes con distinta sensibilidad al calor y la importancia del fosfato. Restablecer la actividad restringe una explicación, pero no identifica automáticamente a todos los participantes en el proceso. [1]

La conferencia es también el testimonio retrospectivo de un participante. Recoge colaboradores y propuestas anteriores, no un veredicto independiente sobre todos los oponentes. La ganancia conceptual se mantiene con esa cautela: una función podía separarse y estudiarse sin tratar al organismo como una causa indivisible. La organización celular seguía importando para el crecimiento, la reproducción y la regulación. Explicar una reacción no equivalía a reconstruir la vida.

Referencias

- [1] Buchner, E. "Cell-free fermentation." Conferencia Nobel, 11 de diciembre de 1907. Especialmente las páginas impresas 103–111 y la discusión posterior sobre la coenzima y el fosfato. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/buchner-lecture.pdf>

Las células se convierten en unidades de organización viva

Un microscopio puede revelar un límite sin explicar qué función cumple en un organismo. La historia de la teoría celular implica, por tanto, algo más que ver pequeños compartimentos. Conecta una afirmación sobre la estructura viva con otra distinta sobre cómo esa estructura continúa a través del tiempo.

Las cámaras del corcho de Hooke no revelaban todas las actividades de una célula viva. Las comparaciones posteriores entre plantas y animales respaldaron una explicación organizativa mucho más amplia. Schleiden y Schwann contribuyeron a convertir las células en una unidad común a tejidos de aspecto muy diferente. El manual moderno utilizado aquí resume esa historia; no es un registro original de laboratorio. [1]

Una generalización poderosa podía coexistir con un mecanismo incorrecto. Las primeras explicaciones admitían la formación de células mediante un proceso comparado con la cristalización. Rechazar esa explicación no obligaba a rechazar todas las comparaciones entre tejidos vegetales y animales. A la inversa, el éxito de las comparaciones no podía validar el mecanismo de formación propuesto. [1]

La continuidad necesitaba evidencia sobre acontecimientos, no solo sobre formas. Dos células próximas en una imagen estática no muestran por sí solas que una se esté dividiendo en dos. El trabajo de Remak aportó evidencia de división celular; Virchow popularizó después el principio de que las células proceden de células. Mantener distintas esas contribuciones evita atribuir todo el logro al nombre más memorable. [1]

Las células se convirtieron en unidades de linaje además de estructura. Ese marco permite preguntar de dónde procede una célula recién observada y cómo el crecimiento y la diferenciación cambiaron su historia. No proporciona una explicación completa del primer origen de las células.

Tampoco se explica un organismo contando las células como piezas independientes. Importan sus posiciones, su entorno y sus interacciones. El cambio conceptual hizo más accesibles esas relaciones: las actividades celulares ayudan a explicar los tejidos, mientras que las condiciones del tejido moldean la actividad celular. Lo que comenzó como organización visible se convirtió en un marco para investigar tanto la estructura como su continuidad.

Referencias

- [1] OpenStax. *Microbiology*, §3.2, “Foundations of Modern Cell Theory”, subsección “The Origins of Cell Theory.” <https://openstax.org/books/microbiology/pages/3-2-foundations-of-modern-cell-theory>

La geometría deja de tener una única forma inevitable

Después de muchos intentos infructuosos de demostrar un enunciado, una posibilidad es que nadie haya encontrado el argumento adecuado. Otra es que el enunciado no se siga de los supuestos. La geometría no euclídea convirtió esa segunda posibilidad en el centro de un antiguo problema sobre las paralelas.

El postulado de las paralelas de Euclides había parecido menos evidente que otras premisas. Los intentos de deducirlo podían introducir silenciosamente un supuesto equivalente en otro punto. Un dibujo familiar podía ocultar el compromiso que se estaba examinando. Lobachevski y Bolyai desarrollaron, en cambio, las consecuencias de una condición alternativa y permitieron que aquella estructura poco familiar se convirtiera en objeto de investigación. [1]

Aquí importa la terminología. Las distinciones históricas entre paralelas y otras rectas que no se cortan no deben reducirse al uso cotidiano de «paralela». Lo importante es que una regla diferente sobre rectas puede formar parte de una geometría desarrollada sistemáticamente, en lugar de descartarse de inmediato por contradecir expectativas familiares. [2]

Obtener muchas consecuencias sin encontrar una contradicción no es, por sí mismo, una demostración de consistencia. Un modelo puede proporcionar un resultado condicional más fuerte. Si la nueva geometría puede representarse en otro marco matemático, una contradicción se trasladaría a ese marco. Esto es consistencia relativa, no una garantía absoluta para todas las matemáticas. [1]

Una representación en un disco ayuda a ilustrar por qué las imágenes necesitan interpretación. Lo que parece un arco curvo en una página euclídea puede representar una trayectoria recta en la geometría modelizada. El dibujo y las distancias del espacio representado no son lo mismo.

El espacio físico plantea otra pregunta. Una geometría matemáticamente posible necesita apoyo observacional antes de utilizarse como descripción del espacio medido. Los instrumentos y las definiciones de las trayectorias intervienen en esa comparación. No se demostró simplemente que Euclides estuviera equivocado: sus teoremas siguen siendo válidos bajo sus supuestos. El cambio fue la capacidad de distinguir qué se sigue matemáticamente, cómo pueden relacionarse las teorías y qué respaldan físicamente las observaciones.

Referencias

- [1] Torretti, R. "Nineteenth Century Geometry." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, especialmente §§1–2 y §4. <https://plato.stanford.edu/entries/geometry-19th/>
- [2] Lobachevski, N. I. *Geometrical Researches on the Theory of Parallels*. Traducción de George Bruce Halsted. Open Court, impresión de 1914, §16. <https://archive.org/details/geometricalresea00lobaiala>

El infinito se convierte en objeto de comparación exacta

Imagina emparejar cada entero positivo con su doble. Cada entero positivo par recibe una pareja y ningún entero positivo queda sin emparejar. El emparejamiento da a las dos colecciones la misma cardinalidad, aunque una sea una parte propia de la otra. Una regla familiar de las colecciones finitas ha alcanzado su límite.

El trabajo de Cantor hizo exactas esas comparaciones. Algunas colecciones infinitas admiten una lista en la que cada elemento ocupa una posición finita. Las fracciones pueden ordenarse sistemáticamente aunque entre dos números reales distintos cualesquiera haya fracciones. Estar distribuido densamente y no poder enumerarse son propiedades distintas.

El artículo de 1874 estudió los números algebraicos y, de manera más general, los números reales. Los números algebraicos resuelven ecuaciones polinómicas con coeficientes enteros; esas ecuaciones pueden organizarse de forma que sus raíces constituyan una colección numerable. El argumento original sobre los reales utilizaba intervalos encajados. No debe confundirse con el método diagonal posterior. [1]

La idea diagonal se describe más fácilmente mediante decimales. Supón que alguien ofrece una lista completa de los números reales entre cero y uno. Construye un nuevo decimal cuyo primer dígito difiera del primer dígito de la primera entrada, cuyo segundo difiera del segundo dígito de la segunda entrada, y así sucesivamente. Una regla adecuada que utilice solo los dígitos uno y dos evita las terminaciones decimales ambiguas. Cada entrada propuesta queda excluida en su propia posición.

El argumento invalida cualquier lista completa propuesta de ese tipo, no solo una lista mal ordenada. Es una presentación moderna de la estrategia posterior, no una transcripción de la demostración de 1874. El debate histórico también trataba sobre qué objetos y métodos infinitos eran legítimos, no simplemente sobre el rechazo de una respuesta sorprendente. [2]

Nada de esto cuenta experimentalmente una infinidad de objetos físicos. Distingue nociones matemáticas de tamaño. Longitud, densidad y cardinalidad ya no tienen por qué coincidir. El logro consistió en sustituir una imagen vaga de lo interminable por construcciones y demostraciones específicas de lo que puede y no puede emparejarse.

Referencias

- [1] Cantor, G. "Ueber eine Eigenschaft des Inbegriffes aller reellen algebraischen Zahlen." *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 77, 258–262 (1874). Traducción inglesa de James R. Meyer, "On a Property of the Set of all Real Algebraic Numbers." <https://jamesmeyer.com/infinite/cantor-1874-uncountability-proof>
- [2] Ferreirós, J. "The Early Development of Set Theory." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/settheory-early/>

Las moléculas gigantes se convierten en una posibilidad química

Una partícula grande en un líquido no tiene por qué ser una molécula grande. Puede ser un agregado de moléculas menores. Otra posibilidad es que sus átomos pertenezcan a una enorme estructura conectada químicamente. Distinguir estas posibilidades cambió las preguntas que los químicos podían plantear sobre el caucho, la celulosa y materiales relacionados.

La conferencia Nobel retrospectiva de Staudinger explica por qué eran plausibles las explicaciones basadas en agregados. Un comportamiento similar en disolución podía aparecer en materiales diferentes. Un líquido viscoso o una medición sensible al tamaño podían establecer la presencia de entidades grandes sin revelar qué mantenía unida cada entidad. La propuesta de las macromoléculas extendía los enlaces ordinarios a estructuras mucho mayores. No inventaba un enlace especial para moléculas gigantes. [1]

Las transformaciones químicas proporcionaron una vía más sólida. Los investigadores podían modificar grupos en un material y preguntar si se mantenía la relación subyacente de cadena. Staudinger analiza derivados de la celulosa y comparaciones entre métodos de medición. El argumento dependía de combinar información química y de tamaño, no de una propiedad llamativa de una disolución. [1]

Las alternativas seguían exigiendo cuidado. Modificar un grupo podía alterar la solubilidad, la asociación o la forma de la cadena. Un cambio de viscosidad no mostraba automáticamente una

rotura de la cadena. Varias observaciones debían restringir conjuntamente la conectividad propuesta.

Otra consecuencia era que una muestra podía contener moléculas con cadenas de distinta longitud. Un promedio resumía entonces una distribución. Ponderar por número y ponderar por masa podían dar resultados diferentes sin que ninguno implicara la existencia de una molécula de tamaño exactamente igual al promedio. Por tanto, antes de interpretar una discrepancia entre métodos había que definir la medición.

La conferencia de Staudinger recoge un campo amplio y numerosos colaboradores, pero sigue siendo el relato de un participante sobre su historia. Los agregados no dejaron de existir cuando se aceptaron las macromoléculas. La química ganó una manera de distinguirlos. La longitud de cadena, la ramificación y las distribuciones podían convertirse en variables explicativas, mientras que las interacciones y el procesado seguían importando para las propiedades del material final.

Referencias

- [1] Staudinger, H. "Macromolecular chemistry." Conferencia Nobel, 11 de diciembre de 1953. Especialmente las páginas impresas 397–405 y la tabla 5. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/staudinger-lecture.pdf>

Poner a prueba la gravedad: de 1915 a 1975

Una teoría puede ajustarse a una observación sin ser la única que lo haga. Los experimentos gravitatorios se volvieron más discriminantes cuando los investigadores preguntaron qué rasgo concreto de una teoría restringía cada medición. Una órbita, un desplazamiento de frecuencia y un retardo de radar no aportan evidencias intercambiables.

La explicación de Einstein de la discrepancia orbital restante de Mercurio resolvía un problema ya existente. Las mediciones de eclipses, en cambio, examinaban las posiciones aparentes de estrellas próximas al Sol. Estas últimas requerían una interpretación cuidadosa de las fotografías y de la incertidumbre; no fotografiaban directamente la curvatura del espacio-tiempo. Ambos episodios importaron, pero desempeñaron papeles distintos como evidencia. [1]

Pound y Rebka llevaron una comprobación del desplazamiento gravitatorio de frecuencia a un laboratorio terrestre. La absorción resonante de rayos gamma y un desplazamiento Doppler ajustable permitieron comparar un efecto extremadamente pequeño con algo controlado experimentalmente. El resultado comprobaba una relación entre el potencial gravitatorio y la frecuencia. No seleccionaba por sí solo todas las ecuaciones de campo de la relatividad general frente a cualquier alternativa. [2]

Shapiro propuso buscar un retardo adicional de ida y vuelta del radar cuando una señal pasaba cerca del Sol. El tiempo sustituyó a la dirección como principal observable. Por ello, la geometría orbital, los desplazamientos instrumentales y el material interpuesto intervenían de otro modo en el análisis. Describirlo

como si la luz simplemente perdiera velocidad localmente confundiría una descripción en coordenadas con lo que mide un observador local en caída libre. [3]

Los marcos comunes de comparación permitieron después describir varias teorías gravitatorias mediante parámetros compartidos. Distintos experimentos podían restringir distintas combinaciones de esos parámetros. La concordancia entre varios observables podía eliminar alternativas que sobrevivían a una sola comprobación, dentro de los supuestos declarados del marco. [1]

El periodo de 1915 a 1975 no debe apropiarse de los éxitos posteriores de las ondas gravitatorias para reforzar su propia evidencia. Su logro ya era considerable: un programa coordinado de comprobaciones hizo explícitas las alternativas. La relatividad especial también siguió siendo distinta de una teoría de la gravedad. El nuevo criterio exigía explicar qué se medía, qué supuestos conectaban la medición con la teoría y qué posibilidades excluía realmente el resultado.

Referencias

- [1] Will, C. M. "The Confrontation between General Relativity and Experiment." *Living Reviews in Relativity* 17, 4 (2014), introducción y secciones sobre desplazamiento al rojo y comprobaciones posnewtonianas. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>
- [2] Pound, R. V., y Rebka, G. A., Jr. "Apparent Weight of Photons." *Physical Review Letters* 4, 337–341 (1960). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>
- [3] Shapiro, I. I. "Fourth Test of General Relativity." *Physical Review Letters* 13, 789–791 (1964). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>

Los fundamentos cuánticos pasan a ser distinguibles experimentalmente

Dos sobres que contienen respuestas opuestas pueden producir una correlación perfecta sin comunicación alguna al abrirlos. Los experimentos cuánticos necesitan algo más discriminante que resultados correlacionados por sí solos. La pregunta pasa a ser si una explicación local puede reproducir el patrón correspondiente a varias elecciones de medición.

Bell convirtió esa pregunta en una restricción matemática. Su argumento no excluía toda teoría que contuviera variables adicionales. Restringía una conjunción de supuestos sobre cómo se producen los resultados. La formulación posterior de CHSH aclaró la relación con los experimentos prácticos al combinar correlaciones procedentes de diferentes ajustes de medición. [1,2]

Bajo los supuestos locales declarados, esa combinación tiene una cota. La mecánica cuántica predice que mediciones adecuadas de pares entrelazados pueden superarla. Muchos ensayos, con diferentes pares de ajustes, proporcionan las correlaciones. El experimento no mide a la vez todas las propiedades incompatibles de una sola partícula.

La selección y detección de los ensayos forma parte del argumento. Si solo se registra un subconjunto favorable, las correlaciones reunidas pueden no comprobar el modelo que se pretendía examinar. Del mismo modo, elegir los ajustes con suficiente antelación podría permitir una explicación mediante comunicación ordinaria. Los analizadores conmutados de Aspect

y sus colaboradores abordaron la cuestión temporal sin cerrar por ello todas las demás lagunas experimentales. [3]

Hensen y sus colaboradores combinaron después importantes controles de localidad y detección en un experimento con espines electrónicos separados. Su resultado era una inferencia estadística a partir de una muestra finita. «Sin lagunas» tiene un alcance experimental definido; no elimina todos los supuestos sobre el aparato ni hace imposibles las correlaciones ocultas irrestrictas con las elecciones. [4]

El cambio conceptual fue, aun así, poderoso. Las variables no observadas no podían garantizar inmunidad frente al experimento si su organización propuesta restringía las estadísticas observables. Una violación excluye una clase de modelos declarada bajo los supuestos de la comprobación. No proporciona un mensaje controlable más rápido que la luz ni selecciona una interpretación única de la mecánica cuántica. El logro fue precisar la frontera entre explicaciones experimentalmente diferentes y experimentalmente equivalentes.

Referencias

- [1] Bell, J. S. "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox." *Physics Physique Fizika* 1, 195–200 (1964). <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
- [2] Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., y Holt, R. A. "Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories." *Physical Review Letters* 23, 880–884 (1969). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.23.880>
- [3] Aspect, A., Dalibard, J., y Roger, G. "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers." *Physical Review Letters* 49, 1804–1807 (1982). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804>
- [4] Hensen, B., et al. "Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres." *Nature* 526, 682–686 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature15759>

Las leyes deterministas dejan de garantizar la predicción práctica

Una regla determinista da un futuro para un estado inicial exacto. No garantiza que conozcamos ese estado exactamente. Tampoco garantiza que los estados iniciales próximos sigan próximos. Separar esas promesas cambió la relación entre una ley y una predicción útil.

Poincaré describió cómo una pequeña discrepancia inicial podía convertirse más tarde en una grande. Un conocimiento aproximado del presente respalda una predicción de exactitud correspondiente solo cuando la dinámica conserva la exactitud necesaria para esa predicción. Algunos sistemas disminuyen las diferencias; otros las amplifican. El determinismo por sí solo no elige ninguno de esos resultados. [1]

El modelo reducido de convección de Lorenz concretó la dependencia sensible en un pequeño sistema de ecuaciones deterministas. No era un modelo completo de la atmósfera. Su importancia radicaba en que podía aparecer un comportamiento irregular y acotado sin una enorme colección de causas externas sin especificar. Los métodos numéricos seguían necesitando examen: una trayectoria calculada errática no podía aceptarse automáticamente como propiedad de las ecuaciones. [2]

Cuando los errores pequeños crecen aproximadamente de forma exponencial, unas mediciones mejores pueden ampliar el horizonte útil de predicción sin multiplicarlo proporcionalmente a esa mejora. El resultado depende de la incertidumbre inicial, de su crecimiento y de la tolerancia del uso previsto. Una trayectoria precisa y una predicción estadística amplia no tienen por qué perder utilidad al mismo tiempo.

May mostró cómo reglas de recurrencia no lineales sencillas pueden tener comportamientos a largo plazo muy distintos cuando cambian sus parámetros. Una fórmula breve puede aproximarse a un valor fijo, recorrer un ciclo o comportarse caóticamente. Esa demostración matemática no muestra que toda población o todo proceso social siga la misma regla. [3]

Un registro irregular tampoco tiene por qué ser caótico: el ruido de medición y las condiciones externas cambiantes siguen siendo alternativas. La ganancia conceptual es una explicación más exigente de la predicción. Conocer una ecuación gobernante es un logro; justificar una predicción requiere mediciones iniciales, estabilidad, fiabilidad numérica y una pregunta claramente especificada. Explicar una limitación puede constituir por sí mismo un éxito científico.

Referencias

- [1] Poincaré, H. *Science et méthode* (1908), libro I, capítulo IV, “Le hasard.” https://fr.wikisource.org/wiki/Science_et_m%C3%A9thode
- [2] Lorenz, E. N. “Deterministic Nonperiodic Flow.” *Journal of the Atmospheric Sciences* 20, 130–141 (1963). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2)
- [3] May, R. M. “Simple mathematical models with very complicated dynamics.” *Nature* 261, 459–467 (1976). <https://doi.org/10.1038/261459a0>

De los infinitos electrodinámicos a las escalas de Wilson

Un infinito que aparece en un cálculo no es algo que haya medido un instrumento. Señala una dificultad para conectar el cálculo con un observable. La renormalización cobró importancia cuando los físicos necesitaron que esa conexión produjera predicciones precisas y finitas, y después cuando la escala de una descripción se convirtió en un problema por derecho propio.

El tratamiento de Bethe de los desplazamientos energéticos del hidrógeno y el cálculo de Schwinger de la corrección del momento magnético del electrón abordaban desviaciones medidas diferentes respecto a explicaciones más sencillas. Su éxito dependía de relacionar de forma coherente las magnitudes teóricas con las medidas. Ajustar una corrección arbitraria por separado a cada observación no habría proporcionado el mismo logro predictivo. [1,2]

La conferencia retrospectiva de Tomonaga describe un programa con varios enfoques y el tratamiento de Dyson de las divergencias hasta órdenes perturbativos arbitrariamente altos. Una prescripción sistemática era más que ignorar un infinito indeseado. Introducir un regulador intermedio y relacionar los parámetros con condiciones físicas eran operaciones distintas, y seguían abiertas otras preguntas sobre la teoría resultante. [3]

El puente histórico hacia la dependencia de escala es esencial. Stueckelberg y Petermann consideraron transformaciones entre elecciones finitas de parámetros. Gell-Mann y Low investigaron el comportamiento a distancias cortas en la electrodinámica cuántica. Wilson describe la relación entre parámetros de carga definidos a distintas escalas de momento como una predecesora

de sus propias ecuaciones. La conexión es técnica, no simplemente un nombre compartido. [4,5]

El camino de Wilson comenzó en la teoría de campos, donde retirar una parte de alta energía de un modelo cambiaba la descripción de lo que quedaba. Su encuentro con la descripción de escala de Kadanoff conectó ese trabajo con los fenómenos críticos. El artículo posterior desarrolló esa conexión hasta convertirla en un enfoque de cálculo. Esas etapas abordaban problemas relacionados desde puntos de partida diferentes. [4,6]

El cambio consistió en pasar de obtener respuestas finitas concretas a estudiar cómo deben cambiar las descripciones y sus parámetros con la resolución. No garantizaba la convergencia de toda expansión ni reparaba toda teoría divergente. Mantener visible ese límite preserva el logro: la dependencia de escala se convirtió en algo que organizar e investigar, en lugar de una molestia inexplicada en el cálculo.

Referencias

- [1] Bethe, H. A. "The Electromagnetic Shift of Energy Levels." *Physical Review* 72, 339–341 (1947). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.72.339>
- [2] Schwinger, J. "On Quantum-Electrodynamics and the Magnetic Moment of the Electron." *Physical Review* 73, 416–417 (1948). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.416>
- [3] Tomonaga, S. "Development of Quantum Electrodynamics." Conferencia Nobel (1965). <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1965/tomonaga/lecture/>
- [4] Wilson, K. G. "The Renormalization Group and Critical Phenomena." Conferencia Nobel (1982). <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1982/wilson/lecture/>
- [5] Gell-Mann, M., y Low, F. E. "Quantum Electrodynamics at Small Distances." *Physical Review* 95, 1300–1312 (1954). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.95.1300>

- [6] Wilson, K. G. "Renormalization Group and Critical Phenomena. I. Renormalization Group and the Kadanoff Scaling Picture." *Physical Review B* 4, 3174–3183 (1971). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.4.3174>

Genes discretos y variación continua: una reconciliación estadística

La estatura varía en una escala casi continua, pero los factores heredados pueden pasar entre generaciones como alternativas discretas. Estas observaciones no tienen por qué entrar en conflicto. Muchas contribuciones separadas pueden combinarse en una distribución de aspecto suave, por lo que el aspecto del rasgo por sí solo no permite concluir que el material hereditario se mezcle.

Los estudios biométricos medían la variación y el parecido entre parientes. Los estudios mendelianos examinaban la segregación. Cuantificaban objetos diferentes, y los intentos de conectarlos precedieron a la influyente explicación de Fisher. El desacuerdo histórico no debe relatarse como si las matemáticas hubieran llegado a un campo que antes carecía de ellas. [1]

Un modelo construido sencillo muestra la posibilidad. Si muchas contribuciones heredadas pueden añadir cada una una pequeña cantidad, los totales intermedios pueden formarse de más maneras que los extremos. La variación ambiental y los efectos desiguales pueden difuminar aún más las categorías. Esto demuestra compatibilidad, no la arquitectura genética real de la estatura humana ni de todos los rasgos cuantitativos.

La explicación de Fisher fue más allá al investigar las correlaciones entre parientes bajo herencia mendeliana. La dominancia y los patrones de apareamiento complicaban el análisis. Una explicación debía conectar tanto la variación en una población

como el parecido dentro de las relaciones de parentesco, en lugar de ajustarse solo a una distribución de aspecto suave. [2]

Los entornos compartidos también importan. Una descomposición estadística no puede etiquetar sin más como genético todo parecido. Tampoco una proporción de la varianza poblacional es una proporción del cuerpo de una persona. La magnitud concierne a diferencias bajo condiciones especificadas; cambiar esas condiciones puede cambiar la proporción sin hacer que un individuo dependa menos del entorno.

La reconciliación hizo posible una conexión entre niveles: las reglas de transmisión podían explicar patrones poblacionales mediante un modelo estadístico. No revelaba todos los mecanismos moleculares ni volvía inmutables los rasgos. La ganancia fue un marco en el que los supuestos sobre herencia, entorno y parentesco podían declararse y comprobarse conjuntamente. Un resultado de aspecto continuo ya no obligaba a explicar sus causas mediante una mezcla continua.

Referencias

- [1] Visscher, P. M., y Goddard, M. E. "From R.A. Fisher's 1918 Paper to GWAS a Century Later." *Genetics* 211, 1125–1130 (2019). <https://doi.org/10.1534/genetics.118.301594>
- [2] Fisher, R. A. "The Correlation between Relatives on the Supposition of Mendelian Inheritance." *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 52, 399–433 (1918). <https://digital.library.adelaide.edu.au/items/5ed47714-2635-4af9-8409-cf7eb6f87c3b>

Descifrar el código genético: de 1954 a 1966

Saber que una secuencia lleva información no revela cómo especifica una proteína. Contar las combinaciones posibles ayuda a definir el problema, pero no puede proporcionar el diccionario ni la maquinaria que lo utiliza. Descifrar el código genético requirió experimentos que preguntaban por partes diferentes de esa cuestión.

La propuesta de Gamow hizo explícita una posible relación entre las disposiciones de nucleótidos y los aminoácidos. El argumento elemental de capacidad favorece los tripletes frente a los pares cuando se requiere un número suficiente de unidades de longitud fija. No demuestra que las células utilicen tripletes ni determina la dirección de lectura, el solapamiento, las posiciones iniciales o las asignaciones. Un patrón plausible todavía no es un código. [1]

Crick y sus colaboradores utilizaron combinaciones de mutaciones para investigar la agrupación. Una inserción puede desplazar los grupos posteriores; una delección compensadora puede restablecer la agrupación más adelante. La recuperación de la función bajo determinadas combinaciones respaldó la organización en tripletes. Era evidencia sobre cómo funcionaba la lectura, no una lista completada de qué triplete significaba qué aminoácido. [2]

Nirenberg y Matthaei suministraron ARN sintético a un sistema sin células. Un molde de uracilo repetido dirigió un producto rico en fenilalanina. Junto con la interpretación en tripletes, esto conectó un triplete concreto con un aminoácido. La entrada controlada hizo abordable una asignación, mientras muchas otras seguían sin resolverse. [3]

Las secuencias repetitivas definidas de Khorana proporcionaron entradas más informativas que las mezclas de composición conocida pero orden desconocido. Los experimentos de unión con tripletes cortos proporcionaron un observable diferente de la síntesis completa de proteínas. La concordancia entre esos métodos restringía las alternativas con más fuerza que repetir un único tipo de medición. Sus conferencias Nobel describen retrospectivamente el programa. [4,5]

El diccionario surgió mediante esa división del trabajo experimental. No se traducía a sí mismo: la maquinaria celular hacía físicamente efectivas las asignaciones. El cambio conceptual fue que una propuesta de codificación podía cuestionarse relación por relación cambiando un molde, examinando mutaciones o comparando ensayos. Establecer la correspondencia abrió nuevas preguntas sobre cómo se implementa y con qué exactitud funciona.

Referencias

- [1] Gamow, G. "Possible Relation between Deoxyribonucleic Acid and Protein Structures." *Nature* 173, 318 (1954). <https://doi.org/10.1038/173318a0>
- [2] Crick, F. H. C., Barnett, L., Brenner, S., y Watts-Tobin, R. J. "General Nature of the Genetic Code for Proteins." *Nature* 192, 1227–1232 (1961). <https://doi.org/10.1038/1921227a0>
- [3] Nirenberg, M. W., y Matthaei, J. H. "The dependence of cell-free protein synthesis in *E. coli* upon naturally occurring or synthetic polyribonucleotides." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 47, 1588–1602 (1961). <https://doi.org/10.1073/pnas.47.10.1588>
- [4] Khorana, H. G. "Nucleic Acid Synthesis in the Study of the Genetic Code." Conferencia Nobel (1968). <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1968/khorana/lecture/>
- [5] Nirenberg, M. W. "The Genetic Code." Conferencia Nobel (1968). <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1968/nirenberg/lecture/>

Evolución sin una explicación adaptativa para cada cambio

Un recuento de diferencias moleculares puede cuestionar una explicación, pero solo después de varios pasos inferenciales. En la década de 1960 se utilizaron comparaciones de proteínas para estimar una tasa de sustitución molecular. Kimura preguntó si esa tasa podía sostenerse cuando cada sustitución requería una sustitución ventajosa independiente con el coste reproductivo supuesto en un modelo anterior.

El cálculo del coste de Haldane se refería a la pérdida selectiva acumulada durante la sustitución, no simplemente a una pequeña desventaja en una generación. El límite de tasa que proponía dependía del modelo. Kimura extrapoló una tasa de sustitución mucho más rápida a partir de comparaciones de proteínas y argumentó que asignar el coste supuesto a cada cambio crearía una carga intolerable. La sustitución neutral o casi neutral ofrecía una posible solución. [1,2]

La premisa era, por tanto, una tensión entre una tasa inferida y un modelo de coste. No era simplemente la incapacidad de imaginar una función útil. Mutación y sustitución también debían permanecer distintas: una variante nueva no tiene por qué fijarse en la población.

Bajo un modelo neutral sencillo, una población mayor aporta más mutaciones nuevas, mientras que cada copia neutral nueva tiene una probabilidad menor de fijación. Estos efectos se cancelan en la tasa esperada de sustitución a largo plazo. Eso explica una consecuencia del modelo; no establece de manera independiente que las mediciones históricas exijan neutralidad.

Las estimaciones originales y los supuestos de coste eran discutibles. Kern y Hahn critican la extrapolación al conjunto del genoma y examinan cómo afectan los supuestos alternativos al límite alegado. La utilidad posterior de un programa de investigación no puede validar retrospectivamente todas las premisas que lo motivaron. [3]

King y Jukes, Ohta y los debates posteriores desarrollaron distintas partes del problema molecular. Fueron argumentos que continuaron, no una conversión unánime. [4,5,6] El cambio histórico consistió en hacer que una tasa de sustitución restringiera la explicación causal propuesta. Mantener separadas la evidencia medida, la extrapolación y el modelo poblacional hace inteligible la controversia sin tratar el argumento original como una demostración incuestionable.

Referencias

- [1] Haldane, J. B. S. "The Cost of Natural Selection." *Journal of Genetics* 55, 511–524 (1957). <https://doi.org/10.1007/BF02984069>
- [2] Kimura, M. "Evolutionary Rate at the Molecular Level." *Nature* 217, 624–626 (1968). <https://doi.org/10.1038/217624a0>
- [3] Kern, A. D., y Hahn, M. W. "The Neutral Theory in Light of Natural Selection." *Molecular Biology and Evolution* 35, 1366–1371 (2018). <https://doi.org/10.1093/molbev/msy092>
- [4] King, J. L., y Jukes, T. H. "Non-Darwinian Evolution." *Science* 164, 788–798 (1969). <https://doi.org/10.1126/science.164.3881.788>
- [5] Ohta, T. "Slightly Deleterious Mutant Substitutions in Evolution." *Nature* 246, 96–98 (1973). <https://doi.org/10.1038/246096a0>
- [6] Galtier, N. "Half a Century of Controversy: The Neutralist/Selectionist Debate in Molecular Evolution." *Genome Biology and Evolution* 16, evae003 (2024). <https://doi.org/10.1093/gbe/evae003>

La inmunidad se convierte en selección entre variantes biológicas

Una respuesta inmunitaria específica frente a una sustancia no encontrada antes plantea un problema de mecanismo. ¿La sustancia instruye al organismo para producir la respuesta correspondiente o selecciona entre posibilidades que ya existen? Las alternativas sitúan el origen de la especificidad en partes distintas del proceso.

Jerne propuso un papel selectivo para el antígeno entre las posibilidades de anticuerpos existentes. Eso todavía no era lo mismo que seleccionar una célula que se reproduce. Seleccionar una molécula capaz de unirse no explica por sí solo una población sostenida de productores. La localización de la variación importa para explicar la amplificación. [1]

La formulación clonal de Burnet situó las variantes en las células. Una célula correspondiente podía ser estimulada para generar descendientes con una especificidad relacionada, conectando la selección con la multiplicación. La exposición considerada aquí es su propuesta original en una reimpresión posterior, no una historia independiente de su recepción. [2]

Nossal y Lederberg investigaron la producción de anticuerpos a nivel de células individuales. Una mezcla con dos especificidades de anticuerpos no nos dice si cada célula produce ambas o si células separadas producen productos distintos. Sus resultados respaldaron el segundo tipo de restricción en la situación examinada. «Detectable» sigue siendo un límite importante: el

ensayo no establecía todas las propiedades posibles de todas las células. [3]

El modelo también proporcionaba una explicación de cómo una respuesta posterior podía comenzar desde una población celular modificada. No completaba la explicación de la memoria inmunitaria ni de la tolerancia. Un repertorio diverso plantea preguntas sobre la activación, la persistencia y las respuestas perjudiciales frente a los propios componentes del organismo.

El suministro de variantes seguía siendo otro problema. El trabajo molecular de Tonegawa estableció una contribución del reordenamiento de segmentos génicos de inmunoglobulinas. [4] La selección podía ser una explicación organizativa productiva antes de conocerse todos los mecanismos generadores de diversidad. El cambio conceptual unió la variación previa con la expansión celular selectiva, preservando las preguntas adicionales que creaba esa explicación en vez de pretender explicar toda la inmunidad.

Referencias

- [1] Jerne, N. K. "The Natural-Selection Theory of Antibody Formation." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 41, 849–857 (1955). <https://doi.org/10.1073/pnas.41.11.849>
- [2] Burnet, F. M. "A modification of Jerne's theory of antibody production using the concept of clonal selection." *Australian Journal of Science* 20, 67–69 (1957). Reimpreso en *CA: A Cancer Journal for Clinicians* 26, 119–121 (1976), especialmente pp. 120–121. <https://doi.org/10.3322/canjclin.26.2.119>
- [3] Nossal, G. J. V., y Lederberg, J. "Antibody Production by Single Cells." *Nature* 181, 1419–1420 (1958). <https://doi.org/10.1038/1811419a0>
- [4] Tonegawa, S. "Somatic Generation of Immune Diversity." Conferencia Nobel (1987). <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1987/tonegawa/lecture/>

La demostración formal encuentra límites internos

Comprobar una demostración proporcionada y decidir todas las preguntas matemáticas posibles son tareas distintas. La lógica del siglo XX precisó sus diferencias lo suficiente para establecer límites. A veces, el fracaso al buscar un método universal podía explicarse mediante un teorema, no por una falta de ingenio.

El programa de Hilbert trató las demostraciones formales como objetos finitos que podían estudiarse matemáticamente. La ambición era justificar métodos poderosos mediante un razonamiento restringido, no simplemente proponer una máquina que descubriera automáticamente toda verdad. Una demostración podía ser a la vez un argumento y un objeto de investigación adicional. [1]

El trabajo de Gödel, con refinamientos posteriores como los de Rosser, estableció la incompletitud de teorías suficientemente fuertes, consistentes y efectivamente axiomatizadas. Las condiciones importan. Una teoría restringida no tiene por qué quedar comprendida en el resultado, y añadir un enunciado antes indecidible cambia la teoría. Si la teoría más fuerte sigue cumpliendo las condiciones, la limitación vuelve a aplicarse. [2,3]

La expresión «dentro de» es crucial. Que un enunciado no sea demostrable en un sistema no lo sitúa por ello más allá de todo argumento concebible. El límite relacionado sobre demostrar la consistencia también concierne a un tipo especificado de autocertificación. Los marcos más fuertes pueden seguir proporcionando resultados valiosos de consistencia relativa. Nada de esto introduce un error en cada demostración válida ordinaria.

Church y Turing analizaron el cálculo efectivo mediante modelos precisos. Un argumento moderno sobre la parada supone un predictor universal siempre correcto y construye después un programa que, al aplicarse a sí mismo, se comporta de forma contraria a la predicción. La contradicción excluye ese procedimiento universal, mientras muchos programas concretos y clases restringidas siguen siendo analizables. Esta explicación moderna no debe confundirse con la formulación original de Turing. [4,5]

La ganancia conceptual es un mapa de tareas y de sus condiciones. Los límites formales no establecen que la verdad sea arbitraria ni que la mente humana trascienda necesariamente la computación. Muestran que la precisión y el alcance universal son logros distintos. La investigación matemática podía ahora demostrar límites de algunos de sus propios métodos propuestos e investigar qué seguía siendo posible bajo supuestos más restringidos.

Referencias

- [1] Zach, R. "Hilbert's Program." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/hilbert-program/>
- [2] Gödel, K. "Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I." *Monatshefte für Mathematik und Physik* 38, 173–198 (1931). <https://doi.org/10.1007/BF01700692>
- [3] Raatikainen, P. "Gödel's Incompleteness Theorems." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/goedel-incompleteness/>
- [4] Turing, A. M. "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem." *Proceedings of the London Mathematical Society*, serie 2, 42, 230–265 (1936–1937). <https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>
- [5] Copeland, B. J. "The Church-Turing Thesis." *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/church-turing/>

Hacer medible la sensación: psicofísica y cronometría mental

Una sensación se experimenta privadamente, pero las respuestas a estímulos controlados pueden medirse públicamente. La psicofísica y la cronometría mental desarrollaron maneras de conectar esas observaciones con afirmaciones sobre sensación y procesamiento. La conexión requería un modelo; un instrumento no colocaba una regla directamente dentro de la experiencia.

Un pequeño incremento físico puede notarse más fácilmente sobre un estímulo débil que sobre uno fuerte. La relación proporcional de Weber, tal como la trató Fechner, cuantificó esa dependencia dentro de un intervalo adecuado. No proporcionaba una ley universal para todos los sentidos y todas las intensidades. [1]

Fechner añadió otra premisa: las diferencias apenas perceptibles iguales podían tratarse como pasos iguales de sensación. Esa premisa, combinada con incrementos físicos proporcionales, conduce a una escala logarítmica. El resultado matemático no confirma de forma independiente que pasos igualmente discriminables se sientan igual de grandes. El compromiso adicional está en el puente entre observación e interpretación. [1]

Donders abordó los procesos mentales mediante los tiempos de reacción. Comparar una tarea de respuesta simple con otra que exigía una elección adicional podía producir una diferencia temporal. Interpretar esa diferencia como la duración de una operación concreta requiere que los demás componentes pertinentes permanezcan iguales y que la organización del procesamiento permita la sustracción. [2]

Una elección también podía alterar la preparación, la codificación del estímulo o el movimiento. En ese caso, la diferencia observada

combina influencias. El análisis de Sternberg examinó los supuestos sobre las etapas y las manipulaciones necesarias para respaldar esas inferencias. Medir una diferencia con mayor precisión no puede decidir por sí solo qué arquitectura la produjo. [3]

Esto no era una medición directa de todos los aspectos de la experiencia ni un veredicto final sobre mente y cuerpo. Era un logro intermedio de considerable alcance: los estímulos, los juicios y los tiempos podían restringir hipótesis sobre procesos que de otro modo no se observaban. La obligación duradera es declarar por qué una medición respalda la interpretación concreta que se le atribuye.

Referencias

- [1] Fechner, G. T. *Elements of Psychophysics* (1860), pasajes seleccionados de la traducción inglesa de 1912, reproducidos en *Classics in the History of Psychology*. <https://www.yorku.ca/pclassic/Fechner/>
- [2] Donders, F. C. "On the speed of mental processes." *Acta Psychologica* 30, 412–431 (1969), traducción del artículo de 1868–1869. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90065-1](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90065-1)
- [3] Sternberg, S. "The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method." *Acta Psychologica* 30, 276–315 (1969). [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90055-9)

Recordar se convierte en reconstruir

Un recuerdo puede conservar información sin reproducir exactamente la experiencia original. Una explicación útil debe dar cuenta tanto de la persistencia como de la transformación: qué sigue accesible, qué desaparece y cómo se construye una respuesta presente. Llamar reconstructiva a la memoria no establece que todos los recuerdos sean falsos.

Ebbinghaus midió el ahorro en el reaprendizaje. Un material que no se recordaba libremente podía volver a aprenderse con menos esfuerzo. Ese resultado complicaba la división sencilla entre un recuerdo plenamente presente y otro completamente borrado. El ahorro de esfuerzo era una medida del rendimiento, no un porcentaje literal de una imagen interna que hubiera sobrevivido. [1]

Bartlett investigó materiales con significado y cómo se relacionaba el recuerdo con el conocimiento previo y con el esfuerzo por dar sentido a lo encontrado. Esto planteaba una pregunta distinta del aprendizaje de sílabas estrechamente controlado. Ninguna de las tareas representaba automáticamente todas las formas de recordar. Una explicación plausible ofrecida después de una distorsión también necesitaba algo más que plausibilidad para convertirse en un modelo predictivo. [2]

Loftus y Palmer manipularon la formulación de preguntas sobre colisiones filmadas. Las preguntas podían influir en las estimaciones de velocidad y en los informes posteriores. Demostrar un efecto sobre lo que se informa no establecía de forma unívoca que un recuerdo original hubiera sido sobrescrito por completo: las expectativas de respuesta y la interpretación

también podían contribuir. El contraste experimental hizo más abordables esas preguntas sobre mecanismos. [3]

Roediger y McDermott encontraron que las listas de palabras relacionadas podían favorecer informes de una palabra fuertemente asociada que no se había presentado. El recuerdo exacto y el error sistemático podían coexistir. Sin embargo, un resultado con listas de palabras no podía trasladarse directamente a todos los acontecimientos autobiográficos, donde difieren los materiales, los intervalos y otras condiciones. [4]

La ruptura fue una exigencia explicativa más amplia. La retención por sí sola no describía la forma de un recuerdo presente. También había que investigar el conocimiento previo, la información posterior y la tarea de informar. Podían estudiarse por separado la confianza, la exactitud y el proceso que produce una respuesta, sin tratar ni el recuerdo fiable ni los errores característicos como si fueran todo el fenómeno.

Referencias

- [1] Ebbinghaus, H. *Memory: A Contribution to Experimental Psychology* (1885), traducción de H. A. Ruger y C. E. Bussenius (1913), capítulo VII. <https://psychclassics.yorku.ca/Ebbinghaus/memory7.htm>
- [2] Bartlett, F. C. *Remembering: A Study in Experimental and Social Psychology*. Cambridge University Press (1932), especialmente capítulos X y XII. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511759185>
- [3] Loftus, E. F., y Palmer, J. C. "Reconstruction of automobile destruction: An example of the interaction between language and memory." *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 13, 585–589 (1974). [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(74\)80011-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(74)80011-3)
- [4] Roediger, H. L., III, y McDermott, K. B. "Creating false memories: Remembering words not presented in lists." *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 21, 803–814 (1995). <https://doi.org/10.1037/0278-7393.21.4.803>

El cerebro adulto se convierte en un sistema cambiante

Los adultos aprenden, pero esa observación por sí sola no identifica un mecanismo neuronal. Un rendimiento mejor podría reflejar un cambio de estrategia o de atención. Establecer la plasticidad neuronal requirió mediciones que distinguieran cambios físicos diferentes y examinaran su relación con la función.

Las ideas sobre modificación neuronal precedieron a los experimentos más conocidos. La revisión histórica de Berlucchi y Buchtel sigue esas raíces y el significado cambiante de «plasticidad». Por tanto, la historia no es una inversión súbita de un mundo en el que nadie imaginaba un cerebro adulto adaptable. [1]

Bliss y Lømo informaron de cambios persistentes en las respuestas tras una estimulación de condicionamiento de una vía en conejos. Su análisis distinguía la eficiencia de transmisión de los cambios en la excitabilidad de la población que respondía. Una respuesta medida mayor no era automáticamente un recuerdo natural mayor ni una demostración de que hubieran aparecido más sinapsis. [2]

Merzenich y sus colaboradores cartografiaron respuestas sensoriales modificadas en monos adultos tras la pérdida de dedos. Las localizaciones de la corteza podían responder a regiones cutáneas de forma diferente a la anterior. Un mapa funcional modificado no significaba necesariamente que el tejido se hubiera desplazado físicamente ni que todo cambio requiriera crecimiento nuevo. Tampoco establecía el resultado una recuperación ilimitada después de cualquier lesión humana. [3]

La generación de neuronas era otra pregunta distinta. Los resultados contrapuestos sobre el hipocampo humano adulto de los que informaron Sorrells y sus colaboradores y Boldrini y sus colaboradores ilustraban la importancia del muestreo, la conservación y los marcadores. No convertían todos los cambios neuronales adultos en una sola proposición sin resolver. La evidencia sobre circuitos existentes y la evidencia sobre neuronas nuevas requieren conexiones distintas. [4,5]

La plasticidad nombra así una familia de cambios. No todos tienen por qué persistir o ser beneficiosos. El avance conceptual consiste en preguntar qué propiedad cambia, bajo qué condiciones, durante cuánto tiempo y con qué consecuencia funcional. La estabilidad también pasa a formar parte del problema: un sistema nervioso debe mantenerse organizado mientras permite que los efectos de su historia alteren las respuestas posteriores.

Referencias

- [1] Berlucchi, G., y Buchtel, H. A. "Neuronal plasticity: historical roots and evolution of meaning." *Experimental Brain Research* 192, 307–319 (2009). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19002678/>
- [2] Bliss, T. V. P., y Lømo, T. "Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path." *Journal of Physiology* 232, 331–356 (1973). <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1973.sp010273>
- [3] Merzenich, M. M., Nelson, R. J., Stryker, M. P., Cynader, M. S., Schoppmann, A., y Zook, J. M. "Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys." *Journal of Comparative Neurology* 224, 591–605 (1984). <https://doi.org/10.1002/cne.902240408>
- [4] Sorrells, S. F., et al. "Human hippocampal neurogenesis drops sharply in children to undetectable levels in adults." *Nature* 555, 377–381 (2018). <https://doi.org/10.1038/nature25975>

- [5] Boldrini, M., et al. "Human Hippocampal Neurogenesis Persists throughout Aging." *Cell Stem Cell* 22, 589–599.e5 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.stem.2018.03.015>