

Rupturas conceptuales

Edición infantil

Juan Seguro · All Rights Reserved

El universo y sus observadores

Este libro se dirige a lectores de aproximadamente nueve a doce años. Cada capítulo breve presenta un cambio en la manera de responder a una pregunta científica o matemática. Algunas ideas son exigentes y pueden comentarse con un adulto. El objetivo es mantener clara la distinción importante, en lugar de ofrecer todos los detalles históricos o los cálculos.

Los capítulos se adaptan de los capítulos científicos correspondientes. No introducen experimentos prácticos. Las notas para adultos del final proporcionan las referencias utilizadas por esos capítulos. Una explicación breve también debe dejar claro qué establece la evidencia y qué no.

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	25
Descifrar el código genético: de 1954 a 1966	27
Evolución sin una explicación adaptativa para cada cambio	29
La inmunidad se convierte en selección entre variantes biológicas	31
La demostración formal encuentra límites internos	33
Hacer medible la sensación: psicofísica y cronometría mental	35
Recordar se convierte en reconstruir	37
El cerebro adulto se convierte en un sistema cambiante	39
Notas para adultos	41

Movimiento sin un motor continuo

Una piedra sigue moviéndose después de abandonar la mano de alguien. Hace mucho tiempo, esto planteaba una pregunta difícil: si la mano ya no empuja, ¿qué mantiene la piedra en movimiento?

Buridán propuso que el lanzamiento daba a la piedra algo llamado «ímpetu». La resistencia podía reducirlo. Su idea contribuyó a cambiar la explicación, pero no era lo mismo que la explicación actual del movimiento.

En la mecánica moderna, un objeto que se mueve uniformemente en línea recta no necesita una fuerza continua solo para mantener ese movimiento. Las fuerzas explican los cambios de rapidez o de dirección. Una piedra que cae y un objeto que pierde rapidez sobre una mesa experimentan interacciones, por lo que ninguno es un ejemplo de movimiento completamente libre de perturbaciones.

El cambio importante estuvo en la pregunta. En vez de preguntar siempre qué sostiene el movimiento, los científicos podían preguntar qué lo cambia. Así, detenerse y girar se convirtieron en fenómenos que investigar, en lugar de señales de que el movimiento simplemente se había agotado.

La rapidez y la dirección son partes distintas de la descripción del movimiento. Algo puede mantener la misma rapidez mientras gira. Por eso una trayectoria circular y una recta no son la misma forma de continuar. La pregunta no es solo si un objeto sigue moviéndose, sino cómo cambia su movimiento.

Piensa en ello

¿Puede un objeto cambiar su movimiento sin cambiar su rapidez?

Razonamiento

Sí. Puede girar. Cambiar de dirección cambia su velocidad, aunque su rapidez siga siendo la misma.

La extinción se convierte en un hecho de la historia natural

Un fósil nos dice que un animal vivió alguna vez. Pero un fósil desconocido no nos dice de inmediato que todos los animales de su especie hayan desaparecido. Algunos podrían seguir viviendo donde nadie ha buscado.

Cuvier comparó huesos fósiles con huesos de animales vivos. Tenía que preguntar si las diferencias significaban un tipo distinto de animal o una variación ordinaria. También consideraba si probablemente se habría advertido la presencia de un animal superviviente.

No encontrar un animal terrestre grande y llamativo puede significar algo distinto de no encontrar un animal diminuto en aguas poco exploradas. La búsqueda importa.

La extinción significa que un tipo de ser vivo ha desaparecido por completo. Establecer esa pérdida no revela, por sí solo, su causa. La nueva idea permitió que la historia natural incluyera animales que ya no podían encontrarse vivos, manteniendo separadas la evidencia de su desaparición y la explicación de cómo ocurrió.

Una colección de animales puede estar incompleta. Por tanto, no encontrar una coincidencia en ella no basta

para concluir que un animal fósil está extinto. Los investigadores también deben considerar cuánto se sabe de los animales vivos y dónde podría quedar un superviviente desconocido. La confianza en la conclusión depende de esa evidencia.

Piensa en ello

¿Una búsqueda sin resultados muestra siempre que no hay nada?

Razonamiento

No. Una búsqueda puede pasar algo por alto. Hay que preguntar dónde y cómo se hizo y qué probabilidad tenía de detectar un superviviente.

La vida se abre a la explicación fisicoquímica

La levadura puede hacer que el azúcar experimente un cambio químico llamado fermentación. Los científicos preguntaron si ese cambio requería células vivas completas de levadura o si el material del interior de las células podía seguir realizándolo.

Buchner describió una preparación que fermentaba después de haber roto las células de levadura. Eso no significaba que se hubiera creado vida de la nada. El material seguía procediendo de células y no era un único ingrediente perfectamente separado.

El resultado estableció algo más acotado e importante: el cambio químico podía continuar sin que las células completas permanecieran intactas bajo esas condiciones. Los investigadores podían estudiar ahora qué componentes eran necesarios.

Eso no explicaba todo lo que hace una célula. Un extracto que fermenta no necesariamente crece o se reproduce. La ciencia avanzó separando una pregunta de la pregunta mucho más amplia sobre cómo funciona un ser vivo entero.

Una preparación fallida también puede ser informativa, pero exige cuidado. Quizá la actividad realmente no

pueda ocurrir fuera de una célula. O quizá la preparación dañó un componente necesario. Los investigadores deben distinguir esas explicaciones. El método utilizado para investigar un proceso puede detener accidentalmente el mismo proceso que quieren comprender.

Piensa en ello

Si un extracto no funciona, ¿hay una única explicación posible?

Razonamiento

No. Puede faltar algo necesario, estar dañado o encontrarse demasiado diluido. El fallo por sí solo no identifica la razón.

Las células se convierten en unidades de organización viva

Mirar por un microscopio puede revelar compartimentos diminutos. Pero ver un compartimento no es lo mismo que saber cómo se organiza una planta o un animal entero.

Los científicos compararon muchos tejidos y desarrollaron la idea de que las células son unidades básicas de la organización viva. Algunas explicaciones tempranas sobre cómo se formaban las células eran erróneas, aunque la comparación entre células vegetales y animales resultaba útil.

Otra pregunta necesitaba evidencia a lo largo del tiempo: ¿de dónde vienen las células nuevas? Observar la división ayudó a establecer que las células proceden de células existentes. Una imagen de dos células vecinas no habría mostrado eso por sí sola.

Las células también funcionan en relación con su entorno y con otras células. Un organismo es más que un montón de piezas separadas. La teoría celular dio a los científicos una forma de investigar esas relaciones; no explicó todos los detalles de la vida de una vez.

Imagina una teoría que reconoce correctamente una estructura repetida, pero explica mal cómo se forma.

Corregir esa explicación no tiene por qué borrar la observación útil. La teoría celular se desarrolló mediante este tipo de separación: la afirmación sobre la organización y la afirmación sobre el origen necesitaban su propio apoyo.

Piensa en ello

¿Una imagen estática de dos células mostraría cómo llegaron a existir?

Razonamiento

No por sí sola. Se necesita evidencia sobre el cambio a lo largo del tiempo para respaldar la afirmación de que una célula se dividió en dos.

La geometría deja de tener una única forma inevitable

En matemáticas, una demostración parte de supuestos y sigue reglas. ¿Qué ocurre si un enunciado no puede demostrarse a partir de los supuestos que elegimos?

Durante mucho tiempo, los matemáticos intentaron demostrar una regla concreta sobre rectas paralelas a partir de otras reglas geométricas. Con el tiempo se desarrollaron geometrías alternativas cambiando ese supuesto y siguiendo cuidadosamente las consecuencias.

Eso no significaba que la geometría euclídea se hubiera vuelto inútil de repente o que cualquier respuesta fuera aceptable. Los supuestos diferentes siguen exigiendo un razonamiento cuidadoso. Una imagen por sí sola no puede decidir si cada paso está justificado.

También hay una diferencia entre una posibilidad matemática y una descripción del mundo físico. Se necesitan mediciones para decidir qué descripción funciona en una situación concreta. El cambio importante fue que la geometría podía tener alternativas y que estas podían compararse con precisión.

Un dibujo puede hacer que una regla parezca obvia porque estamos acostumbrados a un tipo concreto de geometría. Pero lo que sugiere el dibujo y lo que demuestran los supuestos son preguntas diferentes. Los matemáticos pueden usar modelos para investigar una geometría poco familiar sin afirmar primero que describe todas las mediciones físicas.

Piensa en ello

¿Cambiar un supuesto significa que ya no hace falta razonar cuidadosamente?

Razonamiento

No. Las consecuencias deben seguir deduciéndose de los supuestos elegidos. Una geometría alternativa es un argumento estructurado, no un permiso para extraer cualquier conclusión.

El infinito se convierte en objeto de comparación exacta

Puedes emparejar cada entero positivo con un número par: uno con dos, dos con cuatro, tres con seis, y seguir aplicando la regla. Cada número de ambos lados recibe exactamente una pareja.

Eso sorprende porque los números pares son solo parte de la colección de enteros. Para las colecciones infinitas, el emparejamiento proporciona una manera precisa de preguntar si tienen el mismo tamaño.

No todas las colecciones infinitas pueden ponerse en una lista completa. La idea diagonal posterior de Cantor parte de una lista propuesta y da una regla para construir algo que falta en ella. La regla funciona contra cualquier lista propuesta del tipo especificado.

Es un argumento matemático, no un experimento que cuente infinitos objetos. Su enseñanza es que «interminable» no responde a todas las preguntas sobre el tamaño. Debemos decir exactamente qué tipo de comparación queremos hacer.

Un ejemplo finito puede ayudarnos a comprender una regla, pero no puede demostrar por sí solo qué ocurre con una colección infinita. El argumento diagonal explica por qué su construcción difiere de cada entrada

en una posición especificada. Su fuerza procede de ese razonamiento, no de escribir una tabla muy larga.

Piensa en ello

¿Comprobar muchos ejemplos sustituiría el argumento de la lista infinita?

Razonamiento

No. Muchos ejemplos pueden ilustrar la idea. La demostración debe explicar por qué funciona en cada posición de cualquier lista completa propuesta del tipo declarado.

Las moléculas gigantes se convierten en una posibilidad química

Una partícula grande puede ser un grupo de moléculas pequeñas que se mantienen juntas o una molécula gigante conectada por enlaces químicos. Esas posibilidades pueden parecer similares en algunas mediciones.

Staudinger defendió que los enlaces químicos ordinarios podían conectar estructuras muy largas. Los investigadores necesitaban evidencia de que las conexiones realmente se extendían por una molécula grande, en vez de formar solo un grupo débilmente unido.

Compararon cambios químicos y distintos tipos de mediciones. Ninguna observación aislada de un líquido espeso podía resolverlo todo.

Un material también podía contener cadenas de distintas longitudes. Un promedio describe esa mezcla; no significa que todas las cadenas tengan la longitud media. La nueva idea dio a la química más aspectos que medir y explicar, incluidas la longitud y la forma de las cadenas. No hizo desaparecer de la naturaleza los grupos de moléculas pequeñas.

Mediciones diferentes pueden describir una mezcla de maneras diferentes. Un promedio puede dar el mismo peso a cada molécula, mientras otro da más peso a las moléculas que aportan más masa. Las respuestas pueden diferir sin que ninguna afirme que todas las moléculas son idénticas. Los científicos deben decir qué significa su medición.

Piensa en ello

¿Debe una muestra contener una molécula cuyo tamaño sea exactamente el promedio?

Razonamiento

No. Un promedio puede resumir tamaños diferentes sin ser el tamaño de ninguna molécula de la muestra.

Poner a prueba la gravedad: de 1915 a 1975

Una medición satisfactoria puede ajustarse a más de una explicación. Para comparar explicaciones de la gravedad, los científicos necesitaban distintos tipos de comprobaciones.

Estudiaron el movimiento planetario, los cambios en las posiciones aparentes de las estrellas, los desplazamientos de frecuencia de la radiación y el tiempo empleado por las señales de radar. Cada comprobación preguntaba algo distinto. Un buen resultado en una no respondía automáticamente a todas las demás.

Las mediciones también necesitaban controles. Un instrumento puede introducir un desplazamiento y una fotografía requiere una comparación cuidadosa. Los científicos tenían que distinguir esas influencias del efecto que se estaba comprobando.

Combinar comprobaciones puede ser más sólido que repetir un mismo tipo de éxito. Una explicación que supera una medición puede fallar en otra. El cambio consistió en plantear una pregunta más precisa: ¿qué parte de una explicación de la gravedad respalda este experimento y qué alternativas siguen siendo posibles?

La historia también distingue explicar un problema ya conocido de comprobar un efecto recién propuesto. Ambas cosas pueden ser útiles, pero desempeñan funciones distintas. Una explicación sólida pregunta qué alternativas también podrían ajustarse, en lugar de tratar cada concordancia como demostración de que ya no queda ninguna otra explicación posible.

Piensa en ello

¿Por qué podrían ser más útiles dos comprobaciones distintas que una sola?

Razonamiento

Una comprobación puede dejar varias explicaciones posibles. Otra puede examinar una consecuencia distinta y ayudar a distinguir las explicaciones que superaron la primera.

Los fundamentos cuánticos pasan a ser distinguibles experimentalmente

Si dos sobres contienen respuestas opuestas, abrir uno te dice qué contiene el otro. Esa correlación ordinaria no muestra que haya viajado un mensaje entre ellos.

Los experimentos cuánticos comparan patrones más complicados. Los experimentadores pueden elegir mediciones distintas y una explicación propuesta debe dar cuenta de los resultados de esas elecciones.

Bell mostró que ciertos supuestos imponen un límite a las correlaciones resultantes. La teoría cuántica predice patrones que pueden superar ese límite, y los experimentos comprueban esas predicciones.

Las elecciones, la detección de resultados y la forma de contar los ensayos importan. Un resultado debe interpretarse teniendo presentes esas condiciones. No significa que podamos enviar cualquier mensaje queelijamos más rápido que la luz. El avance consistió en convertir un desacuerdo concreto sobre explicaciones en una pregunta experimental precisa.

Recoger los resultados sin sesgos forma parte del experimento. Si solo se detectan algunos acontecimientos, los investigadores deben comprender

si esa selección podría cambiar el patrón. Por eso, comprobar una idea implica algo más que comparar un número atractivo con una predicción. También exige comprobar cómo se obtuvo ese número.

Piensa en ello

¿Puede comprenderse un patrón llamativo sin comprobar cómo se seleccionaron los resultados?

Razonamiento

No con garantías. El proceso de selección podría favorecer algunos resultados. Un experimento debe abordar esa posibilidad antes de realizar la inferencia que pretende.

Las leyes deterministas dejan de garantizar la predicción práctica

Una regla puede ser exacta mientras una predicción sigue siendo incierta. Para utilizar la regla, también necesitamos saber de dónde parte el sistema.

En algunos sistemas, una diferencia inicial diminuta se vuelve mucho mayor después. Dos cálculos que comienzan casi igual pueden dar entonces predicciones detalladas muy diferentes. Lorenz estudió esto en un modelo matemático simplificado relacionado con el movimiento atmosférico.

Eso no significa que todo patrón complicado sea caos ni que ninguna predicción resulte útil. El ruido puede hacer que un registro parezca irregular, y una descripción estadística amplia puede seguir siendo útil cuando una trayectoria detallada ya no lo es.

La distinción importante está entre tener una regla y saber lo suficiente para hacer una predicción concreta. Las mediciones mejores ayudan, pero también importa cómo crece la incertidumbre. Una explicación científica puede decirnos por qué una predicción tiene límites.

La duración útil de una predicción también depende de la pregunta. Predecir una trayectoria exacta puede ser más difícil que describir un patrón estadístico más

amplio. Perder un tipo de predicción no elimina automáticamente todos los tipos de conocimiento. Los científicos deben identificar qué rasgo intentan predecir.

Piensa en ello

¿Una trayectoria detallada incierta significa que no puede predecirse nada útil?

Razonamiento

No. Algunas propiedades más amplias pueden seguir teniendo descripciones estadísticas útiles. También hay que establecer esas regularidades, en lugar de darlas simplemente por supuestas.

De los infinitos electrodinámicos a las escalas de Wilson

A veces un cálculo produce una respuesta infinita cuando los científicos necesitan una predicción finita para compararla con una medición. Escribir «infinito» no significa que un instrumento haya encontrado un resultado infinitamente grande.

Los físicos desarrollaron formas cuidadosas de conectar las magnitudes de sus ecuaciones con las magnitudes que medían. El método debía hacer varias predicciones de manera coherente, en lugar de inventar un ajuste diferente para cada resultado.

Después, los investigadores preguntaron cómo cambia una descripción cuando examina escalas diferentes. Wilson conectó el trabajo sobre partículas y sus interacciones con problemas en los que deben considerarse juntas variaciones a muchas escalas distintas. Se apoyó en desarrollos matemáticos anteriores.

El resultado fue un nuevo tipo de pregunta: cuando cambia la resolución, o el nivel de detalle considerado, ¿qué debe cambiar en la descripción? Esto no resolvió todas las dificultades de la física. Convirtió una dependencia difícil en algo que podía estudiarse por sí mismo.

Una pequeña discrepancia entre una predicción sencilla y una medición cuidadosa puede importar. Da al cálculo algo concreto que explicar. Pero una corrección satisfactoria solo resulta útil si se define de manera coherente. Un ajuste nuevo inventado para cada resultado no impondría las mismas exigencias a una teoría.

Piensa en ello

¿Por qué deben funcionar las mismas definiciones en varias predicciones?

Razonamiento

Porque permiten que la teoría afronte más de una comprobación. Un ajuste distinto para cada resultado podría ocultar un fallo en vez de explicarlo.

Genes discretos y variación continua: una reconciliación estadística

Las personas pueden diferir en estatura por cantidades pequeñas. ¿Significa eso que la herencia debe mezclarse como las pinturas? No necesariamente.

Muchas contribuciones heredadas separadas pueden combinarse. A menudo hay más formas de obtener un total intermedio que uno muy bajo o muy alto. Las condiciones del entorno pueden añadir otras diferencias.

Fisher desarrolló una explicación estadística que conectaba la herencia mendeliana con la variación y el parecido entre parientes. En la herencia mendeliana, los factores heredados pasan entre generaciones como alternativas separadas, en lugar de mezclarse. La explicación necesitaba supuestos tanto sobre la herencia como sobre la población estudiada.

Una afirmación sobre diferencias en una población no es una receta que diga qué parte de una persona fue fabricada por los genes. Los parientes también pueden compartir entornos. La nueva idea conectó contribuciones separadas con un patrón de aspecto

suave y convirtió las condiciones de esa conexión en algo que investigar.

Piensa en un total formado por muchas contribuciones pequeñas. Un total extremo puede requerir que todas las contribuciones apunten en la misma dirección, mientras que un total intermedio puede surgir de muchas combinaciones. Esto ilustra cómo contribuciones separadas pueden formar un patrón amplio. No es un recuento de las causas reales de la estatura de una persona.

Piensa en ello

¿Un patrón de aspecto suave demuestra que sus causas se mezclan continuamente?

Razonamiento

No. Muchas contribuciones separadas pueden combinarse para formar ese patrón. El aspecto del total no resuelve cómo se heredan las contribuciones.

Descifrar el código genético: de 1954 a 1966

Un mensaje escrito necesita algo más que suficientes símbolos. Alguien debe saber cómo agruparlos y qué significan los grupos. Los científicos afrontaron un problema relacionado al investigar cómo las secuencias de nucleótidos, cadenas ordenadas de componentes químicos, especifican proteínas.

Contar combinaciones sugería posibilidades, pero no revelaba las asignaciones reales. Las mutaciones ayudaron a investigar cómo se agrupaba la secuencia. Los investigadores prepararon secuencias de ARN, una molécula formada por nucleótidos, para utilizarlas como entradas experimentales. Ese material preparado se llama ARN sintético. Lo comprobaron en preparaciones sin células: sistemas que utilizan componentes celulares en vez de células completas e intactas. Estas comprobaciones ayudaron a conectar patrones concretos con productos.

Los distintos experimentos aportaban partes diferentes de la respuesta. Un resultado sobre la agrupación todavía no era un diccionario completo, y una asignación satisfactoria no explicaba todas las demás.

El código genético se convirtió en algo que podía comprobarse relación por relación. La tabla del código

describe esas asignaciones, pero no hace por sí sola el trabajo físico. Se necesita la maquinaria celular para que funcione la correspondencia.

La agrupación importa. Si los símbolos se leen en grupos, añadir un símbolo cerca del comienzo puede cambiar los grupos que siguen. Un cambio compensador posterior puede restablecer la agrupación más adelante. Estos ejemplos ayudan a explicar un marco de lectura, pero la afirmación biológica sigue necesitando evidencia de experimentos reales.

Piensa en ello

¿Saber cómo se agrupan los símbolos es lo mismo que conocer todas las asignaciones?

Razonamiento

No. La agrupación describe cómo se lee una secuencia. Un diccionario también debe conectar grupos concretos con sus salidas.

Evolución sin una explicación adaptativa para cada cambio

Un cambio en una secuencia biológica puede aparecer sin volverse común en toda una población. Un cambio nuevo y uno que acaba sustituyendo una variante anterior no son el mismo recuento.

Kimura comparó una tasa estimada de sustitución molecular con un modelo anterior del coste de la selección. Bajo esos supuestos, la sustitución parecía demasiado rápida para que cada cambio requiriera su propio proceso selectivo ventajoso.

Propuso que muchas sustituciones podían implicar, en cambio, cambios neutrales o casi neutrales. Los cambios neutrales no aportan ventajas ni desventajas reproductivas; los casi neutrales tienen un efecto de ese tipo muy pequeño en la población considerada. El cálculo y sus supuestos fueron debatidos. No demostraba que todo cambio molecular fuera neutral.

El paso importante consistió en comparar una explicación propuesta con cuánto cambio tendría que producir. Un desacuerdo científico útil puede preguntar si necesitan revisión las mediciones, las estimaciones o el modelo, en vez de limitarse a elegir un eslogan.

El modelo neutral distingue el número de variantes nuevas de la probabilidad de que una de ellas se fije, es decir, que sustituya a las demás alternativas en la posición genética pertinente en toda la población. Una población mayor puede aportar más variantes nuevas, mientras cada copia neutral nueva tiene menos probabilidad de alcanzar finalmente ese estado. Son dos contribuciones diferentes a la tasa esperada de sustitución, no una promesa sobre una variante concreta.

Piensa en ello

¿Puede un cálculo correcto demostrar que todos sus supuestos iniciales se ajustan a la naturaleza?

Razonamiento

No. Nos dice qué se sigue si los supuestos se cumplen. También debe examinarse la evidencia de esos supuestos.

La inmunidad se convierte en selección entre variantes biológicas

¿Cómo puede el sistema inmunitario responder de forma específica a algo que no ha encontrado antes? Una idea es que la sustancia desconocida instruye al sistema para producir una respuesta correspondiente. Otra es que selecciona entre posibilidades ya presentes.

La selección clonal sitúa esas posibilidades en células diferentes. Una célula adecuada puede multiplicarse y producir descendientes con una especificidad relacionada: una capacidad similar para reconocer determinados rasgos moleculares. La respuesta puede crecer sin que cada nueva célula reciba un diseño separado de la sustancia extraña.

Las mediciones de células individuales ayudaron a distinguir esta explicación de otras que podían parecer similares cuando se mezclaban todos sus productos.

La idea no respondió a todas las preguntas sobre la inmunidad. Los científicos seguían necesitando explicar cómo surgía la diversidad, cómo se controlaban las respuestas y cómo persistían las poblaciones modificadas. Esto explica un principio biológico; no es un consejo sobre cómo tratar enfermedades.

Una mezcla puede ocultar diferencias entre las cosas que la producen. Si una muestra contiene dos productos de anticuerpos, quizá los aportaron células distintas, o quizá las mismas células aportaron ambos. Mirar solo la mezcla no permite distinguir esas explicaciones. Medir células individuales puede hacer comprobable la diferencia.

Piensa en ello

¿Encontrar dos productos en una mezcla muestra que cada célula fabrica ambos?

Razonamiento

No. Células diferentes pueden aportar productos diferentes. La organización de los productores necesita su propia evidencia.

La demostración formal encuentra límites internos

Un conjunto de reglas puede permitirnos comprobar si alguien ha seguido correctamente una demostración. Eso no significa que las reglas puedan responder a todas las preguntas que planteemos.

Los matemáticos encontraron maneras de estudiar las demostraciones como objetos matemáticos. Gödel mostró límites para ciertos sistemas formales suficientemente fuertes, bajo condiciones importantes. Un enunciado que no puede resolverse dentro de un sistema puede resolverse en uno más fuerte.

Otros trabajos relacionados con la computación establecieron que ningún procedimiento único y siempre correcto puede decidir todos los casos de una determinada tarea sin restricciones, por ejemplo, si programas arbitrarios se detienen.

Estos resultados no significan que todas las demostraciones fallen o que no pueda conocerse nada. Muchas preguntas pueden seguir respondiéndose rigurosamente. El nuevo logro fue demostrar por qué algunas promesas universales eran imposibles, manteniendo claras las condiciones de esa conclusión.

Las condiciones de un resultado matemático importan. Un límite para cierto sistema poderoso no se aplica automáticamente de la misma manera a todos los sistemas más sencillos. Y demostrar que un método universal no puede funcionar no impide que métodos útiles resuelvan problemas más restringidos. Un límite resulta informativo cuando decimos qué limita.

Piensa en ello

¿Un límite de un método universal vuelve poco fiable cada demostración individual?

Razonamiento

No. Una demostración concreta puede seguir correctamente sus reglas. El límite concierne al alcance del método completo, no a un error introducido en cada argumento.

Hacer medible la sensación: psicofísica y cronometría mental

No puedes ver directamente la sensación de otra persona. Pero puedes controlar un estímulo y observar una respuesta, por ejemplo, si la persona nota una diferencia.

Los científicos estudiaron cómo los cambios perceptibles dependen del nivel inicial de un estímulo. También compararon cuánto tardaban distintas tareas de respuesta.

Una diferencia medida sigue necesitando interpretación. Si una tarea de elección tarda más, el tiempo adicional puede reflejar la propia elección, cambios en la preparación o varios procesos juntos. Restar los tiempos no revela automáticamente qué explicación es correcta.

El nuevo enfoque abrió partes de la actividad mental a la investigación cuantitativa. Su fuerza procedía de conectar mediciones públicas con supuestos claramente declarados, en lugar de fingir que cada número era una lectura directa de la experiencia privada de alguien.

Notar una diferencia y medir la intensidad con que se percibe una sensación también son tareas distintas. Fechner las conectó mediante un supuesto adicional

sobre pasos iguales de sensación. Un cálculo puede mostrar qué se sigue de ese supuesto, mientras los científicos siguen preguntándose si el supuesto es adecuado.

Piensa en ello

Si dos tiempos medidos difieren, ¿sabemos de inmediato por qué?

Razonamiento

No. Pueden haber cambiado varias partes de las tareas. Se necesita un modelo de esas partes antes de atribuir la diferencia a una operación mental.

Recordar se convierte en reconstruir

Recordar puede conservar información real y a la vez cambiar cómo se organiza. No siempre es como volver a reproducir una película.

Ebbinghaus mostró que algo difícil de recordar podía seguir siendo más fácil de aprender de nuevo. Bartlett estudió cómo se organizaba el material con significado al recordar. Experimentos posteriores mostraron que la formulación de las preguntas y las asociaciones entre palabras podían afectar a lo que se informaba.

Eso no significa que todos los recuerdos sean erróneos. La información exacta y los errores pueden aparecer juntos. Omitir un detalle, cambiarlo y añadir algo que no estaba también pueden implicar procesos diferentes.

El cambio importante consistió en estudiar tanto lo que perdura como la formación de un recuerdo presente. La confianza por sí sola no resuelve la exactitud, y un resultado de laboratorio no decide si el relato de una persona concreta es verdadero o falso.

Un buen experimento necesita un registro fiable de lo que se presentó. Sin esa referencia, dos recuerdos diferentes no muestran por sí solos cuál cambió. Los investigadores pueden controlar el material original y

las preguntas posteriores y después comparar los informes. Esto ayuda a convertir una idea amplia sobre la memoria en una pregunta comprobable.

Piensa en ello

¿Omitir un detalle es necesariamente el mismo proceso que añadir un detalle ausente?

Razonamiento

No. Las discrepancias son diferentes. Una explicación debe investigarlas, en lugar de dar a todos los cambios el mismo nombre y detenerse ahí.

El cerebro adulto se convierte en un sistema cambiante

Un cerebro adulto puede cambiar, pero «cambiar» puede significar varias cosas. Una respuesta puede volverse más fuerte o una región puede responder de otro modo a la información sensorial. Eso no significa automáticamente que se hayan creado neuronas nuevas.

Los experimentos ayudaron a distinguir estas posibilidades. Los investigadores midieron cambios duraderos en las respuestas neuronales y cambios en la forma de cartografiar las respuestas sensoriales. Importaba la medición exacta: una señal mayor no era una medición directa de más conocimiento.

La plasticidad es el nombre de una familia de cambios, no una promesa de mejora ilimitada. Algunos cambios pueden no durar o no ayudar.

Las preguntas importantes son precisas: ¿qué cambió, qué lo produjo, cuánto duró y qué diferencia supuso? Un cerebro puede mantener una organización estable y seguir siendo afectado por su historia.

Un mapa de respuestas muestra cómo responden las localizaciones del sistema nervioso bajo condiciones concretas. Si las respuestas cambian, el mapa puede cambiar sin que el tejido cerebral se deslice físicamente

a un lugar nuevo. Las mediciones funcionales y las anatómicas abordan preguntas conectadas pero distintas, por lo que unas no deben sustituir silenciosamente a las otras.

Piensa en ello

¿Una respuesta neuronal registrada más fuerte significa directamente más conocimiento?

Razonamiento

No. Es un cambio en la respuesta medida. Conectar ese cambio con el aprendizaje o con un recuerdo concreto requiere más evidencia.

Notas para adultos

Movimiento sin un motor continuo

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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://jamesrmeyer.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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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

- [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>