

Traducción Luciano García



EL PAPEL DE LOS MODELOS EN LA CIENCIA

La intención y el resultado de una investigación científica es obtener una comprensión y un control de alguna parte del universo. Este enunciado implica una actitud dualista de parte de los científicos. En verdad, la ciencia procede y debe proceder desde esta base dualística. Pero aunque el científico se comporte dualísticamente, su dualismo es operacional y no implica necesariamente una estricta metafísica dualista.

Ninguna parte sustancial del universo es tan simple que pueda ser captada y controlada sin abstracción. La abstracción consiste en remplazar la parte del universo bajo consideración por un modelo de estructura similar pero más simple. Los modelos, formales o intelectuales por una parte, o materiales por otra, son así una necesidad central del procedimiento científico. El propósito de este artículo es analizar la utilidad y las limitaciones de las diversas formas de modelos científicos.

Un investigador no está a menudo familiarizado con su proceder metodológico ni tampoco es indispensable que tenga esta familiaridad. Contribuciones científicas importantes, especialmente de un carácter experimental, pueden hacerse aunque el experimentador no se de cuenta de que todos los buenos experimentos son buenas abstracciones.

Un experimento es una pregunta. Una respuesta precisa se obtiene raras veces si la pregunta no es precisa; en verdad, respuestas tontas —i.e., resultados experimentales inconsistentes, discrepantes o irrelevantes— son a menudo indicativas de una pregunta tonta.

No todas las preguntas científicas son directamente sometibles a experimento. Existe una jerarquía de preguntas cuyos niveles son determinados por la generalidad de las respuestas buscadas. De este modo, la pregunta de por qué una cierta droga, por ejemplo, la cebadina, resulta en una cierta manifestación de un impulso nervioso, por ejemplo, el potencial de espiga, pertenece a un nivel relativamente bajo en la jerarquía de las preguntas fisiológicas, ya que trata de un fenómeno estrictamente restringido. Un experimentador podría formular y contestar la pregunta de modo preciso y, sin embargo, tener sólo una vaga apreciación intuitiva de su "altura" e implicaciones más generales y abstractas, tales como la acción de todas las drogas que pertenecen a un cierto grupo químico sobre el potencial de espiga o las relaciones entre la amplitud del potencial de espiga y otras manifestaciones de la actividad nerviosa.

Como regla, las preguntas de orden "alto", muy abstractas y gene-

70 rales, no son directamente sometibles a un test experimental. Las mismas tienen que ser divididas en términos más específicos, términos directamente traducibles en el procedimiento experimental. Existen así dos operaciones cualitativamente diferentes involucradas en el proceso de formulación del test de un enunciado general, o en el proceso converso de construir una teoría a partir de datos experimentales. Una de estas operaciones consiste en moverse hacia arriba o hacia abajo en la escala de la abstracción; la otra requiere la traducción de la abstracción en el experimento, o viceversa. El buen experimentador tiene una habilidad poco común en el segundo procedimiento; él es capaz de intercambiar libremente símbolos y sucesos: El teórico, por otra parte, trata principalmente con el primer tipo de operaciones, a varios niveles dentro del campo de la abstracción.

Podría parecer que el método más expedito de aproximación a un problema científico sería formular la pregunta o preguntas más generales posibles, y entonces subdividir estas preguntas en enunciados menos abstractos hasta que sean alcanzadas abstracciones de primer orden directamente verificables. Este método es aplicable sólo excepcionalmente porque las preguntas muy abstractas pueden ser sólo enmarcadas después que se han coleccionado los datos y que las implicaciones inmediatas de estos datos han sido captadas. Los problemas son por eso comúnmente aproximados en la dirección opuesta, de lo factual a lo abstracto. Una sagacidad intuitiva para lo que resultará ser la pregunta general importante da una base para seleccionar algunos de los experimentos significantes entre el número indefinido de experimentos triviales que pueden ser llevados a cabo en esta etapa. Generalizaciones del todo vagas y tácitas influyen de esta manera en la selección de los datos al comienzo. Los datos entonces llevan a generalizaciones más precisas, que a su vez sugieren otros experimentos y se progresa así por excursiones sucesivas desde los datos a las abstracciones y viceversa.

Después de estas consideraciones generales podemos proceder al análisis de algunos modelos científicos. Una distinción ha sido hecha ya entre modelos materiales y formales o intelectuales. Un modelo material es la representación de un sistema complejo por un sistema que se asume más simple y que también se asume que tiene algunas propiedades similares a aquellas seleccionadas para su estudio en el sistema complejo original. Un modelo formal es una aserción simbólica en términos lógicos de una situación idea-

lizada relativamente simple que comparte las propiedades estructurales del sistema factual original.

Los modelos materiales son útiles en los siguientes casos:

1. Ellos pueden ayudar al científico en el remplazamiento de un fenómeno en un campo no familiar por un fenómeno en un campo que le sea más familiar. De este modo los modelos materiales tienen importantes ventajas didácticas. La historia del desarrollo de la ingeniería ilustra este modo de utilidad. Durante los siglos XVIII y XIX los triunfos de la dinámica newtoneana dominaron tanto la física que los problemas eléctricos fueron frecuentemente aproximados por la vía de los modelos mecánicos. Después de la obra de Faraday y Maxwell, y con el crecimiento de las industrias eléctricas en gran escala, el desarrollo del conocimiento eléctrico dejó atrás significativamente el de la mecánica. A través de este siglo, los modelos eléctricos han sido utilizados para resolver problemas mecánicos.

2. Un modelo material posibilitaría el llevar a cabo experimentos bajo condiciones más favorables de las que serían asequibles en el sistema original. Esta traducción presume que existen fundamentos razonables para suponer una similaridad entre las dos situaciones; de este modo presupone la posesión de un modelo formal adecuado, con una estructura similar a la de los dos sistemas materiales. El modelo formal no necesita ser del todo comprendido; el modelo material sirve entonces de suplemento al modelo formal.

Algunas veces la relación entre el modelo material y el sistema original puede no ser más que un cambio de escala, en el espacio o en el tiempo. Como un ejemplo de cambio en una escala espacial en cualquier campo de prueba, los experimentos con cápsulas no se llevarán a cabo con calibres pesados grandes y costosos, sino con calibres manejables baratos y pequeños; otro ejemplo es el uso de pequeños animales en vez de grandes para los experimentos biológicos: ciertamente cualquier fisiologista trabaja tanto como le sea posible con un delfín más que con una ballena de asiento sulfuroso. Como ejemplo de transformación de la escala temporal puede mencionarse el empleo de drosófilas en el estudio de problemas genéticos y de población, en vista de su rápida tasa de multiplicación.

Otro ejemplo de una transformación que facilita el procedimiento experimental es el uso de modelos plásticos transparentes con adecuadas propiedades elásticas para el estudio de las tensiones en las estructuras de acero. La transparencia permite el uso de la luz polarizada para hacer a las tensiones internas directamente observables.

72 Mientras los modelos materiales pueden rendir de este modo servicios importantes debe ser enfatizado que no todos los modelos materiales son útiles. Es probable que los criterios 1 y 2 discutidos arriba no son sólo condiciones suficientes sino también necesarias para un modelo material útil. Si el modelo formal que sugiere un modelo material es débil y trivial, el último puede ser irrelevante y estéril —i.e., una analogía tosca no es científicamente fructuosa. Además, si un modelo material no sugiere experimentos cuyos resultados no hayan podido ser fácilmente anticipados sobre la base del modelo formal solo, entonces el modelo material es superfluo. Finalmente, si un modelo tiene una estructura más elaborada y es menos fácilmente sometible a experimentos que el sistema original, entonces no representa un progreso. Para ejemplificar, la larga serie de modelos del éter en términos de sólidos elásticos y giroscopios que fueron la moda entre los físicos durante la última veintena del siglo **xix**, han demostrado ser estériles y en verdad despistados, dado que apartaron la atención de los científicos de los aspectos esenciales del problema involucrado. Como Faraday y Herz habían visto ya, la necesidad importante en el conocimiento eléctrico era una buena teoría del campo libre de los sostenes operacionalmente sin sentido de las analogías materiales elaboradas. Como otro ejemplo de una analogía aparentemente inútil, puede mencionarse el modelo de alambre de ácido nítrico-hierro de Lillie para las fibras nerviosas. Aunque se le da importancia muy prominente en la mayoría de los manuales sobre la materia, no es más fácil experimentar con alambre de hierro sumergido en ácido nítrico que con las fibras nerviosas y no hay dificultad matemática particular en la formulación de los problemas involucrados. Los fenómenos de los metales pasivos no se comprenden mejor que los de los nervios y envuelven el mismo número de conjeturas físicas; desde este punto de vista si no fuera porque la analogía es probablemente sólo tosca, el modelo útil en el par sería el axon nervioso en vez del alambre.

Como una introducción al análisis de los modelos teóricos es apropiado definir lo que se entenderá por un problema de "caja cerrada", por oposición a un problema de "caja abierta." Existen ciertos problemas en la ciencia en los que un número finito fijo de variables de entrada determina un número finito fijo de variables de salida. En éstos el problema se determina cuando las relaciones entre los conjuntos finitos de variables son conocidos. Es posible obtener la misma salida para la misma entrada con diferentes estruc-

turas físicas. Si algunas estructuras alternativas de este tipo fuesen encerradas en cajas cuya única aproximación sería a través de los terminales de entrada y de salida, sería imposible distinguir entre estas alternativas sin recurrir a nuevas entradas o salidas, o ambas. Por ejemplo, una impedancia eléctrica dada como una función de frecuencia puede ser realizada con muchas combinaciones diferentes de resistencias, capacitancias o inductancias. En tanto que las cajas cerradas que contienen tales elementos son sólo expuestas en test para las impedancias auto y mutuas a través de los terminales, su estructura interna precisa no puede ser determinada. Para determinar la estructura tendrían que ser usadas terminales adicionales. Mientras más terminales sean aséquibles, más abierto es el sistema. Un sistema totalmente abierto necesitaría un número indefinido de terminales.

Es obvio, por eso, que la diferencia entre los problemas de caja abierta y caja cerrada, aunque significativa, es de grado más que de tipo. Todos los problemas científicos comienzan como problemas de caja cerrada, i.e., sólo unas cuantas de las variables significantes se reconocen. El progreso científico consiste en un progresivo abrir de estas cajas. La adición sucesiva de terminales o variables lleva gradualmente a modelos teóricos más elaborados: de aquí a una jerarquía en esos modelos, desde las estructuras teóricas relativamente simples y altamente abstractas a las más complejas y más concretas.

El establecimiento de un modelo simple para una caja cerrada asume que un número de variables están sólo débilmente acopladas con el resto de aquellas que pertenecen al sistema. El triunfo de los experimentos iniciales depende de la validez de esta suposición. En cuanto los modelos sucesivos devienen progresivamente más sofisticados, el número de regiones cerradas puede en verdad y llega comúnmente a incrementarse, porque el proceso puede compararse con la subdivisión de una caja única original en algunos compartimentos cerrados más pequeños. Muchos de estos compartimentos pueden ser deliberadamente dejados cerrados, porque son considerados sólo funcionalmente, pero no estructuralmente importantes.

En una etapa intermedia en el curso de una investigación científica el modelo formal puede ser así un ensamblaje heterogéneo de elementos, algunos tratados en detalle, es decir, específica o estructuralmente y algunos tratados meramente con respecto a su funcionamiento general, o sea, genérica o funcionalmente. Así, en el estudio del sistema nervioso para muchos propósitos las sinápsis

74 pueden considerarse meramente regiones donde los impulsos son demorados, no considerando ninguna pregunta en cuanto al método por el cual esta demora tiene lugar, y no considerando tampoco otras propiedades de la sinápsis tales como el hecho de que son regiones donde los impulsos son demorados, no considerando ninguna pregunta en cuanto al método por el cual esta demora tiene lugar, y no considerando tampoco otras propiedades de la sinápsis tales como el hecho de que son regiones donde la facilitación o la inhibición pueden ocurrir.

Un bello ejemplo de la concretización progresiva de un modelo teórico por la introducción sucesiva de variables adicionales es suministrado por el desarrollo histórico de la teoría del sonido. Comenzó matemáticamente como un sistema de ecuaciones diferenciales lineales parciales en un medio continuo homogéneo. Es modelo simple fue y aún es útil para la representación y la predicción de la transmisión de sonido de moderada intensidad. Para el sonido intenso esta teoría fracasa. Fue remplazada por ecuaciones diferenciales no-lineales basadas en hidrodinámica y termodinámica. En el estudio de ondas de choque se vio que las dimensiones de las regiones de choque son las del paso libre medio de una partícula en un gas. Cualquier teoría que sea satisfactoria en este dominio debe tener en cuenta la naturaleza molecular del gas. Como una primera aproximación el gas puede ser considerado como perfecto: esto es, puede suponerse que consiste de partículas sin fuerzas entre ellas. La siguiente y más precisa teoría, aún no desarrollada, tendrá en cuenta las fuerzas entre las partículas; una teoría aún más madura representará esta fuerza en el espacio de la mecánica cuántica y no en el de la teoría newtoneana.

Hasta ahora esta discusión ha tratado principalmente de la elaboración de modelos teóricos para explicar hechos observados; en otros palabras, de la búsqueda científica de modelos abstractos con una estructura equivalente a la de una experiencia dada. La ciencia se ocupa también del proceso inverso, es decir, el de incorporar una estructura abstracta dentro de una entidad concreta de estructura similar, comúnmente un aparato o máquina con un propósito definido. La aproximación tradicional a tales diseños es empírica y en gran medida accidental, pero la aproximación científica es posible y ha mostrado ya su validez. En este método el aparato se designa primero desde el punto de vista de la caja cerrada, que se obtiene cuando es posible por un proceso de minimización teórica, a menu-

do estadístico. Por ejemplo, si se desea un filtro de onda para separar mensajes telefónicos de ruido, el primer paso es determinar la composición estadística de los mensajes y ruidos llevados por la línea. Dada esta composición existe una característica del filtro que separa mejor mensaje y ruido; i.e., una característica que minimiza los efectos del ruido sobre el mensaje. Para cualquier característica existirán muchas maneras de construir un filtro apropiado. Los requerimientos son de naturaleza de caja abierta, pero los elementos usados en la construcción pueden ser tratados sobre la base de caja cerrada. Otras consideraciones no necesariamente relevantes al problema así enunciado determinarán la selección.

Hemos mostrado que el conocimiento científico consiste en una sucesión de modelos abstractos, con preferencia formales, ocasionalmente materiales en naturaleza. Procederemos ahora a examinar los resultados de llevar la construcción de modelos al límite. Considérense primero los modelos materiales, que comienzan por ser toscas aproximaciones, sustitutos de los hechos reales estudiados. Aproxímese el modelo asintóticamente a la complejidad de la situación original. Tenderá a convertirse idéntica con este sistema original. Como un límite se convertirá en el sistema mismo. Es decir, en un ejemplo específico el mejor modelo material de un gato es otro, o preferiblemente el mismo gato. En otras palabras, si un modelo material realizara por completo su propósito, la situación original podría ser captada en su integridad y un modelo sería innecesario. Lewis Carroll expresó completamente esta noción en un episodio de **Silvia y Bruno**, cuando mostró que el único mapa a escala completamente satisfactorio de un país dado era el país mismo.

La situación es la misma con los modelos teóricos. El modelo formal ideal sería uno que cubriera el universo completo, que concordara con él en complejidad, y que estuviera en una correspondencia biunívoca con él. Quien fuera capaz de elaborar y comprender tal modelo en su integridad encontraría el modelo innecesario, porque podría captar entonces el universo directamente como un todo. Poseería la tercera categoría de conocimiento descrita por pino Este modelo teórico ideal no puede probablemente ser logrado. Los modelos parciales, aun siendo imperfectos, son los únicos medios desarrollados por la ciencia para comprender el universo. Este enunciado no implica una actitud de derrotismo sino el reconocimiento de que el principal instrumento de la ciencia es el pensamiento humano y que el pensamiento humano es finito.