

MODELOS EN CIENCIA¹

Publicado por primera vez el lunes 27 de febrero de 2006; última revisión sustancial el miércoles 2 de abril de 2025.

Entrada Original de *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*²

<<https://plato.stanford.edu/archives/sum2025/entries/models-science/>>

¹ NT: Traducción al español de la entrada “Models in Science” de Roman Frigg y Stephan Hartmann —quienes gentilmente autorizaron su realización y publicación— se basa en la versión archivada (Summer 2025 Edition) de *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*: Frigg, Roman; Hartmann, Stephan, “Models in Science”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2025 Edition), Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/sum2025/entries/models-science/>. En consecuencia, esta traducción puede diferir de la versión vigente de la entrada, que podría haber sido actualizada. La versión actual puede consultarse en: <https://plato.stanford.edu/entries/models-science/>. Salvo por los ajustes estilísticos propios de la traducción, el trabajo presenta una serie de modificaciones, entre ellas las notas a pie de página que comienzan con “NT” (nota del traductor) y las notas introductorias sobre la entrada, la enciclopedia, los autores y el traductor. Asimismo, se realizaron modificaciones en el sistema de referencias y de citas al estilo APA 7.

² Enciclopedia de filosofía del *laboratorio de investigación metafísica (Metaphysical Research Lab)* del departamento de filosofía de la Universidad de Stanford (licencia exclusiva para su publicación en línea). Coeditores principales: Edward N. Zalta (del departamento de filosofía de la Universidad de Stanford) y Uri Nodelman (del departamento de filosofía de la Universidad de Stanford). Editores asociados: Colin Allen (del departamento de filosofía de la Universidad de California/Santa Bárbara), Hannah Kim (del departamento de filosofía de la Universidad de Arizona) y Paul Oppenheimer (del departamento de filosofía de la Universidad de Adelaide). Dirección: Stanford, CA 94305; ISSN: 1095-5054; Contacto: editors@plato.stanford.edu

Por Roman Frigg³ & Stephan Hartmann⁴
Traducción por Nivaldo Lorca Améstica⁵

Los modelos tienen una importancia central en muchos contextos de la investigación científica. Un ejemplo de ello es la centralidad de los modelos en sus respectivos dominios, como los modelos inflacionarios en cosmología, los modelos de circulación general en climatología global, el modelo de doble hélice del ADN, los modelos evolutivos en biología, los modelos basados en agentes en las ciencias sociales y los modelos de equilibrio general de mercados (La sección [Otros recursos de internet](#) al final de esta entrada contiene enlaces a recursos online que discuten estos modelos). Los científicos invierten una cantidad significativa de tiempo en construir, probar, comparar y revisar los modelos; asimismo, las revistas dedican un espacio considerable a interpretar y discutir sus implicaciones.

³ Profesor de filosofía y jefe del departamento de Filosofía, Lógica y Método Científico de la *London School of Economics and Political Science* (LSE), en Londres, UK. Contacto: r.p.frigg@lse.ac.uk; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0812-0907>; sitio web: <https://romanfrigg.org/>

⁴ Profesor y decano de la Facultad de Filosofía, Filosofía de las Ciencias y Estudios de la Religión en la *Ludwig-Maximilians-Universität* y codirector del *Munich Center for Mathematical Philosophy* (MCMP) en Munich, Alemania. Contacto: S.Hartmann@lmu.de; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8676-2177>; sitio web: <https://www.stephanhartmann.org/>

⁵ Profesor de Filosofía y Doctorando en Filosofía de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), en Santiago de Chile, Chile. Contacto: nplorca@uc.cl

Por consiguiente, los modelos han llamado la atención de los filósofos y actualmente hay una gran cantidad de literatura sobre las diversas características del modelamiento científico. Un resultado tangible del compromiso filosófico con los modelos es la proliferación de distintos tipos de modelos reconocidos en la literatura filosófica. Algunas de las nociones usadas para categorizar a los modelos son: *Modelos probatorios, modelos fenomenológicos, modelos computacionales, modelos de desarrollo, modelos explicativos, modelos empobrecidos, modelos de prueba, modelos idealizados, modelos teóricos, modelos a escala, modelos heurísticos, modelos de caricatura, modelos exploratorios, modelos didácticos, modelos de fantasía, modelos mínimos, modelos de juguete, modelos imaginarios, modelos matemáticos, modelos mecánicos, modelos sustitutos, modelos icónicos, modelos formales, modelos análogos y modelos instrumentales*. Mientras que, a primera vista, tal abundancia es abrumadora, ésta puede controlarse al reconocer que dichas nociones conciernen a distintos problemas que surgen en relación con los modelos. Los modelos plantean preguntas relativas a la semántica (¿Cómo, de ser posible, representan los modelos?), la ontología (¿Qué clase de cosas son los modelos?), la epistemología (¿Cómo aprendemos y explicamos mediante los modelos?) y, por supuesto, a otros dominios de la filosofía de las ciencias.

1. [Semántica: Modelos y Representación](#)
2. [Ontología: ¿Qué son los modelos?](#)
 - 2.1 [Objetos físicos](#)
 - 2.2 [Objetos ficticios y objetos abstractos](#)
 - 2.3 [Estructuras teóricas de conjuntos](#)
 - 2.4 [Descripciones y Ecuaciones](#)
3. [Epistemología: las funciones cognitivas de los modelos](#)
 - 3.1 [Aprendiendo sobre los modelos](#)
 - 3.2 [Aprendiendo acerca de los sistemas objetivo](#)
 - 3.3 [Explicaciones con modelos](#)
 - 3.4 [Entendimiento con modelos](#)

[3.5 Otras funciones cognitivas](#)

[4. Modelos y teoría](#)

[4.1 Modelos como subsidiarios de la teoría](#)

[4.2 Los modelos como independientes de la teoría](#)

[5. Modelos y otros debates en filosofía de las ciencias](#)

[5.1 Modelos, realismo y las leyes de la naturaleza](#)

[5.2 Modelos y Reduccionismo](#)

[Bibliografía](#)

[Herramientas académicas](#)

[Otros recursos de internet](#)

[Entradas relacionadas](#)

1. Semántica: Modelos y Representación

Muchos modelos científicos son representacionales: ellos representan una parte o aspecto determinado del mundo, que constituye el sistema objetivo del modelo. [Algunos] ejemplos estándar son el modelo de bolas de billar de un gas, el modelo atómico de Bohr, el modelo Lotka-Volterra de la interacción depredador-presa, el modelo Mundell-Fleming de una economía abierta y el modelo a escala de un puente. Elliott-Graves (2020) discute cómo se individúan los objetivos [del modelo].

Esto plantea la pregunta de qué significa que un modelo represente un sistema objetivo. Este problema es bastante complejo y se desglosa en varios subproblemas. Para un resumen detallado del problema de la representación, véase Nguyen y Frigg (2022) y la entrada de [Representación Científica](#). Llegados a este punto, en lugar de abordar el problema de qué significa que un modelo represente, nos enfocaremos en distintos tipos de representaciones que desempeñan un papel importante en la práctica de la ciencia basada en modelos; a saber: modelos a escala,

modelos analógicos, modelos idealizados, modelos de juguete, modelos mínimos, modelos fenomenológicos, modelos exploratorios y modelos de datos. Estas categorías no son mutuamente excluyentes y un modelo determinado puede pertenecer a varias al mismo tiempo.

Modelos a escala. Algunos modelos son copias de un sistema objetivo en tamaño reducido o en tamaño agrandado (Black, 1962). Un ejemplo típico es el de un pequeño coche de madera que se coloca en un túnel de viento para estudiar las propiedades aerodinámicas de un coche real. La intuición nos dice que un modelo a escala es una réplica realista o una imagen especular veraz del objetivo; por ello, a veces, los modelos a escala se denominan “modelos verdaderos” (Achinstein, 1968, Ch. 7). Sin embargo, no hay tal cosa como un modelo a escala perfectamente fidedigno; la fidelidad siempre está restringida a ciertos aspectos. El modelo de madera a escala del coche ofrece un retrato fidedigno de su forma, pero no de su material. Incluso en los aspectos en los que el modelo es una representación fidedigna, la relación entre las propiedades del modelo y las del objetivo no suele ser directa. Cuando los ingenieros usan, digamos, un modelo a escala 1:100 de un barco para investigar la resistencia que un barco real experimenta al moverse por el agua, ellos no pueden simplemente medir la resistencia del modelo y multiplicarla por la escala. De hecho, la resistencia enfrentada por el modelo no se traduce en la resistencia enfrentada por el barco real de un modo directo (es decir, uno no puede simplemente escalar la resistencia del agua con la escala del modelo: el barco real no tiene, necesariamente, cien veces la resistencia al agua de su modelo 1:100). Las dos magnitudes se encuentran en una complicada relación no lineal la una con la otra, y la forma exacta de dicha relación es, con frecuencia, no trivial y emerge como resultado de un estudio exhaustivo de la situación (Sterrett, 2006, 2020; Pincock, 2022).

Modelos analógicos. [Algunos] ejemplos estándar de modelos analógicos incluyen el modelo de las bolas de billar de un gas, el modelo hidráulico de un sistema económico y el modelo de agujero mudo de un agujero negro. En el sentido más básico, dos cosas son análogas si presentan ciertas similitudes relevantes entre sí. En un texto clásico,

Hesse (1963) distingue distintos tipos de analogías según el tipo de relación de similitud en la que se encuentran los dos objetos. Un tipo simple de analogía es la que se basa en propiedades compartidas. Hay una analogía entre la Tierra y la Luna, basada en el hecho de que ambas son grandes cuerpos, sólidos, opacos y esféricos que reciben calor y luz del Sol, giran alrededor de sus ejes y gravitan hacia otros cuerpos. No obstante, la igualdad de propiedades no es una condición necesaria. Una analogía entre dos objetos también puede basarse en similitudes relevantes entre sus propiedades. En este sentido más libre, podemos decir que hay una analogía entre el sonido y la luz porque el eco [del sonido] es similar a la reflexión [de la luz], el volumen al brillo, el tono al color, la detectabilidad por el oído a la detectabilidad por el ojo, y así sucesivamente.

Las analogías también pueden basarse en la igualdad o semejanza de las relaciones entre las partes de dos sistemas, en lugar de en sus propiedades monádicas. Es en este sentido que la relación de un padre con su hijo se considera análoga a la relación de un estado con sus ciudadanos. Las analogías mencionadas hasta ahora son las que Hesse denomina “analogías materiales”. Para obtener una noción más formal de la analogía, [debemos] abstraer las características concretas del sistema y centrarnos únicamente en su configuración formal. Entonces, lo que el modelo analógico comparte con su objetivo no es un conjunto de características, sino el mismo patrón de relaciones abstractas (*e.g.*, la misma estructura, entendida en sentido formal). Esta noción de analogía está estrechamente relacionada con lo que Hesse denomina “analogía formal”. En este sentido, dos objetos son [formalmente análogos] si ambos son interpretaciones del mismo cálculo formal. Por ejemplo, hay una analogía formal entre un péndulo que se balancea y un circuito eléctrico oscilante, ya que ambos se describen por la misma ecuación matemática.

Otra distinción importante de Hesse es [la que se establece] entre las analogías positivas, negativas y neutras. La analogía positiva entre dos objetos consiste en las propiedades o relaciones que comparten (las

moléculas de gas y las bolas de billar tienen masa); la analogía negativa consiste en las propiedades que no comparten (las bolas de billar están coloreadas, las moléculas de gas no); la analogía neutra comprende las propiedades que no sabemos (aún) si pertenecen a la analogía negativa o positiva (¿las bolas de billar y las moléculas tienen la misma sección eficaz en los procesos de dispersión?). Las analogías neutras desempeñan un papel importante en la investigación científica porque fomentan las preguntas y sugieren nuevas hipótesis. Por esta razón, muchos autores han enfatizado el rol heurístico que las analogías desempeñan en la construcción de teorías y modelos, así como en el pensamiento creativo (Bailer-Jones y Bailer-Jones, 2002; Bailer-Jones, 2009, Ch. 3; Hesse, 1974; Holyoak y Thagard, 1995; Kroes, 1989; Psillos, 1995; y los ensayos recopilados en Helman, 1988). Véase también la entrada sobre [analogía y razonamiento analógico](#).

También se ha discutido si el uso de modelos analógicos puede, en algunos casos, ser confirmatorio en un sentido bayesiano. Hesse (1974, pp. 208-219) argumenta que esto es posible si la analogía es material. [En cambio,] Bartha (2010, 2013, [2019]) discrepa y argumenta que los modelos analógicos no pueden ser confirmatorios en un sentido bayesiano, ya que la información encapsulada en un modelo analógico es parte de los conocimientos previos relevantes; por consiguiente, la probabilidad posterior de una hipótesis respecto de un sistema objetivo no puede cambiar como resultado de lo observado en la analogía. Por tanto, los modelos analógicos sólo pueden establecer la *plausibilidad* de una conclusión, en el sentido de justificar una asignación de probabilidad previa no despreciable (Bartha, 2010, §8.5).

Más recientemente, estas preguntas han sido discutidas en el contexto de los denominados experimentos análogos, que prometen promover el conocimiento sobre un sistema objetivo experimentalmente inaccesible (*e.g.*, un agujero negro) mediante la manipulación de otro sistema, el sistema fuente (*e.g.*, un condensado Bose-Einstein). Dardashti, Thébault y Winsberg (2017) y Dardashti, Hartmann *et al.* (2019) han argumentado que, dadas ciertas condiciones, una simulación análoga de

un sistema mediante otro sistema puede confirmar afirmaciones sobre el sistema objetivo (e.g., que los agujeros negros emiten radiación de Hawking). Véase Crowther *et al.* (2021) para una discusión crítica, así como la entrada de [Simulaciones computacionales en ciencia](#).

Modelos idealizados. Los modelos idealizados son aquellos que implican una deliberada simplificación o distorsión de algún [aspecto] complejo, con el objetivo de hacerlo más manejable o entendible. Planos sin fricción, masas puntuales, sistemas completamente aislados, agentes omniscientes totalmente racionales y mercados en completo equilibrio son ejemplos bien conocidos. Las idealizaciones son medios cruciales para que la ciencia enfrente sistemas muy difíciles de estudiar en toda su complejidad (Potochnik, 2017).

Los debates filosóficos acerca de la idealización se han centrado en dos tipos generales de idealización: las denominadas idealizaciones aristotélicas y galileanas. Las idealizaciones aristotélicas equivalen a “despojar”, en nuestra imaginación, todas las propiedades de un objeto concreto que creemos que no son relevantes para el problema en cuestión. Hay un desacuerdo sobre cómo hacer esto. Jones (2005) y Godfrey-Smith (2009) ofrecen un análisis de la abstracción en términos de verdad: a pesar de que una abstracción permanece en silencio sobre ciertas características o aspectos del sistema, aun así, no dice nada falso y ofrece una descripción verdadera, aunque restringida. Esto permite que los científicos se enfoquen en un conjunto limitado de propiedades aisladas. Un ejemplo es un modelo mecánico clásico del sistema planetario que describe la posición de un objeto como función del tiempo e ignora todas las demás propiedades de los planetas. Cartwright (1989, Ch. 5), Musgrave (1981) – que usa el término “supuestos insignificantes” – y Mäki (1994) – que habla de “método de aislamiento” – permiten que las abstracciones presenten falsedades, por ejemplo, al descuidar un factor causalmente relevante.

[Por otro lado,] las idealizaciones galileanas son aquellas que implican distorsiones deliberadas: los físicos construyen modelos de masas puntuales que se mueven en planos sin fricción; los economistas

asumen que los agentes son omniscientes; los biólogos estudian poblaciones aisladas; y así sucesivamente. El uso de simplificaciones de este tipo, siempre que una situación resultaba muy difícil de abordar, era característico de la aproximación de Galileo a las ciencias. Por esta razón, es común referirse a las idealizaciones “distorsionantes” de esta clase como “idealizaciones galileanas” (McMullin, 1985). Un ejemplo de estas idealizaciones es un modelo de movimiento en una pista de hielo que asume que el hielo no tiene fricción, cuando, en realidad, tiene un [coeficiente] de fricción muy bajo, pero no [igual a] cero.

A veces, las idealizaciones galileanas se caracterizan como idealizaciones controladas; es decir, como aquellas que permiten la deidealización mediante la sucesiva eliminación de las suposiciones distorsionadas (McMullin, 1985; Weisberg, 2007). Interpretadas de este modo, las idealizaciones galileanas no abarcan todos [los casos de] idealizaciones distorsionantes. Batterman (2002, 2011) y Rice (2019, 2021) discuten idealizaciones distorsionantes que no pueden eliminarse en tanto no pueden ser removidas del modelo sin desmantelarlo por completo.

¿Qué nos dice un modelo —que involucra distorsiones— acerca de la realidad? Laymon (1991) formuló una teoría que entiende las idealizaciones como límites ideales: imagínese una serie de ajustes de situación real que se aproxima al límite postulado; entonces, se requiere que, mientras más se acercan las propiedades del sistema al límite ideal, más se acerca su comportamiento al comportamiento del sistema en el límite (monotonidad). Si este es el caso, los científicos pueden estudiar el sistema en el límite y trasladar sus conclusiones de este a sistemas alejados del límite. Sin embargo, estas condiciones no siempre son necesarias. De hecho, puede ocurrir que el sistema limitante no se aproxime al sistema en el límite. Si esto ocurre, nos enfrentamos a un límite singular (Berry, 2002). En tales casos, el sistema en el límite puede exhibir ciertos comportamientos que difieren de los comportamientos de los sistemas alejados del límite. Los límites de esta clase se presentan en una variedad de contextos, más notablemente en la teoría de transiciones

de fase de la mecánica estadística. No obstante, no existe un acuerdo sobre [cuál es] la interpretación correcta de dichos límites. Batterman (2002, 2011) los considera indicativos de fenómenos emergentes, mientras que Butterfield (2011a, b) los ve como compatibles con la reducción (véanse también las entradas acerca de [Relaciones interteóricas en física](#) y [Reducción científica](#)).

Las idealizaciones galileanas y aristotélicas no son mutuamente excluyentes; muchos modelos exhiben ambos [tipos] en tanto tienen en consideración un conjunto reducido de propiedades que distorsionan. Considérese nuevamente el modelo mecánico clásico del sistema planetario: el modelo sólo contempla un conjunto reducido de propiedades y las distorsiona, por ejemplo, al describir los planetas como esferas ideales con una distribución de masa rotacional simétrica.

Un concepto estrechamente relacionado con la idealización es la aproximación. En un sentido amplio, A puede llamarse una aproximación de B si A es, de algún modo, próxima a B . No obstante, esto es demasiado amplio, pues permite calificar cualquier semejanza como una aproximación. Rueger y Sharp (1998) limitan las aproximaciones a la proximidad cuantitativa y Portides (2007) plantea la noción de aproximación como un concepto esencialmente matemático. Bajo esta noción, A es una aproximación de B si y sólo si A es próximo a B en un sentido matemático especificable, donde el sentido relevante de “próximo” está dado por el contexto. Un ejemplo es la aproximación de una curva a otra mediante la expansión de una función en series de potencias, manteniendo sólo los primeros dos o tres términos. En distintas situaciones, aproximamos una ecuación a otra al permitir que un parámetro de control tienda a cero (Redhead, 1980). Esto plantea la pregunta de cómo las aproximaciones difieren de las idealizaciones, que también pueden implicar una proximidad matemática. Norton (2012) establece la distinción entre ambas como referencial: una aproximación es una descripción inexacta del [sistema] objetivo, mientras que una idealización introduce un sistema secundario (real o ficticio) que ocupa el lugar del sistema objetivo (siendo distinto de este). Si decimos que el

periodo del péndulo en la pared es más o menos dos segundos, entonces es una aproximación; si razonamos acerca del péndulo real, asumiendo que la bola del péndulo es una masa puntual y que su cuerda no tiene masa (i.e., si asumimos que el péndulo es, digamos, un péndulo ideal), entonces usamos una idealización. Separar las idealizaciones y las aproximaciones de este modo no implica que no pueda haber relaciones interesantes entre ambas. Por ejemplo, una aproximación puede justificarse al señalar que es una expresión matemática de una idealización aceptable (e.g., cuando ignoramos un término disipativo en una ecuación de movimiento porque suponemos, de modo idealizado, que el sistema no tiene fricción).

Los modelos idealizados también desafían la filosofía bayesiana de las ciencias. ¿Cómo puede un agente tener un grado positivo de creencia en un modelo fuertemente idealizado? Esta es una pregunta apremiante porque los modelos idealizados son ubicuos en ciencias y son ampliamente usados en estadística (bayesiana). Para una discusión sobre las distintas respuestas, véase Sprenger y Hartmann (2019, Ch. 12).

Modelos de juguete. Los modelos de juguete son representaciones extremadamente simplificadas y fuertemente distorsionadas de sus objetivos; comúnmente sólo representan un pequeño número de factores causales y explicativos (Hartmann, 1995; Reutlinger *et al.*, 2018; Nguyen, 2020). [Algunos] ejemplos típicos son el modelo de Lotka-Volterra en ecología de poblaciones (Weisberg, 2013) y el modelo de Schelling de segregación en ciencias sociales (Sugden, 2000). Usualmente, los modelos de juguete no se desempeñan muy bien en términos de predicción y de adecuación empírica, pues parecen servir a otros propósitos epistémicos (más acerca de estos [propósitos] en la [Sección 3](#)). Esto plantea la pregunta de si deben considerarse representaciones en primer lugar (Luczak, 2017).

Algunos modelos de juguetes se caracterizan como “caricaturas” (Gibbard y Varian, 1978; Batterman y Rice, 2014). Los modelos de caricatura aíslan un pequeño número de características sobresalientes de un sistema y las distorsionan [hasta convertirlas] en un caso extremo. Un

ejemplo clásico es el modelo de Akerlof (1970) del mercado de autos (“el mercado de limones”), que explica la diferencia de precio entre autos nuevos y usados únicamente en términos de información asimétrica; de este modo, se hace caso omiso de todos los otros factores que pueden influir en el precio de los autos (véase también Sugden, 2000). Sin embargo, es controvertido si dichos modelos altamente idealizados todavía pueden considerarse representaciones informativas de sus sistemas objetivos. Para una discusión sobre los modelos de caricatura, en particular en economía, véase Reiss (2006).

Modelos mínimos. Los modelos mínimos están estrechamente relacionados con los modelos de juguete, en tanto que estos también son altamente simplificados. Es tal su simplificación que algunos argumentan que no son representacionales, [pues] carecen de cualquier similitud, isomorfismo o relación de semejanza con el mundo (Batterman y Rice, 2014). Se ha argumentado que muchos modelos económicos pertenecen a esta clase (Grüne-Yanoff, 2009). Los modelos mínimos de economía tampoco están restringidos por las leyes naturales ni aíslan ningún factor real (*Ibid.*). A pesar de esto, el estudio de los modelos mínimos puede ayudarnos a aprender algo sobre el mundo. Sin embargo, es controvertido si los modelos mínimos pueden ayudar a los científicos a aprender algo sobre el mundo si no representan nada (Fumagalli, 2016). Los modelos mínimos, que supuestamente carecen de similitud o representación, también se usan en distintas partes de la física para explicar los comportamientos a escala macro de varios sistemas cuyos comportamientos a escala micro son extremadamente diversos (Batterman y Rice, 2014; Rice, 2018, 2019; Shech, 2018). [Algunos] ejemplos típicos incluyen las características de las transiciones de fase y del flujo de fluidos. Defensores de los modelos mínimos argumentan que aquello que proporciona una explicación del comportamiento a escala macro de un sistema, en estos casos, no es una característica que el sistema y el modelo tengan en común, sino el hecho de que el sistema y el modelo pertenecen a la misma *clase universal* (una clase de modelos que exhiben el mismo comportamiento límite, aunque muestren comportamientos

muy distintos en escalas finitas). No obstante, es controversial si las explicaciones de este tipo son posibles sin hacer referencia a al menos alguna característica en común (Lange, 2015; Reutlinger, 2017).

Modelos subrogantes. Los modelos subrogantes se utilizan en las ciencias para estudiar sistemas [que resultan] difíciles o imposibles de investigar directamente. Estos modelos actúan como sustitutos de sus sistemas objetivos, permitiendo que los investigadores infieran sobre el objetivo a partir del comportamiento del subrogante. Un ejemplo clásico es el uso de organismos modelo en biología, tales como el *Drosophila melanogaster* (mosca de la fruta) o el *Mus musculus* (ratón) que sirven como *intermediarios* (*proxies*) para estudiar procesos biológicos en humanos. La elección de un modelo subrogante implica cuidadosas consideraciones sobre su adecuación representacional y la extensión a la que los hallazgos pueden generalizarse al sistema objetivo (Bolker, 2009; Burian, 1993). Los filósofos han debatido [acerca de] los desafíos epistemológicos de usar modelos subrogantes, en particular cuando el sistema subrogante y el objetivo difieren significativamente, como en el caso de los organismos modelo que a menudo presentan mecanismos subyacentes o historias evolutivas distintas de sus objetivos (Dietrich *et al.*, 2020; Ankeny & Leonelli, 2020). Para una discusión sobre los organismos modelo, véase la entrada de [Experimentos en biología](#).

Modelos fenomenológicos. Los modelos fenomenológicos han sido definidos de diferentes – aunque relacionadas – maneras. Una definición común los considera como modelos que sólo representan propiedades observables de sus objetivos y se abstienen de postular mecanismos ocultos y similares (Bokulich, 2011). Otra aproximación, propuesta por McMullin (1968), define los modelos fenomenológicos como independientes de las teorías. Esto, no obstante, parece ser [una afirmación] demasiado fuerte. Muchos modelos fenomenológicos, a pesar de no ser derivables de una teoría, incorporan principios y leyes asociados a las teorías. El modelo de la gota líquida del núcleo atómico, por ejemplo, retrata al núcleo como una gota líquida y lo describe como poseyendo muchas propiedades (como la tensión de superficie y la carga,

entre otras) que se derivan de distintas teorías (como la hidrodinámica y la electrodinámica, respectivamente). Ciertos aspectos de estas teorías – aunque usualmente no toda la teoría – se utilizan para determinar tanto las propiedades estáticas como las dinámicas del núcleo. Finalmente, resulta tentador identificar los modelos fenomenológicos con *los modelos de un fenómeno*. Aquí, “fenómeno” es un término paraguas que abarca todas las características relativamente estables y generales del mundo que resultan interesantes desde un punto de vista científico. El debilitamiento de un sonido como función de la distancia a la fuente, el decaimiento de las partículas alfa, el crecimiento de una población de conejos y la dependencia del precio de una casa en función de la tasa de referencia de la Reserva Federal son fenómenos en este sentido. Para una discusión más exhaustiva, véase Bailer-Jones (2009, Ch. 7), Bogen y Woodward (1988) y la entrada de [Teoría y observación en ciencias](#).

Modelos exploratorios. Los modelos exploratorios son modelos que no son propuestos, en primer lugar, para aprender algo acerca de un sistema objetivo específico o de un fenómeno particular establecido experimentalmente. Los modelos exploratorios funcionan como puntos de partida para futuras exploraciones, en las que se modifica y se refina el modelo. Gelfert (2016) señala que los modelos exploratorios nos pueden ofrecer de *pruebas-de-principio* y sugerir explicaciones *cómo-posiblemente* (2016, Ch. 4). Gelfert menciona los primeros modelos en ecología teórica a modo de ejemplo, tales como el modelo de Lotka-Volterra de la interacción depredador-presa que imita el comportamiento cualitativo de aceleración y desaceleración del crecimiento poblacional en un bioma con recursos limitados (2016, p. 80). Tales modelos no nos proporcionan una caracterización precisa del comportamiento de una población real, sino que nos ofrecen un punto de partida para el desarrollo de modelos más realistas. Fisher (2009) considera estos modelos como herramientas para examinar las características de una teoría determinada. Massimi (2019) señala que los modelos exploratorios proporcionan conocimiento modal. Sjölin Wirlin y Grüne-Yanoff (2021)

presentan una inspección de los distintos tipos de conocimiento modal que se reporta que los modelos proporcionan.

Modelos de datos. Un modelo de datos es una versión corregida, rectificadora, regimentada y muchas veces idealizada de los datos que obtenemos de la observación inmediata, los denominados datos brutos (Suppes, 1962), Característicamente, uno primero elimina los errores (*e.g.*, se remueven los puntos del registro que son culpa de una observación defectuosa) y entonces se presentan los datos de forma “limpia”; por ejemplo, al dibujar una curva lisa a través de un conjunto de puntos. Estos dos pasos suelen denominarse “reducción de datos” y “ajustes de curvas”. Cuando investigamos, por ejemplo, la trayectoria de un planeta determinado, primero eliminamos los puntos erróneos de los registros observacionales y luego los puntos restantes se ajustan a una curva lisa. Los modelos de datos juegan un rol crucial en la confirmación de teorías, ya que estas se someten a prueba frente a los modelos de datos y no contra los datos brutos, comúnmente desordenados y complejos.

La construcción de un modelo de datos puede resultar extremadamente compleja. Se requieren técnicas estadísticas sofisticadas y se plantean serias preguntas tanto metodológicas como filosóficas. ¿Cómo decidimos qué puntos del registro deben eliminarse? Y, dado un conjunto limpio de datos, ¿a qué curva los ajustamos? La primera pregunta ha sido abordada principalmente en el contexto de la filosofía de la experimentación (véase, por ejemplo, Galison, 1997 y Staley, 2004). En el núcleo de la última pregunta yace el denominado problema del ajuste de curvas: los datos [por sí] mismos no indican ni la forma de la curva ajustada ni las técnicas estadísticas que los científicos deben usar para construirla. La elección y racionalización de las técnicas estadísticas son materia de la filosofía de la estadística, y referimos al lector a la entrada de [Filosofía de la estadística](#), así como a Bandyopadhyay y Forster (2011) y Otsuka (2023) para una discusión sobre estos temas. Una discusión más exhaustiva sobre los modelos de datos puede encontrarse en Bailer-Jones (2009, Ch. 7), Brewer y Chinn (1994), Harris (2003), Hartmann (1995), Laymon (1982), Mayo (1996, 2018) y Suppes (2007).

La reunión, procesamiento, diseminación, análisis, interpretación y almacenamiento de datos plantean muchas preguntas importantes más allá del tema relativamente reducido de los modelos de datos. Leonelli (2016, 2019) investiga el estatus de los datos en la ciencia, argumentando que estos deben definirse no por su procedencia, sino por su función evidencial, y estudia cómo los datos viajan entre distintos contextos.

2. Ontología: ¿Qué son los modelos?

¿Qué son los modelos? Es decir, ¿con qué tipo de objeto tratan los científicos al trabajar con modelos? Algunos autores han manifestado escepticismo acerca de si esta pregunta tiene una respuesta significativa porque los modelos no pertenecen a una categoría ontológica distintiva y cualquier cosa puede ser un modelo (Callender y Cohen, 2006; Giere, 2010; Suárez, 2024; Swoyer, 1991; Teller, 2001). Contessa (2010) replica que esta conclusión no se sigue. Incluso si, desde un punto de vista ontológico, cualquier cosa puede ser un modelo y la clase de objetos a los que se refieren como modelos contiene una colección heterogénea de distintos objetos, no se sigue que sea imposible o inútil desarrollar una ontología de los modelos. Esto se debe a que, aunque no todos los modelos pertenezcan a una [misma] clase ontológica particular, uno puede, no obstante, preguntar a qué clases ontológicas pertenecen las cosas que, de facto, se usan como modelos. Puede haber una plétora de estas clases y cada una puede analizarse por sí misma. El tipo de objetos que los científicos utilizan como modelos tiene una importante repercusión en cómo estos desempeñan funciones relevantes, tales como la representación y la explicación; por ello, este problema no puede ser descartado como [algo] “meramente sociológico”.

Los objetos que comúnmente sirven como modelos pertenecen, en efecto, a distintas clases ontológicas: objetos físicos, objetos ficticios, objetos abstractos, estructuras teóricas de conjuntos⁶, descripciones,

⁶ NT: La versión original es “*set-theoretical structure*”, pero el adjetivo “*set-theoretical*” presenta ciertos problemas para traducirse al español. En la versión en español de *La*

ecuaciones o combinaciones de estas clases son frecuentemente referidos como modelos y algunos modelos podrían incluso pertenecer a otras clases. Aquellos interesados en la ontología pueden ver esto como un objetivo en sí mismo. Sin embargo, vale la pena señalar que la pregunta tiene reverberaciones más allá de la ontología e influye en cómo uno entiende la semántica y la epistemología de los modelos.

2.1 Objetos físicos

Algunos modelos son objetos físicos. Tales modelos suelen denominarse “modelos materiales”. [Algunos] ejemplos estándar de modelos de este tipo son los modelos a escala de objetos como puentes o barcos (véase [Sección 1](#)), el modelo del ADN de Watson y Crick (Schaffner, 1969), el modelo hidráulico de una economía de Phillips y Newlyn (Morgan y Boumans, 2004), el modelo de la bahía de San Francisco del USACE (Weisberg, 2013), el modelo de plastilina de la mioglobina de Kendrew (Frigg y Nguyen, 2016) y los organismos modelo en ciencias de la vida (Ankeny y Leonelli, 2020; Leonelli, 2010; Levy y Currie, 2015; Sartori, *en prensa*). Todos estos son objetos materiales que sirven como modelos. Los modelos materiales no dan lugar a dificultades ontológicas más allá de los reconocidos problemas relacionados a los objetos con los que tratan los

introducción a la lógica simbólica de Patrick Suppes, traducida por Gabriel Aguirre (Suppes, P., 1966 [1957], *Introducción a la lógica simbólica*. Compañía Editorial Central S.A.). Aguirre señala que “*set-theoretical*” es un adjetivo que sólo puede traducirse perifrásticamente como “*relativo a la teoría de conjuntos*”, por lo que no existe un equivalente directo en español (Suppes, 1970, p. 287, NT). Apoyo la crítica del traductor, pero no su propuesta de traducir “*set-theoretical*” como “*sinforemático*”, apelando a la raíz griega clásica *συμφόρημα* (*symphorema*), que, según el traductor (*ibid.*, p. 287, NT), se refiere a un compuesto o conjunto. Otras traducciones de este concepto en distintas obras en español no aportan mayor claridad. Las propuestas de traducción varían de “*teórico-conjuntista*” o “*teórico de conjuntos*” a simplemente “*teóricas*” o “*teoréticas*”, omitiendo la parte de “*conjunto*”. Para mantener cierto grado de parsimonia en español, mantengo la traducción “*set-theoretical*” como “*teórico de conjuntos*”.

metafísicos, por ejemplo, respecto de la naturaleza de las propiedades, la identidad de los objetos, las partes y los todos, y así sucesivamente.

Sin embargo, muchos modelos no son modelos materiales. El modelo atómico de Bohr, un péndulo sin fricción o una población aislada, por ejemplo, están más bien en la mente de los científicos que en el laboratorio y no tienen que estar físicamente realizados ni experimentados para servir como modelo. Estos modelos “no físicos” plantean serias preguntas ontológicas, y el debate sobre cómo deben analizarse de manera más adecuada es controversial. En lo que resta de esta sección, reseñamos algunas sugerencias de la literatura reciente sobre modelos que pueden atraer nuestra atención.

2.2 Objetos ficticios y objetos abstractos

Aquello que ha llegado a ser conocido como la *concepción ficticia de los modelos* considera a los modelos como similares a objetos imaginarios en la ficción literaria – es decir, similares a personajes ficticios como Sherlock Holmes o a lugares ficticios como la Tierra Media (Godfrey-Smith, 2007). Así, cuando Bohr introdujo su modelo atómico, él introdujo un objeto ficticio de la misma clase que el objeto introducido por Conan Doyle cuando él inventó a Sherlock Holmes. Esta visión cuadra bien con la práctica científica, donde los científicos comúnmente hablan de los modelos como si estos fuesen objetos y a menudo se consideran a sí mismos [como si] describiesen átomos, poblaciones o economías *imaginarias*. Además, cuadra bien con las concepciones filosóficas que consideran la construcción y manipulación de los modelos como un aspecto esencial de la investigación científica (Morgan, 1999), incluso si los modelos no son objetos materiales, ya que estas prácticas parecen estar dirigidas a *algún* tipo de objeto.

¿Qué preguntas filosóficas resuelve esta movida? El discurso ficcional y las entidades ficticias confrontan preguntas filosóficas reconocidas, y bien uno puede argumentar que la simple comparación de los modelos con las ficciones equivale a explicar *obscurum per obscurius*

(para una discusión acerca de estas preguntas, véase la entrada [Entidades ficticias](#)). Un modo de contrarrestar esta objeción y motivar la concepción ficticia de los modelos es señalar el poder heurístico de esta concepción. En este sentido, Frigg (2010b) identifica cinco problemas específicos que una ontología de modelos tiene que abordar y entonces señala que estos problemas surgen de formas muy similares en la discusión sobre las ficciones ([estos] problemas son las condiciones de identidad, la atribución de propiedades, la semántica de enunciados comparativos, las condiciones de verdad y la epistemología de objetos imaginados). Entonces, la comparación de los modelos con las ficciones tiene un valor heurístico, ya que existe una rica literatura sobre las ficciones que ofrece una variedad de soluciones a estos problemas.

Sólo una pequeña porción de las opciones disponibles en la extensa literatura sobre las ficciones ha sido realmente explorada en el contexto de los modelos científicos. Contessa (2010) formula lo que denomina “aproximación dualista”, según la cual un modelo es un objeto abstracto que suple a un posible objeto concreto. El modelo atómico de Rutherford, por ejemplo, es un objeto abstracto que actúa como suplente de un posible sistema que contiene un electrón orbitando alrededor del núcleo en una órbita bien definida. Barberousse y Ludwig (2009) y Frigg (2010b) toman una ruta distinta y desarrollan una caracterización de los modelos como ficciones, basada en la teoría de la pretensión de la ficción de Walton (1990). De acuerdo con esta caracterización, las oraciones en un pasaje de texto que introducen a un modelo deben considerarse como un *atrezo*⁷ en un juego de simulación de creencias, y el modelo es el

⁷ NT: Original *prop*, puede traducirse como 'pieza de utilería' en español. De acuerdo con el diccionario de Oxford (*s. v.*), un *prop* (abreviatura de *properties*) puede definirse como un objeto de utilería usado en teatro o cine (sus otras definiciones, como objeto de soporte físico o de soporte emocional, no me parecen las más adecuadas para abarcar el sustantivo *prop* en este contexto particular). Dicha definición teatral, como utilería o atrezzo (palabra italiana para la utilería de teatro, aceptada por la RAE), se acerca más al sentido de *prop* en los juegos de simulación de creencia. Asimismo, este es un concepto técnico de la teoría de la pretensión de Walton (1990), en la que un *prop* es un objeto que funciona como

producto de un acto de pretensión. Esta es una posición antirrealista en tanto que toma el hablar de “objetos” modelo como figuras del discurso, porque, en último término, no hay objetos modelo — los modelos sólo viven en la imaginación de los científicos. Salis (2021) reformula esta propuesta para convertirla en lo que denomina “la nueva concepción ficticia de los modelos”. La diferencia central radica en que lo que se considera un modelo son las descripciones del modelo y su contenido, en lugar de las imaginaciones que prescriben. Esta es una concepción realista de los modelos, ya que las descripciones existen.

La concepción ficticia no está exenta de críticas. Giere (2009), Magnani (2012), Pincock (2012), Portides (2014) y Teller (2009) rechazan la aproximación ficticia y argumentan, de distintas maneras, que los modelos no deberían considerarse ficciones. Weisberg (2013) argumenta por una posición intermedia que ve a las ficciones desempeñando un rol heurístico, pero niega que deban considerarse como parte de un modelo científico. El núcleo común de estas críticas [radica en] que la concepción ficticia malinterpreta la posición epistémica de los modelos. Llamar algo una ficción equivale a afirmar que es falso, y es injustificado llamar a todo un modelo una ficción — y, por consiguiente, afirmar que falla en capturar cómo es el mundo — sólo porque el modelo implica ciertas presuposiciones falsas o elementos ficticios. En otras palabras, una representación no cuenta automáticamente como ficción sólo porque presenta algunas imprecisiones. Defensores de la concepción ficticia coinciden con este punto, pero niegan que la noción de ficción deba analizarse en términos de falsedad. Aquello que hace que una obra sea una ficción no es su falsedad (o alguna proporción [entre] afirmaciones falsas y verdaderas): no todo lo que se menciona en una novela es falso (*La guerra y la paz* de Tolstoy contiene muchas afirmaciones verdaderas acerca de las guerras napoleónicas franco-rusa), ni todos los textos que

generador de verdades ficticias en la simulación de creencias (Walton, 1990, p. 37). Opto por traducir '*prop*' como '*atrezo*' para remarcar su sentido técnico en el contexto particular de la teoría de Walton.

contienen afirmaciones falsas califican como ficción (las noticias falsas son sólo eso, no son ficciones). La característica definitoria de una ficción es que se supone que el lector imagina los eventos y personajes descritos, no que sean falsos (Frigg, 2010a; Salkis, 2021).

Giere (1988) defendió la concepción de que los modelos “no físicos” son entidades abstractas. Sin embargo, hay poco consenso sobre la naturaleza de los objetos abstractos y Hale (1988, pp. 86-87) enumera no menos de veinte posibles caracterizaciones distintas (para una revisión de las opciones disponibles, véase la entrada de [Objetos abstractos](#)). En publicaciones recientes, Thomasson (2020) y Thomson-Jones (2020) desarrollan lo que denominan la “concepción artefactualista” de los modelos, basada en la teoría de los artefactos abstractos de Thomasson (1999). Esta concepción concuerda con la teoría de la pretensión en tanto que el contenido del texto que introduce a un personaje ficticio o a un modelo debe entenderse como ocurriendo dentro de la pretensión. Sin embargo, al mismo tiempo, insiste en que los autores, en la producción de tales descripciones, crean artefactos culturales abstractos que, entonces, existen de modo independiente tanto del autor como del lector. El artefactualismo concuerda con el platonismo en tanto que los objetos abstractos existen, pero insiste, en contra del platonismo, en que estos son traídos a la existencia mediante un acto creativo y no son eternos. Esto permite que los artefactualistas preserven las ventajas de la teoría de la pretensión mientras, al mismo tiempo, mantienen una concepción realista que [sostiene que] realmente existen los personajes ficticios y los modelos.

2.3 Estructuras teóricas de conjuntos

Un punto de vista influyente sostiene que los modelos son estructuras teóricas de conjuntos. Esta posición puede rastrearse hasta Suppes (1960) y, actualmente, aunque con algunas variaciones menores, es sostenida por la mayoría de los defensores de la llamada concepción semántica de las teorías; para una discusión acerca de esta concepción, véase la entrada de

[La estructura de teorías científicas](#) y Frigg (2023). Hay diferencias entre las [distintas] versiones de la concepción semántica, pero, con la excepción de Giere (1988), todas las versiones concuerdan en que los modelos son estructuras de algún tipo u otro (Da Costa y French, 2000).

Esta concepción de los modelos ha sido criticada por diversos motivos. Una crítica persistente es que muchos tipos de modelos – que desempeñan un rol importante en las ciencias – no son estructuras y no pueden ser acomodados dentro del marco de la concepción estructuralista de los modelos, el cual no puede dar cuenta ni de cómo estos modelos son construidos ni de cómo ellos funcionan en el contexto de la investigación (Cartwright, 1999; Downes, 1992; Morrison, 1999). [Algunos] ejemplos de tales modelos son los modelos interpretativos y los modelos mediadores, que se discuten más adelante en la [Sección 4.2](#). Otra acometida mantenida en contra de la aproximación teórica de conjuntos es que las estructuras teóricas de conjuntos, por sí mismas, no pueden ser modelos representacionales – al menos no si esto requiere que ellas compartan alguna estructura con el objetivo – porque la atribución de una estructura al sistema objetivo – que forma parte del mundo físico – depende de una descripción sustantiva (no-estructural) del objetivo, lo que va más allá de aquello que la aproximación estructuralista puede costear (Nguyen y Frigg, 2021).

2.4 Descripciones y Ecuaciones

Una posición que ha sido honrada por el tiempo [sostiene] que un modelo es una descripción estilizada de un sistema objetivo. Se ha argumentado que esto es lo que los científicos muestran en artículos y libros de texto al presentar un modelo (Achinstein, 1968; Black, 1962). Esta concepción no ha sido objeto de críticas explícitas. Sin embargo, algunas de las críticas que han sido reunidas en contra de la denominada concepción sintáctica de las teorías amenazan, de igual modo, el entendimiento lingüístico de los modelos (para una discusión acerca de esta concepción, véase la entrada sobre [La estructura de las teorías](#)

[científicas](#)). En primer lugar, una crítica estándar [en contra] de la concepción sintáctica es que, al asociar una teoría con una formulación particular, la concepción malinterpreta su identidad, pues cualquier cambio en su formulación da lugar a una nueva teoría (Suppe, 2000). Una concepción que asocia a los modelos con las descripciones pareciera ser vulnerable a la misma crítica. En segundo lugar, los modelos tienen propiedades distintas de las descripciones: el modelo newtoniano del sistema solar consiste en esferas que orbitan, pero no tiene sentido afirmar esto acerca de su descripción. Por el contrario, las descripciones tienen propiedades que los modelos no tienen: una descripción puede ser escrita en inglés y consistir en 517 palabras, pero lo mismo no puede decirse de un modelo. Una forma de evadir estas dificultades es asociar el modelo al contenido de la descripción, en lugar de a la descripción misma. Para una discusión sobre una posición respecto de los modelos construidos a partir del contenido de una descripción, véase Salis (2021).

Una versión contemporánea del descriptivismo se encuentra en la denominada concepción de representación directa de Levy (2012, 2015) y de Toon (2012). Esta concepción, al igual que la concepción ficticia de los modelos ([Sección 2.2](#)), comparte la sujeción a la teoría de la pretensión de Walton, pero la utiliza de un modo distinto. La diferencia principal es que las concepciones previamente discutidas ven el modelamiento como la introducción de un vehículo de representación, el modelo, que es distinto del objetivo, y subrayan que el problema es aclarar qué clase de objeto es el modelo. En la concepción de representación directa no hay modelos distintos del objetivo; sólo hay descripciones-modelo y objetivos, sin modelos intermedios. El modelamiento, desde esta perspectiva, consiste en ofrecer una descripción imaginaria de objetos reales. Una descripción-modelo prescribe imaginaciones acerca del sistema real; el péndulo ideal, por ejemplo, prescribe a los usuarios del modelo que imaginen la cuerda real como perfectamente elástica y la bola como una masa puntual. Esta aproximación evita los problemas previamente mencionados porque las condiciones de identidad del modelo se derivan de las condiciones del juego de simulación de creencias (no de la sintaxis

de la descripción), y la atribución de propiedades ocurre en la pretensión. No obstante, hay interrogantes acerca de cómo esta concepción lidia con los modelos sin objetivo (como los modelos del éter o las poblaciones de cuatro sexos) y sobre cómo los modelos, entendidos de este modo, lidian con las idealizaciones. Para una discusión sobre estos puntos, véanse Frigg y Nguyen (2016), Poznic (2016) y Salis (2021).

Una aproximación bastante cercana considera los modelos como ecuaciones. Esta es una versión de la concepción según la cual los modelos son descripciones, ya que las ecuaciones son objetos sintácticos que describen una estructura matemática. Los problemas que esta aproximación enfrenta son similares a los que ya nos hemos encontrado: en primer lugar, uno puede describir la misma situación usando diferentes tipos de coordenadas y, como resultado, obtener diferentes ecuaciones sin que, de este modo, también se obtengan distintos modelos. En segundo lugar, el modelo y la ecuación tienen propiedades distintas. Un péndulo contiene una cuerda sin masa, pero la ecuación que describe su movimiento no; y una ecuación puede ser no homogénea, pero el sistema que describe no. Es una cuestión abierta si estos problemas pueden evadirse apelando a una caracterización de la pretensión.

3. Epistemología: las funciones cognitivas de los modelos

Una de las principales razones por las que los modelos desempeñan un papel tan importante en las ciencias es que realizan una serie de funciones cognitivas. Por ejemplo, los modelos son vehículos para aprender sobre el mundo. Partes significativas de la investigación científica se llevan a cabo en modelos en lugar de en la realidad misma porque, al estudiar un modelo, podemos descubrir características y determinar hechos acerca del sistema que el modelo reemplaza: los modelos habilitan un “razonamiento subrogante” (Swoyer, 1991). Por ejemplo, estudiamos la naturaleza del átomo de hidrógeno, las dinámicas de una población o el comportamiento de un polímero mediante el estudio de sus respectivos modelos. Esta función cognitiva de los modelos ha sido ampliamente

reconocida en la literatura y algunos [autores] incluso han sugerido que los modelos suscitan un nuevo estilo de razonamiento, “el razonamiento basado en modelos”, de acuerdo con el cual “las inferencias se realizan mediante la creación de modelos y su manipulación, adaptación y evaluación” (Nersessian, 2010, p. 12; véase también Magnani, Nersessian y Thagard, 1999; Magnani y Nersessian, 2002; y Magnani y Casadio, 2016).

3.1 Aprendiendo sobre los modelos

El aprendizaje sobre un modelo ocurre en dos instancias: en la construcción del modelo y en su manipulación (Morgan, 1999). No hay reglas ni recetas fijas para la construcción del modelo, así que la actividad misma de figurarse qué encaja con qué y cómo proporciona una oportunidad para aprender sobre el modelo. Una vez construido el modelo, no aprendemos sobre sus propiedades mirándolo; tenemos que usarlo y manipularlo para descubrir sus secretos.

Dependiendo del tipo de modelo que tratemos, la construcción y manipulación de un modelo equivalen a distintas actividades que requieren metodologías distintas. Los modelos materiales parecen sencillos, ya que se usan en contextos experimentales comunes (*e.g.*, colocamos el modelo de un auto en un túnel de viento y medimos su resistencia al aire). Por ello, en tanto nos concierne el aprendizaje sobre los modelos, los modelos materiales no plantean preguntas que vayan más allá de las que conciernen a la experimentación en general.

Este no es el caso con los modelos ficticios y abstractos. ¿Qué restricciones hay en su construcción y cómo los manipulamos? Una respuesta natural sería que lo hiciéramos nosotros al realizar un experimento mental. Distintos autores (*e.g.*, Brown, 1991; Gendler, 2000; El Skaf y Stuart, 2024; Norton, 1991; Reiss, 2003; Sorensen, 1992; Sartori, 2023) han explorado esta línea argumental, pero han alcanzado conclusiones muy distintas – y, comúnmente, en conflicto – acerca de

cómo se realizan los experimentos mentales y cuál es el estatus de sus resultados (para más detalles, véase la entrada de [Experimentos mentales](#)).

Una importante clase de modelos es de naturaleza computacional. En algunos casos, es posible obtener resultados o resolver ecuaciones de un modelo matemático de forma analítica. No obstante, este no es el común de los casos. En este punto, las computadoras tienen un gran impacto porque nos permiten resolver problemas que, de otro modo, resultan intratables. Por lo tanto, los métodos computacionales nos proporcionan conocimiento sobre (las consecuencias de) los modelos donde los métodos analíticos permanecen en silencio. Muchas partes de las investigaciones actuales – tanto en las ciencias naturales como en las sociales – dependen de simulaciones computacionales, que ayudan a los científicos a explorar las consecuencias de modelos que no pueden investigarse de otros modos. Algunos ejemplos [de casos] que se exploran mediante simulaciones computacionales son: la formación y desarrollo de las estrellas y galaxias, la dinámica de las reacciones a de iones pesados a altas energías, la evolución de la vida, los estallidos bélicos, la progresión de una economía, el comportamiento moral y las consecuencias de los de los procesos en la toma de decisiones de una organización, por mencionar algunos.

Las simulaciones computacionales también tienen importancia heurística. Ellas pueden sugerir nuevas teorías, modelos e hipótesis basadas, por ejemplo, en una exploración sistemática del espacio de parámetros del modelo (Hartmann, 1996). Sin embargo, las simulaciones computacionales también conllevan peligros metodológicos. Por ejemplo, ellas pueden proporcionar resultados engañosos porque, dada la naturaleza discreta de los cálculos realizados en una computadora digital, sólo permiten explorar una parte [de la imagen] completa del espacio de parámetros, y este subespacio no refleja necesariamente todas las características importantes del modelo. La severidad de este problema es, de algún modo, mitigada por el aumento del poder de las computadoras modernas. No obstante, la disponibilidad de mayor potencia computacional también puede tener efectos adversos: puede

incentivar a los científicos a proponer rápidamente modelos cada vez más complejos, pero conceptualmente prematuros que involucran presuposiciones o mecanismos pobremente entendidos y demasiados parámetros ajustables adicionales (Para una discusión acerca de un problema relacionado en ciencias sociales, véase Braun y Saam, 2015, Ch. 3). Esto puede llevar a un incremento en la adecuación empírica – que puede ser bienvenido para ciertas tareas de previsión –, pero no necesariamente a un mejor entendimiento de los mecanismos subyacentes. Como resultado, el uso de simulaciones computacionales puede modificar el peso que les asignamos a varios objetivos en las ciencias. Finalmente, la disponibilidad de [mayor] potencia computacional puede seducir a los científicos para realizar cálculos que no tienen el grado de confiabilidad que uno esperaría. Esto ocurre, por ejemplo, cuando las computadoras se usan para propagar distribuciones de probabilidad a lo largo del tiempo, lo cual puede resultar engañoso (véase Frigg, 2014). Por consiguiente, es importante no dejarse llevar por los medios que ofrecen las nuevas y potentes computadoras, perdiendo de vista el objetivo genuino de la investigación. Para una discusión sobre más problemas relacionados con las simulaciones computacionales, referimos al lector a la entrada de [Simulaciones computacionales en ciencias](#).

3.2 Aprendiendo acerca de los sistemas objetivo

Una vez que tenemos conocimiento sobre el modelo, este conocimiento debe “traducirse” en conocimiento sobre el sistema objetivo. Es en este punto en el que la función representacional de los modelos vuelve a ser importante: si un modelo representa, entonces puede instruirnos acerca de la realidad porque al menos algunas partes o aspectos del modelo tienen partes o aspectos correspondientes en la realidad. No obstante, si el aprendizaje está conectado a la representación y si hay distintos tipos de representaciones (analogías, idealizaciones, etc.), entonces también hay distintos tipos de aprendizaje. Por ejemplo, si tenemos un modelo que consideramos una descripción realista, la transferencia de

conocimiento del modelo al objeto de estudio se logra de manera distinta a cuando lidiamos con una analogía o con un modelo que implica presuposiciones idealizadas. Para una discusión sobre las distintas formas en que la función representacional de los modelos puede ser explotada para aprender sobre el objetivo, referimos al lector a la entrada de [Representación científica](#).

3.3 Explicaciones con modelos

Algunos modelos explican; ahora bien, ¿cómo pueden cumplir esta función, dado que típicamente implican idealizaciones? ¿estos modelos explican *a pesar de* o *a raíz de* las idealizaciones que involucran? ¿el uso explicativo de los modelos presupone que representan, o los modelos no representacionales también pueden explicar? ¿Y qué tipo de explicación proporcionan los modelos?

Hay una extensa tradición que exige que los *explanans* de una explicación científica sean verdaderos. Encontramos este requisito tanto en el modelo nomológico-deductivo (Hempel, 1965) como en la literatura más reciente. Por ejemplo, Strevens (2008, p. 297) afirma que “ninguna aproximación causal de la explicación [...] permite que los modelos no verídicos expliquen”. Para una discusión más exhaustiva, véase también Colombo *et al.* (2015).

Los autores que trabajan en esta tradición niegan que las idealizaciones contribuyan positivamente a la explicación y exploran cómo los modelos pueden explicar a pesar de estar idealizados. McMullin (1968, 1985) argumenta que una explicación causal basada en un modelo idealizado sólo deja fuera las propiedades que resultan irrelevantes para la respectiva tarea explicativa (véase también Salmon, 1984; y Piccinini y Craver, 2011 para una discusión sobre bocetos de mecanismo). Friedman (1974) argumenta que un modelo más realista (y, por lo tanto, menos idealizado) explica mejor [en términos] de la teoría de la unificación. La idea es que las idealizaciones pueden (al menos en principio) ser deidealizadas (para una discusión crítica de esta afirmación en el contexto

del debate sobre explicaciones científicas, véase Batterman, 2002; Bokulich, 2011; Morrison, 2005, 2009; Jebeile y Kennedy, 2015; y Rice, 2015). Strevens (2008) argumenta que un modelo explicativo causal debe ofrecer una representación precisa de las relaciones o procesos causales relevantes que el modelo comparte con el sistema objetivo. Las suposiciones idealizadas de un modelo no hacen diferencia en el fenómeno en consideración y, por consiguiente, resultan explicativamente irrelevantes. En contraposición, Potochnik (2017) y Rice (2015) argumentan que los modelos explicativos pueden *distorsionar* directamente muchas de las causas que *hacen la diferencia*.

De acuerdo con la teoría de Woodward (2003), los modelos son herramientas para identificar las relaciones causales que se sostienen entre ciertos factores o procesos, y son estas relaciones las que realizan el trabajo explicativo. Más específicamente, las explicaciones proporcionan información sobre los patrones de dependencias contrafácticas entre el *explanans* y el *explanandum* que

“Nos habilitan a ver qué clase de diferencias habría tenido lugar en el *explanandum* si los factores citados en el *explanans* hubiesen sido diferentes de diversas maneras posibles. (Woodward, 2003, p. 11)

Las caracterizaciones causales de la explicación también han suscitado varias afirmaciones sobre cómo los modelos idealizados pueden proporcionar explicaciones, explorando así hasta qué punto la idealización permite que el modelo explicativo haga una representación tergiversada de factores causales irrelevantes (Elgin y Sober, 2002; Strevens, 2004, 2008; Potochnik, 2007; Weisberg, 2007, 2013). Sin embargo, tener características causalmente relevantes en común con el sistema real sigue desempeñando un papel esencial al mostrar cómo los modelos idealizados pueden ser explicativos.

No obstante, ¿es realmente la veracidad del *explanans* lo que hace que el modelo sea explicativo? Otros autores han seguido una línea más radical y argumentan que los modelos falsos no explican sólo *a pesar de* su falsedad, sino, de hecho, *a raíz de* ella. Cartwright (1983, p. 44) sostiene

que “la verdad no explica mucho”. En su denominada “teoría del simulacro explicativo”, ella sugiere que nosotros explicamos un fenómeno al construir un modelo que ajusta al fenómeno en el marco básico de una gran teoría (1983, Ch. 8). De acuerdo con esta teoría, el modelo mismo es la explicación que buscamos. Esto cuadra bien con las intuiciones científicas básicas, pero nos deja con la pregunta de qué noción de la explicación estamos trabajando (véase también Elgin y Sober, 2002) y de qué funciones explicativas desempeñan las idealizaciones en los modelos explicativos (Rice, 2018, 2019). Wimsatt (2007, Ch. 6) destaca el papel de los modelos falsos como medios para llegar a teorías verdaderas. Batterman y Rice (2014) argumentan que los modelos explican, ya que los detalles que caracterizan a un sistema en específico no importan para la explicación. Bokulich (2008, 2009, 2011, 2012) sigue una línea de razonamiento similar y sostiene que el poder explicativo de los modelos está estrechamente ligado a su naturaleza ficticia. Bokulich (2009) y Kennedy (2012) presentan una caracterización no representacional de la explicación mediante modelos (véase también Jebeile y Kennedy, 2015). Reiss (2012) y Woody (2004) ofrecen una discusión general sobre la relación entre representación y explicación.

3.4 Entendimiento con modelos

Muchos autores han señalado que el entendimiento es uno de los objetivos centrales de las ciencias (véase, por ejemplo, de Regt, 2017; Elgin, 2017; Khalifa, 2017; Potochnik, 2017). En algunos casos, queremos entender un fenómeno en particular (*e.g.*, por qué el cielo es azul); en otros casos, queremos entender una teoría científica específica (*e.g.*, la mecánica cuántica) que da cuenta del fenómeno en cuestión. A veces, ganamos entendimiento de un fenómeno al entender la teoría o el modelo correspondiente. Por ejemplo, la teoría del electromagnetismo de Maxwell nos ayuda a entender por qué el cielo es azul. No obstante, es controvertido si entender un fenómeno *siempre* presupone un entendimiento de la teoría correspondiente (de Regt, 2009, p. 26).

A pesar de que hay muchas formas distintas de obtener entendimiento, los modelos y la actividad del modelamiento científico son particularmente importantes aquí (de Regt *et al.*, 2009; Morrison, 2009; Potochnik, 2017; Rice, 2016). Esta intuición puede rastrearse, al menos, hasta Lord Kelvin que, en sus famosas *Lecturas de Baltimore sobre Dinámica Molecular y la Teoría ondulatoria de la Luz* de 1884, sostuvo que “la evaluación de [la pregunta] ‘¿entendemos o no un tema particular en física?’ es ‘¿podemos hacer un modelo mecánico al respecto?’” (Kelvin 1884 [1987, p. 111]; véase también Bailer-Jones 2009, Ch. 2; y de Regt 2017, Ch. 6).

Ahora bien, ¿por qué desempeñan los modelos tal papel crucial en el entendimiento de una materia? Elgin (2017) argumenta que esto no es *a pesar de*, sino *a raíz de* que los modelos son literalmente falsos. Ella considera a los modelos falsos como “falsedades felices” que ocupan un lugar central en la epistemología de las ciencias y menciona al modelo de gases ideales en mecánica estadística y al modelo de Hardy-Weinberg en genética como ejemplos de modelos literalmente falsos que son centrales para sus respectivas disciplinas. El entendimiento es holístico y concierne a un tópico, disciplina o materia en lugar de enunciados aislados o hechos. Entender un contexto significa tener

“Un compromiso epistémico con un cuerpo de información comprensivo y sistemáticamente enlazado que está fundado en hechos, es debidamente receptivo a razones o evidencias y permite [generar] inferencias no triviales, argumentos y, quizás, acciones sobre el tópico al que pertenece la información” (Elgin, 2017, p. 44)

Los modelos desempeñan un papel crucial en la búsqueda de estos compromisos epistémicos. Para una discusión sobre la teoría de Elgin acerca de los modelos y el entendimiento, véase Baumberger y Brun (2017) y Frigg y Nguyen (2021).

Elgin (2017), Lipton (2009) y Rice (2016) todos argumentan que los modelos pueden usarse para entender, independientemente de su capacidad para ofrecer una explicación. Otros autores, entre ellos

Strevens (2008, 2013), sostienen que el entendimiento presupone una explicación científica y que

“Un individuo tiene entendimiento científico de un fenómeno sólo en los casos en los que él aprehende una explicación científica correcta de aquel fenómeno (Strevens, 2013, p. 510; véase, sin embargo, Sullivan y Khalifa, 2019)

Desde esta perspectiva, el entendimiento consiste en una forma particular de acceso epistémico que un individuo científico tiene a una explicación. Para Strevens, este aspecto es la “aprehensión”, mientras que para de Regt (2017) es la “inteligibilidad”. Es importante señalar que tanto Strevens como de Regt sostienen que dichos aspectos “subjetivos” constituyen un tema valioso de investigación en la filosofía de las ciencias. Esto contrasta con la concepción tradicional (véase, e.g., Hempel, 1965) que delega [estos aspectos] al dominio de la psicología. Véase Friedman (1974), Trout (2002) y Reutlinger *et al.* (2018) para una discusión más exhaustiva sobre el entendimiento.

3.5 Otras funciones cognitivas

Además de las funciones ya mencionadas, se ha enfatizado de distintas formas que los modelos realizan una variedad de otras funciones cognitivas. Knuuttila (2005, 2011) argumenta que el valor epistémico de los modelos no se limita a su función representacional y desarrolla una teoría que concibe a los modelos como artefactos epistémicos que nos permiten recolectar conocimiento de diversas maneras. Nersessian (1999, 2010) destaca el papel de los modelos análogos en la formación de conceptos y [en] otros procesos cognitivos. Hartmann (1995) y Leplin (1980) discuten [sobre] los modelos como herramientas para la construcción de teorías y enfatizan su valor heurístico y pedagógico. Epstein (2008) enumera un conjunto de funciones específicas de los modelos en las ciencias sociales. Peschard (2011) investiga la forma en la que los modelos pueden usarse para construir otros modelos y generar

nuevos sistemas objetivos. Isaac (2013) discute los usos no explicativos de los modelos que no dependen de sus capacidades representacionales.

Las compensaciones [*trade-offs*] son una parte inherente del modelamiento científico, ya que los modelos deben mantener un equilibrio entre las desideratas en competencia, como la precisión, la generalidad y la simplicidad. Richard Levins (1966) articuló este desafío en su ensayo “La estrategia de construcción de modelos en biología poblacional”, argumentando que no existe un modelo único que pueda maximizar simultáneamente las tres desideratas. En cambio, los científicos deben tomar decisiones estratégicas sobre qué aspectos del sistema priorizar en sus modelos. Por ejemplo, un modelo puede sacrificar algo de realismo para lograr una mayor generalidad, o bien simplificar dinámicas complejas para hacerlo computacionalmente manejable.

El marco teórico de Levins ha desatado extensas discusiones filosóficas; algunos han argumentado que las compensaciones son inevitables en el modelamiento (Weisberg, 2006; Odenbaugh, 2006), mientras que otros han propuesto aproximaciones integrativas que combinan múltiples modelos para lograr un entendimiento más comprensivo de sistemas complejos (Orzack y Sober, 1993; Matthewson, 2011). Yoshida (2021) ha enfatizado la importancia de la yuxtaposición de múltiples modelos, en la que los distintos modelos se comparan y contrastan para ganar un entendimiento más matizado del fenómeno en investigación.

Estas discusiones destacan los desafíos epistémicos de la construcción de modelos a lo largo de las ciencias. Sea en física, biología, economía o ciencias del clima, las compensaciones siempre están presentes y los científicos deben considerar con cuidado las fortalezas y limitaciones de sus modelos. Al reconocer estas compensaciones, los investigadores pueden tomar decisiones más informadas sobre cómo representar y estudiar sistemas complejos, y los filósofos pueden entender mejor el papel de los modelos en la investigación científica.

4. Modelos y teoría

Una pregunta importante concierne a la relación entre los modelos y las teorías. Hay un espectro completo de posiciones desde los modelos siendo subordinados a las teorías hasta los modelos siendo independientes de las teorías.

4.1 Modelos como subsidiarios de la teoría

Para discutir sobre la relación entre los modelos y las teorías en las ciencias, es útil recapitular brevemente las nociones de modelo y de teoría en la lógica. Una *teoría* se considera un conjunto (con frecuencia deductivamente cerrado) de enunciados en un lenguaje formal. Un *modelo* es una estructura (en el sentido introducido en la [Sección 2.3](#)) que hace verdaderos todos los enunciados de una teoría cuando sus símbolos se interpretan como si refiriesen a los objetos, relaciones y funciones de una estructura. La estructura es un *modelo de* la teoría, en el sentido de que es correctamente descrito por la teoría (véase Bell y Machover, 1977, o Hodges, 1997, para detalles). Los modelos lógicos también son referidos, a veces, como “modelos de la teoría” para indicar que son interpretaciones de un sistema formal abstracto. A veces, los modelos en ciencias trasladan de la lógica la idea de ser interpretaciones de un cálculo abstracto (Hesse, 1967). Esto es sobresaliente en física, donde las leyes generales – tales como la ecuación del movimiento de Newton – yacen en el corazón de la teoría. Estas leyes se aplican a un sistema particular – e.g., un péndulo – mediante la elección de una función de fuerza especial, la toma de suposiciones sobre la distribución de masa del péndulo, etc. El modelo resultante, entonces, es una interpretación (o realización) de la ley general.

Es importante mantener separadas las nociones de un modelo lógico y de uno representacional (Thomson-Jones, 2006): son conceptos distintos. A veces, un modelo puede ser lógico sin ser representacional, y *viceversa*. No obstante, esto no significa que, a veces, no pueda haber un modelo de ambos sentidos en uno solo. De hecho, como señala Hesse

(1967), muchos modelos en las ciencias son tanto lógicos como representacionales. El modelo del movimiento planetario de Newton es un ejemplo de ello: el modelo – que consiste de dos esferas homogéneas perfectas, que se atraen gravitacionalmente la una a la otra y están localizadas en un espacio, por lo demás, vacío – es, simultáneamente, un modelo lógico (porque hace verdaderos los axiomas de la mecánica newtoniana cuando son interpretados como refiriendo al modelo) y un modelo representacional (porque representa al sol y la tierra reales).

Hay dos caracterizaciones centrales de las teorías científicas: la denominada concepción sintáctica de las teorías y la denominada concepción semántica de las teorías (véase la entrada de [La estructura de las teorías científicas](#)). En ambas concepciones, los modelos desempeñan un rol subsidiario frente a las teorías, aunque de maneras muy distintas. La concepción sintáctica de las teorías (véase la entrada en la sección de [La concepción sintáctica](#)) conserva las nociones lógicas de un modelo y de una teoría. Interpreta la teoría como un conjunto de enunciados en un sistema lógico axiomatizado y al modelo como una interpretación alternativa de un cálculo determinado (Braithwaite, 1953; Campbell, 1920 [1957]; Nagel, 1961; Spector, 1965). Por ejemplo, si tomamos la matemática usada en la teoría cinética de los gases y reinterpretamos los términos de su cálculo de tal forma que se refieran a bolas de billar, [entonces] las bolas de billar son un modelo de la teoría cinética de los gases en el sentido de que todos los enunciados de la teoría aparecen como verdaderos. El modelo se supone que es algo con lo que estamos familiarizados y sirve para el propósito de hacer más palpable el cálculo formal abstracto. Una teoría dada puede tener distintos modelos, y el modelo que elegimos depende tanto de nuestros objetivos como de nuestro conocimiento previo. Defensores de la concepción sintáctica discrepan sobre la importancia de los modelos. Carnap y Hempel pensaron que los modelos sólo servían para fines pedagógicos o estéticos y son, en último término, dispensables, ya que toda la información relevante está contenida en la teoría (Carnap, 1938; Hempel, 1965; véase también Bailer-Jones, 1999). Nagel (1961) y Braithwaite (1953), por otro

lado, enfatizan el papel *heurístico* de los modelos y Schaffner (1969) sugiere que los términos teóricos obtienen, al menos, parte de su sentido de los modelos.

La concepción semántica de las teorías (véase la entrada en la sección [La concepción semántica](#)) prescinde de los enunciados en un sistema lógico axiomatizado e interpreta la teoría como una familia de modelos. Desde esta perspectiva, una teoría es literalmente una clase, conglomerado o familia de modelos – los modelos son las piezas de construcción con las que se elaboran las teorías científicas. Distintas versiones de la concepción semántica trabajan con distintas nociones de modelo, pero, como se señaló en la [Sección 2.3](#), en la concepción semántica los modelos se interpretan mayoritariamente como estructuras teóricas de conjuntos. Para una discusión sobre diferentes opciones, referimos al lector a la entrada relevante de esta enciclopedia (enlazada al inicio de este párrafo).

4.2 Los modelos como independientes de la teoría

Tanto en la concepción sintáctica como en la semántica de las teorías, los modelos se consideran subordinados a la teoría y no desempeñan un papel fuera del contexto de la teoría. Esta visión de los modelos ha sido desafiada de distintas maneras, con autores señalando que los modelos disponen de varios grados de libertad respecto de la teoría y funcionan de manera autónoma en muchos contextos. La independencia puede adoptar muchas formas y gran parte de la literatura sobre modelos concierne a la investigación de distintas formas de independencia.

Modelos completamente independientes de la teoría. La separación más radical del análisis de los modelos centrado en la teoría es el reconocimiento de que existen modelos completamente independientes de cualquier teoría. Un ejemplo de estos modelos es el modelo de Lotka-Volterra. El modelo describe la interacción entre dos poblaciones: una de animales depredadores y otra de presas (Weisberg, 2013). El modelo fue construido usando sólo la matemática de las ecuaciones diferenciales y

suposiciones relativas al sentido común sobre los depredadores y las presas. No se apela a una teoría de las interacciones depredador-presa ni a una teoría del crecimiento poblacional; el modelo es independiente de las teorías sobre su materia de estudio. Si un modelo se construye en un dominio donde no hay una teoría disponible, entonces el modelo a veces se refiere como un “modelo sustituto” (Groenewold, 1961) porque el modelo sustituye una teoría.

Modelos como medio para explorar la teoría. Los modelos también pueden usarse para explorar teorías (Morgan y Morrison, 1999). Una forma obvia en la que esto ocurre es cuando un modelo es un modelo lógico de la teoría (véase [Sección 4.1](#)). Un modelo lógico es un conjunto de objetos y propiedades que hacen verdadero un enunciado formal, de modo que uno ve en el modelo cómo se desarrollan los axiomas de la teoría en una configuración particular y qué clase de comportamientos ellos dictan. Sin embargo, no todos los modelos que son usados para explorar teorías son modelos lógicos y, [además,] los modelos pueden representar características de las teorías de otros modos. Considérese, por ejemplo, la teoría del caos. Las ecuaciones de sistemas no lineales, tales como las que describen el problema de los tres cuerpos, tienen soluciones muy complejas para estudiar con métodos rudimentarios, e incluso las simulaciones computacionales están limitadas en muchas formas. Consideraciones abstractas sobre los comportamientos cualitativos de las soluciones muestran que existe un mecanismo apodado “estirar y plegar” (véase la entrada de [Caos](#)). Para obtener una idea de la complejidad de las dinámicas exhibidas por [el mecanismo de] estirar y plegar, Smale propuso estudiar un modelo simple de fluido – ahora conocido como el “mapa de la herradura” (Tabor, 1989) – que nos proporciona una comprensión importante de la naturaleza del [mecanismo de] estirar y plegar. Otros ejemplos de modelos de este tipo son el modelo de anillo de Kac, usado para estudiar las propiedades de equilibrio de sistemas en mecánica estadística (Lavis, 2008), y el domo de Norton en mecánica newtoniana (Norton, 2003).

Modelos como complementos de las teorías. Una teoría puede estar incompletamente especificada en el sentido de que sólo impone ciertas restricciones generales, pero permanece en silencio sobre los detalles de las situaciones concretas, los cuales son proporcionados por un modelo (Redhead, 1980). Un caso especial de esta situación es cuando una teoría cualitativa ya es conocida y el modelo introduce mediciones cuantitativas (Apostel, 1961). El ejemplo de Redhead de una teoría indeterminada de esta forma es la teoría axiomática de la mecánica cuántica de campos, que solo impone ciertas restricciones generales a la mecánica cuántica de campos, pero no proporciona una caracterización de campos particulares. Harré (2004) señala que los modelos pueden complementar las teorías al proporcionar mecanismos para procesos que quedan sin especificar en la teoría, aunque estos sean responsables de provocar el fenómeno observado.

Las teorías pueden resultar muy complicadas de manejar. En tales casos, un modelo puede complementar una teoría al proporcionar una versión simplificada del escenario teórico, lo que permite [llegar a] una solución. La cromodinámica cuántica, por ejemplo, no puede usarse fácilmente para investigar la física de un núcleo atómico, aunque sea la teoría fundamental relevante. Para evitar esta dificultad, los físicos construyeron modelos fenomenológicos manejables (como el modelo del bolso del MIT) que efectivamente describen el nivel relevante de libertad del sistema en consideración (Hartmann, 1999, 2001). La ventaja de estos modelos es que producen resultados [en casos] en los que las teorías permanecen en silencio. Su inconveniente es que, normalmente, no es claro cómo se entiende la relación entre el modelo y la teoría, ya que ambos, estrictamente hablando, son contradictorios.

Modelos como teorías preliminares. La noción de un modelo como un sustituto de una teoría está estrechamente ligada a la noción de un *modelo de desarrollo*. Este término fue acuñado por Leplin (1980), quien señaló cómo de útiles eran los modelos en el desarrollo temprano de la teoría cuántica, y ahora se usa como una noción paraguas para cubrir los

casos en los que los modelos son una especie de ejercicio preliminar para [obtener una] teoría.

[Dicha noción] también está estrechamente ligada a la noción de un modelo probatorio (o “modelo de estudio”). Los modelos de este tipo no cumplen una función representacional y no se espera que nos instruyan sobre nada más allá del modelo mismo. El propósito de estos modelos es examinar nuevas herramientas teóricas que más tarde se emplean para construir modelos representacionales. En la teoría de campos, por ejemplo, el denominado modelo- φ^4 fue extensivamente estudiado no porque se creyese que representaba cualquier aspecto real, sino porque servía para distintas funciones heurísticas: la simplicidad del modelo- φ^4 permitió a los científicos “tener una sensación” de cómo es la teoría cuántica de campos y extraer algunas características generales que este modelo simple compartía con [otros modelos] más complicados. Los físicos pudieron estudiar técnicas complejas, tales como la renormalización en una configuración sencilla, y fue posible familiarizarse con mecanismos importantes – en este caso, la ruptura de simetría – que podrían usarse luego en diferentes contextos (Hartmann, 1995). Esto no aplica sólo en la física. Como Wimsatt (1987, 2007) señala, un modelo falso en genética puede realizar muchas funciones útiles, entre las que encontramos las siguientes: el modelo falso puede ayudar a responder preguntas sobre los modelos más realistas, proporcionar una arena para responder preguntas sobre las propiedades de modelos más complejos, “excluir” fenómenos que no hubieran sido observados de otro modo, servir como un caso límite de un modelo más general (o dos modelos falsos pueden definir los extremos de un *continuum* de casos en los que se supone que se encuentra el caso real), o guiar en la identificación de variables relevantes y en la estimación de sus valores.

Modelos interpretativos. Cartwright (1983, 1999) argumenta que los modelos no sólo ayudan en la aplicación de teorías de algún modo incompletas; ella afirma que los modelos también están involucrados *siempre* que una teoría con una estructura matemática general es aplicada. Las principales teorías de la física – mecánica clásica, electrodinámica,

mecánica cuántica y así sucesivamente – entran en esta categoría. Las teorías de este tipo están formuladas en términos de conceptos abstractos que deben concretizarse para que la teoría proporcione una descripción del sistema objetivo, y [para] concretizar los conceptos relevantes se introducen objetos y procesos idealizados. Por ejemplo, cuando aplicamos la mecánica clásica, el concepto abstracto de fuerza debe reemplazarse por una fuerza concreta, como la gravedad. Para obtener ecuaciones manejables, este proceso debe aplicarse a un escenario simplificado, por ejemplo, [uno] de dos planetas homogéneos y perfectamente esféricos en un espacio por lo demás vacío, en lugar de la realidad en toda su complejidad. El resultado es un modelo interpretativo que cimienta la aplicación de teorías matemáticas a objetivos del mundo real. Tales modelos son independientes de la teoría en tanto esta no determina su forma, y, con todo, son necesarios para la aplicación de la teoría a un problema concreto.

Modelos como mediadores. La relación entre modelos y teorías puede ser complicada y desordenada. Los contribuyentes de una colaboración programática de ensayos editada por Morgan y Morrison (1999) se reunieron en torno a la idea de que los modelos son instrumentos que median entre las teorías y el mundo. Los modelos son “agentes autónomos” en tanto son independientes de las teorías y de sus sistemas objetivos, y es esta independencia la que les permite mediar entre ambos. Las teorías no nos entregan algoritmos para la construcción de un modelo; ellas no son “máquinas expendedoras” en las que uno puede insertar un problema y obtener un modelo (Cartwright 1999). La construcción de un modelo normalmente requiere conocimiento detallado sobre materiales, esquemas de aproximación y configuraciones que la teoría correspondiente no proporciona. Además, el funcionamiento interno de un modelo suele estar dirigido por una variedad de teorías que trabajan de manera cooperativa. En el modelamiento climático contemporáneo, por ejemplo, los elementos de distintas teorías – entre [las que encontramos] la dinámica de fluidos, la termodinámica y el electromagnetismo – se ponen a trabajar de manera

cooperativa. Lo que entrega los resultados no es la rigurosa aplicación de una teoría, sino las voces de distintas teorías cuando se usan en coro, la una con la otra en [la forma de] un modelo.

En casos complejos, como el estudio de un sistema láser o del clima global, los modelos y las teorías pueden entrelazarse a tal punto que resulta poco claro dónde deba dibujarse la línea entre ambos: ¿dónde termina el modelo y comienza la teoría? Este no es sólo un problema para el análisis filosófico; también surge en la práctica científica. Bailer-Jones (2002) entrevistó a un grupo de físicos acerca de su entendimiento de los modelos y de su relación con las teorías, y reportó concepciones ampliamente diversas: 1) no hay una diferencia sustantiva entre el modelo y la teoría; 2) los modelos *se vuelven* teorías cuando se incrementa su grado de confirmación; 3) los modelos contienen simplificaciones y omisiones, mientras que las teorías son precisas y completas; 4) las teorías son más generales que los modelos, y el modelamiento trata sobre la aplicación de teorías generales a casos específicos. La primera sugerencia pareciera ser muy radical para hacer justicia a las muchas facetas de la práctica en la que claramente se distinguen modelos y teorías. La segunda concepción está alineada con el lenguaje común, en el que los términos “modelo” y “teoría” se emplean a veces para expresar la actitud de alguien hacia una hipótesis particular. La frase “es sólo un modelo” indica que la hipótesis en juego es afirmada sólo de modo tentativo, o incluso se sabe que es falsa, mientras que algo recibe la etiqueta de “teoría” si ha adquirido cierto grado de aceptación general. Sin embargo, este uso de “modelo” difiere de los usos observados en las Secciones 1 a 3 y, por lo tanto, no resulta útil si el objetivo es entender la relación entre las teorías y los modelos científicos (e, incidentemente, uno puede igualmente descartar afirmaciones especulativas como “sólo una teoría”). La tercera propuesta es correcta al asociar los modelos con las idealizaciones y simplificaciones, pero se excede al limitar esto a los modelos; de hecho, las teorías también pueden contener idealizaciones y simplificaciones. La cuarta concepción parece estar estrechamente alineada con los modelos interpretativos y con la idea de que los modelos son mediadores, pero ser

más general es una noción gradual y, por ello, no proporciona un criterio divisorio claro para distinguir entre teorías y modelos.

5. Modelos y otros debates en filosofía de las ciencias

El debate sobre los modelos científicos tiene repercusiones importantes para otros problemas en la filosofía de las ciencias (para una caracterización histórica de la discusión filosófica sobre los modelos, véase Bailer-Jones, 1999). Tradicionalmente, los debates sobre, digamos, el realismo científico, el reduccionismo y las leyes de la naturaleza se expresaron en términos de teorías, porque estas se consideraban las principales portadoras del conocimiento científico. Una vez reconocido el importante lugar que ocupan los modelos en el edificio de las ciencias, estos problemas tuvieron que ser reconsiderados con un enfoque en los modelos. La pregunta es si – y, de ser así, cómo – las discusiones acerca de estos problemas cambian cuando cambiamos el enfoque de las teorías a los modelos. Hasta ahora, no ha surgido ninguna caracterización comprensiva basada en modelos de alguno de estos problemas, pero los modelos han dejado una huella importante en las discusiones sobre estos tópicos.

5.1 Modelos, realismo y las leyes de la naturaleza

Como hemos visto en la [Sección 1](#), los modelos típicamente ofrecen una representación distorsionada de sus objetivos. Si uno ve la ciencia como principalmente basada en modelos, [entonces] esto puede tomarse como sugerente de una interpretación antirrealista de las ciencias. No obstante, los realistas niegan que la presencia de idealizaciones en los modelos ocasione que una aproximación realista de las ciencias [sea] imposible y señalan que un buen modelo – aunque no sea literalmente verdadero – es, con frecuencia, al menos aproximadamente verdadero y/o puede ser mejorado mediante la deidealización (Laymon, 1985; McMullin, 1985; Nowak, 1979; Brzezinski y Nowak, 1992).

Aparte de las preocupaciones usuales sobre la elusividad de la noción de verdad aproximada (para una discusión, véase la entrada de [Semejanza con la verdad](#)), los antirrealistas han tenido problemas con esta réplica por dos razones (relacionadas). Primero, como señala Cartwright (1989), no hay razón para asumir que uno siempre puede mejorar un modelo al agregar correcciones deidealizadas. En segundo lugar, parece que la deidealización no concuerda con la práctica científica porque es inusual que los científicos inviertan esfuerzos en deidealizar repetidamente un modelo existente. Más bien, cambian a un marco de modelamiento distinto cuando los ajustes por realizar se vuelven muy complejos (Hartmann, 1998). Los distintos modelos del núcleo atómico son un ejemplo de ello: una vez se dieron cuenta de que los efectos de capas son importantes para entender varios fenómenos subatómicos, el modelo (colectivo) de gota líquida fue puesto a un lado y el modelo (partícula-única) de capas fue desarrollado para dar cuenta de los hallazgos correspondientes. Una dificultad adicional de la deidealización es que la mayoría de las idealizaciones no son “controladas”. Por ejemplo, no es claro de qué modo uno podría deidealizar el modelo de bolsa del MIT para llegar, eventualmente, a la cromodinámica cuántica, la teoría subyacente supuestamente correcta.

Un argumento antirrealista adicional, el “argumento de los modelos incompatibles”, toma como punto de partida la observación de que los científicos, con frecuencia, usan exitosamente muchos modelos incompatibles de *uno y el mismo* sistema objetivo para fines predictivos (Morrison, 2000). Estos modelos aparentemente se contradicen entre sí al atribuir propiedades distintas al mismo sistema objetivo. En física nuclear, por ejemplo, el modelo de gota líquida explora la analogía entre el núcleo atómico y una gota (cargada) de fluido, mientras que el modelo de capas nucleares describe propiedades nucleares en términos de las propiedades de los protones y neutrones que constituyen el núcleo atómico. Esta práctica parece causar un problema para el realismo científico: los realistas suelen sostener que existe una relación estrecha entre el éxito predictivo de una teoría y su aproximada veracidad. Ahora

bien, si muchos modelos del mismo sistema son predictivamente exitosos y si estos modelos son mutuamente inconsistentes, entonces es difícil sostener que todos ellos sean aproximadamente verdaderos.

Los realistas pueden reaccionar a este argumento de diversas formas. Primero, ellos pueden desafiar la afirmación de que los modelos en cuestión son, en efecto, predictivamente exitosos. Si los modelos no son buenos para predecir, entonces el argumento queda bloqueado. Segundo, ellos pueden defender una versión del “realismo perspectival” (Giere, 20006; Massimi, 2022; Rueger, 2005). Defensores de esta posición (que también se llama, a veces, “perspectivismo”) la sitúan en algún lugar entre el realismo científico “estándar” y el antirrealismo; dónde yace exactamente esta posición intermedia es un tema activo de debate (Massimi, 2018a, b; Saatsi, 2016; Teller, 2018; y las contribuciones de Massimi y McCoy, 2019). Tercero, los realistas pueden negar que haya un problema en primer lugar, ya que los modelos científicos – que son siempre idealizados y, por tanto, falsos hablando en sentido estricto – son sólo el vehículo equivocado para hacer un punto sobre el realismo (que debería discutirse en términos de teorías).

Sober (2015) relaciona el debate sobre la selección de modelos en la estadística con el debate entre los realistas e instrumentalistas en la filosofía de las ciencias. Mientras que el realista considera que el objetivo de las ciencias es encontrar teorías verdaderas, el instrumentalismo de Sober considera que el objetivo de las ciencias es encontrar teorías predictivamente precisas. Al final, Sober defiende el eslogan “instrumentalismo para los modelos, realismo para los modelos ajustados” (2015, p. 144). Véase también la entrada de [filosofía de la estadística](#).

Un punto particularmente focal del debate realista [conciérne] a las leyes de la naturaleza, donde emergen las preguntas [relativas a] qué son las leyes y si son retratadas de modo fidedigno por nuestras representaciones científicas. De acuerdo con las dos teorías actualmente

dominantes, el enfoque del mejor sistema y el enfoque determinista⁸, las leyes de la naturaleza se entienden como universales dentro de su alcance, lo que significa que son aplicables a todo lo que hay en el mundo (para una discusión sobre leyes, véase la entrada sobre [leyes de la naturaleza](#)). Esta aproximación a las leyes no parece encajar con una concepción que sitúa a los modelos en el centro de la investigación científica. ¿Qué papel desempeñan las leyes generales en las ciencias si son los modelos [aquello] que representan lo que ocurre en el mundo? ¿y cómo se relacionan los modelos y las leyes?

Una respuesta posible a estas preguntas es argumentar que las leyes de la naturaleza gobiernan entidades y procesos en un *modelo* en lugar de en el mundo. Las leyes fundamentales, desde esta aproximación, no establecen hechos sobre el *mundo*, sino que son verdaderas respecto de las entidades y procesos en el modelo. Esta concepción ha sido defendida desde distintas variantes: Cartwright (1983) argumenta que todas las leyes son leyes *ceteris paribus*. Cartwright (1999) utiliza las “capacidades” (que ella considera anteriores a las leyes) e introduce la noción de una “máquina nomológica”. Esto es

“Un arreglo (lo suficientemente) ajustado de componentes o factores con capacidades (lo suficientemente) estables que, en el tipo correcto de ambiente (lo suficientemente) estable, va a, con una operación repetida, dar lugar al tipo de comportamiento regular que representamos mediante nuestras leyes científicas.”

⁸ NT: original “*best-system approach*” y “*necessitarian approach*” son conceptos paraguas en la discusión sobre las leyes de la naturaleza que encapsulan dos posturas generales y comparten un núcleo que establece las leyes como universales dentro de su alcance. Por un lado, el enfoque del mejor sistema (*best-system approach*) sostiene que las leyes pertenecen a un sistema deductivo que es la mejor combinación de fuerza y simplicidad; por otro lado, el enfoque determinista (*necessitarian approach*) afirma que las leyes son necesariamente verdaderas. Para una exposición más amplia sobre estas posturas, véanse las secciones 2 y 8 de la entrada sobre [Leyes de la naturaleza](#) en la enciclopedia de Stanford (Carroll, John W., “Laws of Nature”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2025 Edition), Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/win2025/entries/laws-of-nature/>).

(1999, p. 50; véase también la entrada acerca de [leyes ceteris paribus](#))

Giere (1999) argumenta que las leyes de una teoría son concebidas de mejor modo no como la codificación de verdades generales sobre el mundo, sino, más bien, como enunciados abiertos que pueden completarse de diversas maneras en el proceso de construcción de modelos científicos más específicos. Posiciones similares también han sido defendidas por Teller (2001) y van Fraassen (1989).

5.2 Modelos y Reduccionismo

El problema de los modelos múltiples mencionado en la [Sección 5.1](#) también plantea la pregunta de cómo se relacionan entre sí los diferentes modelos. Evidentemente, múltiples modelos del mismo sistema objetivo no suelen encontrarse en una relación deductiva, ya que normalmente se contradicen entre sí. Algunos [autores] (Cartwright, 1999; Hacking, 1983) han sugerido una imagen de las ciencias según la cual no hay relaciones sistemáticas que se sostengan entre los distintos modelos. Algunos modelos están enlazados porque representan el mismo sistema objetivo, pero esto no implica que estén en ninguna otra relación adicional (deductiva o de otro tipo). Nos encontramos con un mosaico de modelos y todos ellos se sostienen [de modo] *ceteris paribus* en sus respectivos dominios de aplicación.

Algunos [autores] argumentan que esta imagen es, al menos, parcialmente incorrecta, ya que hay varias relaciones de interés que se sostienen entre los distintos modelos y teorías. Estas relaciones abarcan desde minuciosas relaciones reductivas (Scheibe, 1997, 1999, 2001: esp. Chs. V.23 y V.24) y aproximaciones controladas sobre relaciones de límites singulares (Batterman, 2001 [2016]) a relaciones estructurales (Gähde, 1997) y relaciones más bien laxas denominadas “historias” (Hartmann, 1999; véase también Bokulich, 2003; Teller, 2002; y la colección de ensayos en la parte III de Hartmann *et al.*, 2008). Estas sugerencias se han realizado en la base de casos de estudio y [aún] queda

por ver si una caracterización más general de estas relaciones puede ser dada y si se puede proporcionar una justificación más detallada para ellas, por ejemplo, dentro de un marco bayesiano (los primeros pasos hacia un entendimiento bayesiano de las relaciones reductivas pueden ser encontrado en Dizadji-Bahmani *et al.*, 2011; Liefke y Hartmann, 2018; y Tešić, 2019).

Los modelos también figuran en el debate sobre la reducción y la emergencia en la física. Aquí, algunos autores argumentan que la aproximación moderna a la renormalización desafía el modelo de reducción de Nagel (1961) o la doctrina más amplia de reducciones (para una discusión crítica, véase, por ejemplo, Batterman, 2002, 2010, 2011; Morrison, 2012; y Saatsi y Reutlinger, 2018). Dizadji-Bahmani *et al.* (2010) ofrecen una defensa del modelo Nagel-Schaffner de reducción y Butterfield (2011a, b, 2014) argumenta que la renormalización es consistente con la reducción nageliana. Palacios (2019) muestra que las transiciones de fase son compatibles con el reduccionismo y Hartmann (2001) argumenta que el programa de investigación sobre teorías de campos efectivas es consistente con el reduccionismo (véase también Bain, 2013, y Franklin, 2020). Rosaler (2015) sostiene una forma “local” de reducción que considera que la relación fundamental de la reducción se sostiene entre modelos, no entre teorías, lo cual, no obstante, es compatible con el modelo Nagel-Schaffner de la reducción. Véase también la entrada sobre [relaciones intrateóricas en física](#) y sobre la [reducción científica](#).

En las ciencias sociales, los modelos basados en agentes (MBAs) se utilizan cada vez más (Klein *et al.*, 2018). Estos modelos muestran cómo los patrones de comportamiento, sorprendentemente complejos a escala macro, pueden emerger de un número reducido de reglas simples de comportamiento de los agentes individuales y de sus interacciones. Esto plantea preguntas similares a las mencionadas anteriormente sobre la reducción y la emergencia en física, pero hasta ahora uno sólo puede encontrar comentarios dispersos sobre la reducción en la literatura. Véanse Weisberg y Muldoon (2009) y Zollman (2007) para la aplicación

de los MBAs a la epistemología y a las estructuras sociales en las ciencias, y Colyvan (2013) para una discusión sobre las preguntas metodológicas planteadas por los modelos normativos en general.

Bibliografía

- Achinstein, Peter, 1968, *Concepts of Science: A Philosophical Analysis*, Baltimore, MD: Johns Hopkins Press.
- Akerlof, George A., 1970, “The Market for ‘Lemons’: Quality Uncertainty and the Market Mechanism”, *The Quarterly Journal of Economics*, 84(3): 488–500. doi:10.2307/1879431
- Ankeny, Rachel A. and Sabina Leonelli, 2020, *Model Organisms*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Apostel, Leo, 1961, “Towards the Formal Study of Models in the Non-Formal Sciences”, in Freudenthal 1961: 1–37. doi:10.1007/978-94-010-3667-2_1
- Bailer-Jones, Daniela M., 1999, “Tracing the Development of Models in the Philosophy of Science”, in Magnani, Nersessian, and Thagard 1999: 23–40. doi:10.1007/978-1-4615-4813-3_2
- , 2002, “Scientists’ Thoughts on Scientific Models”, *Perspectives on Science*, 10(3): 275–301. doi:10.1162/106361402321899069
- , 2009, *Scientific Models in Philosophy of Science*, Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press.
- Bailer-Jones, Daniela M. and Coryn A. L. Bailer-Jones, 2002, “Modeling Data: Analogies in Neural Networks, Simulated Annealing and Genetic Algorithms”, in Magnani and Nersessian 2002: 147–165. doi:10.1007/978-1-4615-0605-8_9
- Bain, Jonathan, 2013, “Emergence in Effective Field Theories”, *European Journal for Philosophy of Science*, 3(3): 257–273. doi:10.1007/s13194-013-0067-0

- Bandyopadhyay, Prasanta S. and Malcolm R. Forster (eds.), 2011, *Philosophy of Statistics* (Handbook of the Philosophy of Science 7), Amsterdam: Elsevier.
- Barberousse, Anouk and Pascal Ludwig, 2009, “Fictions and Models”, in Suárez 2009: 56–75.
- Bartha, Paul, 2010, *By Parallel Reasoning: The Construction and Evaluation of Analogical Arguments*, New York: Oxford University Press.
doi:10.1093/acprof:oso/9780195325539.001.0001
- , 2013 [2019], “Analogy and Analogical Reasoning”, in Edward N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2019 Edition). URL = [<https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/reasoning-analogy/>](https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/reasoning-analogy/)
- Batterman, Robert W., 2002, *The Devil in the Details: Asymptotic Reasoning in Explanation, Reduction, and Emergence*, Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/0195146476.001.0001
- , 2001 [2016], “Intertheory Relations in Physics”, in Edward N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2016 Edition). URL = [<https://plato.stanford.edu/archives/fall2016/entries/physics-interrelate>](https://plato.stanford.edu/archives/fall2016/entries/physics-interrelate)
- , 2010, “Reduction and Renormalization”, in Gerhard Ernst and Andreas Hüttemann (eds.), *Time, Chance and Reduction: Philosophical Aspects of Statistical Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 159–179.
- , 2011, “Emergence, Singularities, and Symmetry Breaking”, *Foundations of Physics*, 41(6): 1031–1050. doi:10.1007/s10701-010-9493-4
- Batterman, Robert W. and Collin C. Rice, 2014, “Minimal Model Explanations”, *Philosophy of Science*, 81(3): 349–376. doi:10.1086/676677

- Baumberger, Christoph and Georg Brun, 2017, “Dimensions of Objectual Understanding”, in Stephen R. Grimm, Christoph Baumberger, and Sabine Ammon (eds.), *Explaining Understanding: New Perspectives from Epistemology and Philosophy of Science*, New York: Routledge, pp. 165–189.
- Bell, John and Moshé Machover, 1977, *A Course in Mathematical Logic*, Amsterdam: North-Holland.
- Berry, Michael, 2002, “Singular Limits”, *Physics Today*, 55(5): 10–11. doi:10.1063/1.1485555
- Black, Max, 1962, *Models and Metaphors: Studies in Language and Philosophy*, Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Bogen, James and James Woodward, 1988, “Saving the Phenomena”, *The Philosophical Review*, 97(3): 303–352. doi:10.2307/2185445
- Bokulich, Alisa, 2003, “Horizontal Models: From Bakers to Cats”, *Philosophy of Science*, 70(3): 609–627. doi:10.1086/376927
- , 2008, *Reexamining the Quantum–Classical Relation: Beyond Reductionism and Pluralism*, Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511751813
- , 2009, “Explanatory Fictions”, in Suárez 2009: 91–109.
- , 2011, “How Scientific Models Can Explain”, *Synthese*, 180(1): 33–45. doi:10.1007/s11229-009-9565-1
- , 2012, “Distinguishing Explanatory from Nonexplanatory Fictions”, *Philosophy of Science*, 79(5): 725–737. doi:10.1086/667991
- Bolker, Jessica A., 2009, “Exemplary and Surrogate Models: Two Modes of Representation in Biology”, *Perspectives in Biology and Medicine*, 52: 485–499.
- Braithwaite, Richard, 1953, *Scientific Explanation*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Braun, Norman and Nicole J. Saam (eds.), 2015, *Handbuch Modellbildung und Simulation in den Sozialwissenschaften*,

- Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-658-01164-2
- Brewer, William F. and Clark A. Chinn, 1994, “Scientists’ Responses to Anomalous Data: Evidence from Psychology, History, and Philosophy of Science”, in *PSA 1994: Proceedings of the 1994 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 1, pp. 304–313. doi:10.1086/psaprocbienmeetp.1994.1.193035
- Brown, James, 1991, *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*, London: Routledge.
- Brzezinski, Jerzy and Leszek Nowak (eds.), 1992, *Idealization III: Approximation and Truth*, Amsterdam: Rodopi.
- Burian, Richard M., 1993, “How the Choice of Experimental Organism Matters: Epistemological Reflections on an Aspect of Biological Practice”, *Journal of the History of Biology*, 26: 351–368.
- Butterfield, Jeremy, 2011a, “Emergence, Reduction and Supervenience: A Varied Landscape”, *Foundations of Physics*, 41(6): 920–959. doi:10.1007/s10701-011-9549-0
- , 2011b, “Less Is Different: Emergence and Reduction Reconciled”, *Foundations of Physics*, 41(6): 1065–1135. doi:10.1007/s10701-010-9516-1
- , 2014, “Reduction, Emergence, and Renormalization”, *Journal of Philosophy*, 111(1): 5–49. doi:10.5840/jphil201411111
- Callender, Craig and Jonathan Cohen, 2006, “There Is No Special Problem about Scientific Representation”, *Theoria*, 55(1): 67–85.
- Campbell, Norman, 1920 [1957], *Physics: The Elements*, Cambridge: Cambridge University Press. Reprinted as *Foundations of Science*, New York: Dover, 1957.
- Carnap, Rudolf, 1938, “Foundations of Logic and Mathematics”, in Otto Neurath, Charles Morris, and Rudolf Carnap (eds.), *International Encyclopaedia of Unified Science*, Volume 1, Chicago, IL: University of Chicago Press, pp. 139–213.

- Cartwright, Nancy, 1983, *How the Laws of Physics Lie*, Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/0198247044.001.0001
- , 1989, *Nature's Capacities and Their Measurement*, Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/0198235070.001.0001
- , 1999, *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*, Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139167093
- Colombo, Matteo, Stephan Hartmann, and Robert van Iersel, 2015, “Models, Mechanisms, and Coherence”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 66(1): 181–212. doi:10.1093/bjps/axt043
- Colyvan, Mark, 2013, “Idealisations in Normative Models”, *Synthese*, 190(8): 1337–1350. doi:10.1007/s11229-012-0166-z
- Contessa, Gabriele, 2010, “Scientific Models and Fictional Objects”, *Synthese*, 172(2): 215–229. doi:10.1007/s11229-009-9503-2
- Crowther, Karen, Niels S. Linnemann, and Christian Wüthrich, 2021, “What We Cannot Learn from Analogue Experiments”, *Synthese*, 198(16): 3701–3726; first online: 4 May 2019. doi:10.1007/s11229-019-02190-0
- Da Costa, Newton and Steven French, 2000, “Models, Theories, and Structures: Thirty Years On”, *Philosophy of Science*, 67(supplement): S116–S127. doi:10.1086/392813
- Dardashti, Radin, Stephan Hartmann, Karim Thébault, and Eric Winsberg, 2019, “Hawking Radiation and Analogue Experiments: A Bayesian Analysis”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 67: 1–11. doi:10.1016/j.shpsb.2019.04.004
- Dardashti, Radin, Karim P. Y. Thébault, and Eric Winsberg, 2017, “Confirmation via Analogue Simulation: What Dumb Holes Could Tell Us about Gravity”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 68(1): 55–89. doi:10.1093/bjps/axv010

- de Regt, Henk, 2009, “Understanding and Scientific Explanation”, in de Regt, Leonelli, and Eigner 2009: 21–42.
- , 2017, *Understanding Scientific Understanding*, Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/oso/9780190652913.001.0001
- de Regt, Henk, Sabina Leonelli, and Kai Eigner (eds.), 2009, *Scientific Understanding: Philosophical Perspectives*, Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press.
- Dietrich, Michael R., Rachel A. Ankeny, Nathan Crowe, Sara Green, and Sabina Leonelli, 2020, “How to Choose Your Research Organism”, *Studies in History and Philosophy of Science Part C (Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences)*, 80: 101–227.
- Dizadji-Bahmani, Foad, Roman Frigg, and Stephan Hartmann, 2010, “Who’s Afraid of Nagelian Reduction?”, *Erkenntnis*, 73(3): 393–412. doi:10.1007/s10670-010-9239-x
- , 2011, “Confirmation and Reduction: A Bayesian Account”, *Synthese*, 179(2): 321–338. doi:10.1007/s11229-010-9775-6
- Downes, Stephen M., 1992, “The Importance of Models in Theorizing: A Deflationary Semantic View”, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1992(1): 142–153. doi:10.1086/psaprocbienmeetp.1992.1.192750
- Elgin, Catherine Z., 2010, “Telling Instances”, in Roman Frigg and Matthew Hunter (eds.), *Beyond Mimesis and Convention* (Boston Studies in the Philosophy of Science 262), Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 1–17. doi:10.1007/978-90-481-3851-7_1
- , 2017, *True Enough*. Cambridge, MA, and London: MIT Press.
- Elgin, Mehmet and Elliott Sober, 2002, “Cartwright on Explanation and Idealization”, *Erkenntnis*, 57(3): 441–450. doi:10.1023/A:1021502932490
- Elliott-Graves, Alkistis, 2020, “What Is a Target System?”, *Biology & Philosophy*, 35, Article 28. doi:10.1007/s10539-020-09745-3

- El Skaf, Rawad and Michael T. Stuart, 2024, “Scientific Models and Thought Experiments: Same Same but Different”, in Knuuttila, Carrillo and Koskinen 2024: ch. 24.
- Epstein, Joshua M., 2008, “Why Model?”, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(4): 12. [[Epstein 2008 available online](#)]
- Fisher, Grant, 2006, “The Autonomy of Models and Explanation: Anomalous Molecular Rearrangements in Early Twentieth-Century Physical Organic Chemistry”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 37(4): 562–584. doi:10.1016/j.shpsa.2006.09.009
- Franklin, Alexander, 2020, “Whence the Effectiveness of Effective Field Theories?”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 71(4): 1235–1259. First online: 3 August 2018. doi:10.1093/bjps/axy050
- Freudenthal, Hans (ed.), 1961, *The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences*, Dordrecht: Reidel. doi:10.1007/978-94-010-3667-2
- Friedman, Michael, 1974, “Explanation and Scientific Understanding”, *Journal of Philosophy*, 71(1): 5–19. doi:10.2307/2024924
- Frigg, Roman, 2010a, “Fiction in Science”, in John Woods (ed.), *Fictions and Models: New Essays*, Munich: Philosophia Verlag, pp. 247–287.
- , 2010b, “Models and Fiction”, *Synthese*, 172(2): 251–268. doi:10.1007/s11229-009-9505-0
- , 2023, *Models and Theories: A Philosophical Inquiry*, London: Routledge.
- Frigg, Roman, Seamus Bradley, Hailiang Du, and Leonard A. Smith, 2014, “Laplace’s Demon and the Adventures of His Apprentices”, *Philosophy of Science*, 81(1): 31–59. doi:10.1086/674416

- Frigg, Roman and James Nguyen, 2016, “The Fiction View of Models Reloaded”, *The Monist*, 99(3): 225–242. doi:10.1093/monist/onw002 [[Frigg and Nguyen 2016 available online](#)]
- , 2021, “Mirrors without Warnings”, *Synthese*, 198: 2427–2447. doi:10.1007/s11229-019-02222-9
- Fumagalli, Roberto, 2016, “Why We Cannot Learn from Minimal Models”, *Erkenntnis*, 81(3): 433–455. doi:10.1007/s10670-015-9749-7
- Gähde, Ulrich, 1997, “Anomalies and the Revision of Theory-Elements: Notes on the Advance of Mercury’s Perihelion”, in Maria Luisa Dalla Chiara, Kees Doets, Daniele Mundici, and Johan van Benthem (eds.), *Structures and Norms in Science* (Synthese Library 260), Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 89–104. doi:10.1007/978-94-017-0538-7_6
- Galison, Peter, 1997, *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*, Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Gelfert, Axel, 2016, *How to Do Science with Models: A Philosophical Primer* (Springer Briefs in Philosophy), Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-27954-1
- Gendler, Tamar Szabó, 2000, *Thought Experiment: On the Powers and Limits of Imaginary Cases*, New York and London: Garland.
- Gibbard, Allan and Hal R. Varian, 1978, “Economic Models”, *The Journal of Philosophy*, 75(11): 664–677. doi:10.5840/jphil1978751111
- Giere, Ronald N., 1988, *Explaining Science: A Cognitive Approach*, Chicago, IL: University of Chicago Press.
- , 1999, *Science Without Laws*, Chicago, IL: University of Chicago Press.
- , 2006, *Scientific Perspectivism*, Chicago, IL: University of Chicago Press.
- , 2009, “Why Scientific Models Should Not be Regarded as Works of Fiction”, in Suárez 2009: 248–258.

- , 2010, “An Agent-Based Conception of Models and Scientific Representation”, *Synthese*, 172(2): 269–281. doi:10.1007/s11229-009-9506-z
- Godfrey-Smith, Peter, 2007, “The Strategy of Model-Based Science”, *Biology & Philosophy*, 21(5): 725–740. doi:10.1007/s10539-006-9054-6
- , 2009, “Abstractions, Idealizations, and Evolutionary Biology”, in Anouk Barberousse, Michel Morange, and Thomas Pradeu (eds.), *Mapping the Future of Biology: Evolving Concepts and Theories* (Boston Studies in the Philosophy of Science 266), Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 47–56. doi:10.1007/978-1-4020-9636-5_4
- Groenewold, H. J., 1961, “The Model in Physics”, in Freudenthal 1961: 98–103. doi:10.1007/978-94-010-3667-2_9
- Grüne-Yanoff, Till, 2009, “Learning from Minimal Economic Models”, *Erkenntnis*, 70(1): 81–99. doi:10.1007/s10670-008-9138-6
- Hacking, Ian, 1983, *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511814563
- Hale, Susan C., 1988, “Spacetime and the Abstract/Concrete Distinction”, *Philosophical Studies*, 53(1): 85–102. doi:10.1007/BF00355677
- Harré, Rom, 2004, *Modeling: Gateway to the Unknown* (Studies in Multidisciplinarity 1), ed. by Daniel Rothbart, Amsterdam etc.: Elsevier.
- Harris, Todd, 2003, “Data Models and the Acquisition and Manipulation of Data”, *Philosophy of Science*, 70(5): 1508–1517. doi:10.1086/377426
- Hartmann, Stephan, 1995, “Models as a Tool for Theory Construction: Some Strategies of Preliminary Physics”, in Herfel et al. 1995: 49–67.

- , 1996, “The World as a Process: Simulations in the Natural and Social Sciences”, in Hegselmann, Mueller, and Troitzsch 1996: 77–100. doi:10.1007/978-94-015-8686-3_5
- , 1998, “Idealization in Quantum Field Theory”, in Shanks 1998: 99–122.
- , 1999, “Models and Stories in Hadron Physics”, in Morgan and Morrison 1999: 326–346. doi:10.1017/CBO9780511660108.012
- , 2001, “Effective Field Theories, Reductionism and Scientific Explanation”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 32(2): 267–304. doi:10.1016/S1355-2198(01)00005-3
- Hartmann, Stephan, Carl Hoefer, and Luc Bovens (eds.), 2008, *Nancy Cartwright’s Philosophy of Science* (Routledge Studies in the Philosophy of Science), New York: Routledge.
- Hegselmann, Rainer, Ulrich Mueller, and Klaus G. Troitzsch (eds.), 1996, *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View* (Theory and Decision Library 23), Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-015-8686-3
- Helman, David H. (ed.), 1988, *Analogical Reasoning: Perspectives of Artificial Intelligence, Cognitive Science, and Philosophy* (Synthese Library 197), Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-015-7811-0
- Hempel, Carl G., 1965, *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*, New York: Free Press.
- Herfel, William, Wladiysław Krajewski, Ilkka Niiniluoto, and Ryszard Wojcicki (eds.), 1995, *Theories and Models in Scientific Process* (Poznań Studies in the Philosophy of Science and the Humanities 44), Amsterdam: Rodopi.
- Hesse, Mary, 1963, *Models and Analogies in Science*, London: Sheed and Ward.

- , 1967, “Models and Analogy in Science”, in Paul Edwards (ed.), *Encyclopedia of Philosophy*, New York: Macmillan, pp. 354–359.
- , 1974, *The Structure of Scientific Inference*, London: Macmillan.
- Hodges, Wilfrid, 1997, *A Shorter Model Theory*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Holyoak, Keith and Paul Thagard, 1995, *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Horowitz, Tamara and Gerald J. Massey (eds.), 1991, *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Lanham, MD: Rowman & Littlefield.
- Isaac, Alistair M. C., 2013, “Modeling without Representation”, *Synthese*, 190(16): 3611–3623. doi:10.1007/s11229-012-0213-9
- Jebeile, Julie and Ashley Graham Kennedy, 2015, “Explaining with Models: The Role of Idealizations”, *International Studies in the Philosophy of Science*, 29(4): 383–392. doi:10.1080/02698595.2015.1195143
- Jones, Martin R., 2005, “Idealization and Abstraction: A Framework”, in Jones and Cartwright 2005: 173–217. doi:10.1163/9789401202732_010
- Jones, Martin R. and Nancy Cartwright (eds.), 2005, *Idealization XII: Correcting the Model* (Poznań Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities 86), Amsterdam and New York: Rodopi. doi:10.1163/9789401202732
- Kelvin, William Thomson, Baron, 1884 [1987], *Notes of lectures on molecular dynamics and the wave theory of light. Delivered at the Johns Hopkins University, Baltimore* (aka Lord Kelvin’s Baltimore Lectures), A. S. Hathaway (recorder). A revised version was published in 1904, London: C.J. Clay and Sons. Reprint of the 1884 version in Robert Kargon and Peter Achinstein (eds.), *Kelvin’s Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics*, Cambridge, MA: MIT Press, 1987.

- Khalifa, Kareem, 2017, *Understanding, Explanation, and Scientific Knowledge*, Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781108164276
- Klein, Dominik, Johannes Marx, and Kai Fischbach, 2018, “Agent-Based Modeling in Social Science History and Philosophy: An Introduction”, *Historical Social Research*, 43(1): 243–258.
- Knuuttila, Tarja, 2005, “Models, Representation, and Mediation”, *Philosophy of Science*, 72(5): 1260–1271. doi:10.1086/508124
- , 2011, “Modelling and Representing: An Artefactual Approach to Model-Based Representation”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 42(2): 262–271. doi:10.1016/j.shpsa.2010.11.034
- Knuuttila, Tarja, Natalia Carrillo, and Rami Koskinen (eds.), 2024, *The Routledge Handbook of Philosophy of Scientific Modeling*, London: Routledge.
- Kroes, Peter, 1989, “Structural Analogies Between Physical Systems”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 40(2): 145–154. doi:10.1093/bjps/40.2.145
- Lange, Marc, 2015, “On ‘Minimal Model Explanations’: A Reply to Batterman and Rice”, *Philosophy of Science*, 82(2): 292–305. doi:10.1086/680488
- Lavis, David A., 2008, “Boltzmann, Gibbs, and the Concept of Equilibrium”, *Philosophy of Science*, 75(5): 682–692. doi:10.1086/594514
- Laymon, Ronald, 1982, “Scientific Realism and the Hierarchical Counterfactual Path from Data to Theory”, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1982(1): 107–121. doi:10.1086/psaprocbienmeetp.1982.1.192660
- , 1985, “Idealizations and the Testing of Theories by Experimentation”, in Peter Achinstein and Owen Hannaway (eds.), *Observation, Experiment, and Hypothesis in Modern Physical Science*, Cambridge, MA: MIT Press, pp. 147–173.

- , 1991, “Thought Experiments by Stevin, Mach and Gouy: Thought Experiments as Ideal Limits and Semantic Domains”, in Horowitz and Massey 1991: 167–191.
- Leonelli, Sabina, 2010, “Packaging Small Facts for Re-Use: Databases in Model Organism Biology”, in Peter Howlett and Mary S. Morgan (eds.), *How Well Do Facts Travel? The Dissemination of Reliable Knowledge*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 325–348. doi:10.1017/CBO9780511762154.017
- , 2016, *Data-Centric Biology: A Philosophical Study*, Chicago, IL, and London: University of Chicago Press.
- , 2019, “What Distinguishes Data from Models?”, *European Journal for Philosophy of Science*, 9(2): article 22. doi:10.1007/s13194-018-0246-0
- Lepin, Jarrett, 1980, “The Role of Models in Theory Construction”, in Thomas Nickles (ed.), *Scientific Discovery, Logic, and Rationality* (Boston Studies in the Philosophy of Science 56), Dordrecht: Springer Netherlands, 267–283. doi:10.1007/978-94-009-8986-3_12
- Levins, Richard, 1966, “The Strategy of Model Building in Population Biology”, *American Scientist*, 54: 421–431.
- Levy, Arnon, 2012, “Models, Fictions, and Realism: Two Packages”, *Philosophy of Science*, 79(5): 738–748. doi:10.1086/667992
- , 2015, “Modeling without Models”, *Philosophical Studies*, 172(3): 781–798. doi:10.1007/s11098-014-0333-9
- Levy, Arnon and Adrian Currie, 2015, “Model Organisms Are Not (Theoretical) Models”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 66(2): 327–348. doi:10.1093/bjps/axt055
- Levy, Arnon and Peter Godfrey-Smith (eds.), 2020, *The Scientific Imagination: Philosophical and Psychological Perspectives*, New York: Oxford University Press.
- Liefke, Kristina and Stephan Hartmann, 2018, “Intertheoretic Reduction, Confirmation, and Montague’s Syntax–Semantics

- Relation”, *Journal of Logic, Language and Information*, 27(4): 313–341. doi:10.1007/s10849-018-9272-8
- Lipton, Peter, 2009, “Understanding without Explanation”, in de Regt, Leonelli, and Eigner 2009: 43–63.
- Luczak, Joshua, 2017, “Talk about Toy Models”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 57: 1–7. doi:10.1016/j.shpsb.2016.11.002
- Magnani, Lorenzo, 2012, “Scientific Models Are Not Fictions: Model-Based Science as Epistemic Warfare”, in Lorenzo Magnani and Ping Li (eds.), *Philosophy and Cognitive Science: Western & Eastern Studies* (Studies in Applied Philosophy, Epistemology and Rational Ethics 2), Berlin and Heidelberg: Springer, pp. 1–38. doi:10.1007/978-3-642-29928-5_1
- Magnani, Lorenzo and Claudia Casadio (eds.), 2016, *Model-Based Reasoning in Science and Technology: Logical, Epistemological, and Cognitive Issues* (Studies in Applied Philosophy, Epistemology and Rational Ethics 27), Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-38983-7
- Magnani, Lorenzo and Nancy J. Nersessian (eds.), 2002, *Model-Based Reasoning: Science, Technology, Values*, Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4615-0605-8
- Magnani, Lorenzo, Nancy J. Nersessian, and Paul Thagard (eds.), 1999, *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*, Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4615-4813-3
- Mäki, Uskali, 1994, “Isolation, Idealization and Truth in Economics”, in Bert Hamminga and Neil B. De Marchi (eds.), *Idealization VI: Idealization in Economics* (Poznań Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities 38), Amsterdam: Rodopi, pp. 147–168.
- Massimi, Michela, 2018a, “Four Kinds of Perspectival Truth”, *Philosophy and Phenomenological Research*, 96(2): 342–359. doi:10.1111/phpr.12300

- , 2018b, “Perspectival Modeling”, *Philosophy of Science*, 85(3): 335–359. doi:10.1086/697745
- , 2019, “Two Kinds of Exploratory Models”, *Philosophy of Science*, 86(5): 869–881. doi:10.1086/705494
- , 2022, *Perspectival Realism*, Oxford: Oxford University Press.
- Massimi, Michela and Casey D. McCoy (eds.), 2019, *Understanding Perspectivism: Scientific Challenges and Methodological Prospects*, New York: Routledge. doi:10.4324/9781315145198
- Matthewson, John, 2011, “Trade-offs in Model-building: A More Target-oriented Approach”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 42(2): 324–333.
- Mayo, Deborah, 1996, *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, Chicago, IL: University of Chicago Press.
- , 2018, *Statistical Inference as Severe Testing: How to Get Beyond the Statistics Wars*, Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781107286184
- McMullin, Ernan, 1968, “What Do Physical Models Tell Us?”, in B. Van Rootselaar and J. Frits Staal (eds.), *Logic, Methodology and Philosophy of Science III* (Studies in Logic and the Foundations of Mathematics 52), Amsterdam: North Holland, pp. 385–396. doi:10.1016/S0049-237X(08)71206-0
- , 1985, “Galilean Idealization”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 16(3): 247–273. doi:10.1016/0039-3681(85)90003-2
- Morgan, Mary S., 1999, “Learning from Models”, in Morgan and Morrison 1999: 347–388. doi:10.1017/CBO9780511660108.013
- Morgan, Mary S. and Marcel J. Boumans, 2004, “Secrets Hidden by Two-Dimensionality: The Economy as a Hydraulic Machine”, in Soraya de Chadarevian and Nick Hopwood (eds.), *Model: The Third Dimension of Science*, Stanford, CA: Stanford University Press, pp. 369–401.

- Morgan, Mary S. and Margaret Morrison (eds.), 1999, *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*, Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511660108
- Morrison, Margaret, 1999, “Models as Autonomous Agents”, in Morgan and Morrison 1999: 38–65. doi:10.1017/CBO9780511660108.004
- , 2000, *Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures*, Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511527333
- , 2005, “Approximating the Real: The Role of Idealizations in Physical Theory”, in Jones and Cartwright 2005: 145–172. doi:10.1163/9789401202732_009
- , 2009, “Understanding in Physics and Biology: From the Abstract to the Concrete”, in de Regt, Leonelli, and Eigner 2009: 123–145.
- , 2012, “Emergent Physics and Micro-Ontology”, *Philosophy of Science*, 79(1): 141–166. doi:10.1086/663240
- Musgrave, Alan, 1981, “‘Unreal Assumptions’ in Economic Theory: The F-Twist Untwisted”, *Kyklos*, 34(3): 377–387. doi:10.1111/j.1467-6435.1981.tb01195.x
- Nagel, Ernest, 1961, *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*, New York: Harcourt, Brace and World.
- Nersessian, Nancy J., 1999, “Model-Based Reasoning in Conceptual Change”, in Magnani, Nersessian, and Thagard 1999: 5–22. doi:10.1007/978-1-4615-4813-3_1
- , 2010, *Creating Scientific Concepts*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Nguyen, James, 2020, “It’s Not a Game: Accurate Representation with Toy Models”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 71(3): 1013–1041. doi:10.1093/bjps/axz010
- Nguyen, James and Roman Frigg, 2021, “Mathematics Is Not the Only Language in the Book of Nature”, *Synthese*, 198, 5941–5962. doi:10.1007/s11229-017-1526-5
- , 2022, *Scientific Representation*, Cambridge: Cambridge University Press.

- Norton, John D., 1991, “Thought Experiments in Einstein’s Work”, in Horowitz and Massey 1991: 129–148.
- , 2003, “Causation as Folk Science”, *Philosopher’s Imprint*, 3: article 4. [[Norton 2003 available online](#)]
- , 2012, “Approximation and Idealization: Why the Difference Matters”, *Philosophy of Science*, 79(2): 207–232. doi:10.1086/664746
- Nowak, Leszek, 1979, *The Structure of Idealization: Towards a Systematic Interpretation of the Marxian Idea of Science*, Dordrecht: D. Reidel.
- Odenbaugh, Jay, 2002, “Complex Systems, Trade-offs, and Theoretical Population Biology: Richard Levins’s ‘Strategy of Model Building in Population Biology’ Revisited”, *Philosophy of Science*, 70: 1496–1507.
- , 2006, “The Strategy of ‘The Strategy of Model Building in Population Biology’”, *Biology & Philosophy*, 21: 607–621.
- Orzack, Steven Hecht and Elliott Sober, 1993, “A Critical Assessment of Levins’s The Strategy of Model Building in Population Biology (1966)”, *The Quarterly Review of Biology*, 68(4): 533–546.
- Otsuka, Jun, 2023, *Thinking About Statistics: The Philosophical Foundations*, London: Routledge.
- Palacios, Patricia, 2019, “Phase Transitions: A Challenge for Intertheoretic Reduction?”, *Philosophy of Science*, 86(4): 612–640. doi:10.1086/704974
- Peschard, Isabelle, 2011, “Making Sense of Modeling: Beyond Representation”, *European Journal for Philosophy of Science*, 1(3): 335–352. doi:10.1007/s13194-011-0032-8
- Piccinini, Gualtiero and Carl Craver, 2011, “Integrating Psychology and Neuroscience: Functional Analyses as Mechanism Sketches”, *Synthese*, 183(3): 283–311. doi:10.1007/s11229-011-9898-4

- Pincock, Christopher, 2012, *Mathematics and Scientific Representation*, Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/acprof:oso/9780199757107.001.0001
- , 2022, “Concrete Scale Models, Essential Idealization and Causal Explanation”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 73(2): 299–323.
- Portides, Demetris P., 2007, “The Relation between Idealisation and Approximation in Scientific Model Construction”, *Science & Education*, 16(7–8): 699–724. doi:10.1007/s11191-006-9001-6
- , 2014, “How Scientific Models Differ from Works of Fiction”, in Lorenzo Magnani (ed.), *Model-Based Reasoning in Science and Technology* (Studies in Applied Philosophy, Epistemology and Rational Ethics 8), Berlin and Heidelberg: Springer, pp. 75–87. doi:10.1007/978-3-642-37428-9_5
- Potochnik, Angela, 2007, “Optimality Modeling and Explanatory Generality”, *Philosophy of Science*, 74(5): 680–691.
- , 2017, *Idealization and the Aims of Science*, Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Poznic, Michael, 2016, “Make-Believe and Model-Based Representation in Science: The Epistemology of Frigg’s and Toon’s Fictionalist Views of Modeling”, *Teorema: Revista Internacional de Filosofía*, 35(3): 201–218.
- Psillos, Stathis, 1995, “The Cognitive Interplay between Theories and Models: The Case of 19th Century Optics”, in Herfel et al. 1995: 105–133.
- Redhead, Michael, 1980, “Models in Physics”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 31(2): 145–163. doi:10.1093/bjps/31.2.145
- Reiss, Julian, 2003, “Causal Inference in the Abstract or Seven Myths about Thought Experiments”, in *Causality: Metaphysics and Methods Research Project*, Technical Report 03/02. London: London School of Economics.
- , 2006, “Social Capacities”, in Hartmann et al. 2006: 265–288.

- , 2012, “The Explanation Paradox”, *Journal of Economic Methodology*, 19(1): 43–62. doi:10.1080/1350178X.2012.661069
- Reutlinger, Alexander, 2017, “Do Renormalization Group Explanations Conform to the Commonality Strategy?”, *Journal for General Philosophy of Science*, 48(1): 143–150. doi:10.1007/s10838-016-9339-7
- Reutlinger, Alexander, Dominik Hangleiter, and Stephan Hartmann, 2018, “Understanding (with) Toy Models”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 69(4): 1069–1099. doi:10.1093/bjps/axx005
- Rice, Collin C., 2016, “Factive Scientific Understanding without Accurate Representation”, *Biology & Philosophy*, 31(1): 81–102. doi:10.1007/s10539-015-9510-2
- , 2018, “Idealized Models, Holistic Distortions, and Universality”, *Synthese*, 195(6): 2795–2819. doi:10.1007/s11229-017-1357-4
- , 2019, “Models Don’t Decompose That Way: A Holistic View of Idealized Models”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 70(1): 179–208. doi:10.1093/bjps/axx045
- , 2021, *Leveraging Distortions: Explanation, Idealization, and Universality in Science*. Boston, MA: MIT Press.
- Rosaler, Joshua, 2015, “Local Reduction in Physics”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 50: 54–69. doi:10.1016/j.shpsb.2015.02.004
- Rueger, Alexander, 2005, “Perspectival Models and Theory Unification”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 56(3): 579–594. doi:10.1093/bjps/axi128
- Rueger, Alexander and David Sharp, 1998, “Idealization and Stability: A Perspective from Nonlinear Dynamics”, in Shanks 1998: 201–216.
- Saatsi, Juha, 2016, “Models, Idealisations, and Realism”, in Emiliano Ippoliti, Fabio Sterpetti, and Thomas Nickles (eds.), *Models and*

- Inferences in Science* (Studies in Applied Philosophy, Epistemology and Rational Ethics 25), Cham: Springer International Publishing, pp. 173–189. doi:10.1007/978-3-319-28163-6_10
- Saatsi, Juha and Alexander Reutlinger, 2018, “Taking Reductionism to the Limit: How to Rebut the Antireductionist Argument from Infinite Limits”, *Philosophy of Science*, 85(3): 455–482. doi:10.1086/697735
- Salis, Fiora, 2021, “The New Fiction View of Models”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 72(3): 717–742. doi:10.1093/bjps/axz015
- Salmon, Wesley C., 1984, *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*, Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Sartori, Lorenzo, 2023, “Putting the ‘Experiment’ Back Into the ‘Thought Experiment’”, *Synthese*, 201, article 34. doi:10.1007/s11229-022-04011-3
- , forthcoming, “Model Organisms as Scientific Representations”, *The British Journal for the Philosophy of Science*. doi:10.1086/728259.
- Schaffner, Kenneth F., 1969, “The Watson–Crick Model and Reductionism”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 20(4): 325–348. doi:10.1093/bjps/20.4.325
- Scheibe, Erhard, 1997, *Die Reduktion physikalischer Theorien: Ein Beitrag zur Einheit der Physik, Teil I: Grundlagen und elementare Theorie*, Berlin: Springer.
- , 1999, *Die Reduktion physikalischer Theorien: Ein Beitrag zur Einheit der Physik, Teil II: Inkommensurabilität und Grenzfallreduktion*, Berlin: Springer.
- , 2001, *Between Rationalism and Empiricism: Selected Papers in the Philosophy of Physics*, Brigitte Falkenburg (ed.), New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4613-0183-7
- Shanks, Niall (ed.), 1998, *Idealization in Contemporary Physics*, Amsterdam: Rodopi.

- Shech, Elay, 2018, “Idealizations, Essential Self-Adjointness, and Minimal Model Explanation in the Aharonov–Bohm Effect”, *Synthese*, 195(11): 4839–4863. doi:10.1007/s11229-017-1428-6
- Sismondo, Sergio and Snait Gissis (eds.), 1999, *Modeling and Simulation*, Special Issue of *Science in Context*, 12(2).
- Sjölin Wirling, Ylwa and Till Grüne-Yanoff, 2021, “The Epistemology of Modal Modelling”, *Philosophy Compass*, e12775. doi:10.1111/phc3.12775
- Sober, Elliott, 2015, *Ockham’s Razors: A User’s Manual*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Sorensen, Roy A., 1992, *Thought Experiments*, New York: Oxford University Press. doi:10.1093/019512913X.001.0001
- Spector, Marshall, 1965, “Models and Theories”, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 16(62): 121–142. doi:10.1093/bjps/XVI.62.121
- Sprenger, Jan and Stephan Hartmann, 2019, *Bayesian Philosophy of Science*, Oxford: Oxford University Press.
- Staley, Kent W., 2004, *The Evidence for the Top Quark: Objectivity and Bias in Collaborative Experimentation*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Sterrett, Susan G., 2006, “Models of Machines and Models of Phenomena”, *International Studies in the Philosophy of Science*, 20(1): 69–80. doi:10.1080/02698590600641024
- , 2020, “Scale Modeling”, in Diane Michelfelder and Neelke Doorn (eds.), *The Routledge Handbook of Philosophy of Engineering*, New York: Routledge, pp. 394–407.
- Strevens, Michael, 2004, “The Causal and Unification Approaches to Explanation Unified—Causally”, *Noûs*, 38(1): 154–176. doi:10.1111/j.1468-0068.2004.00466.x
- , 2008, *Depth: An Account of Scientific Explanation*, Cambridge, MA, and London: Harvard University Press.

- , 2013, *Tychomancy: Inferring Probability from Causal Structure*, Cambridge, MA, and London: Harvard University Press.
- Suárez, Mauricio, 2004, “An Inferential Conception of Scientific Representation”, *Philosophy of Science*, 71(5): 767–779. doi:10.1086/421415
- (ed.), 2009, *Fictions in Science: Philosophical Essays on Modeling and Idealization*, London: Routledge. doi:10.4324/9780203890103
- , 2024, *Inference and Representation: A Study in Modeling Science*, Chicago, IL: Chicago University Press.
- Sugden, Robert, 2000, “Credible Worlds: The Status of Theoretical Models in Economics”, *Journal of Economic Methodology*, 7(1): 1–31. doi:10.1080/135017800362220
- Sullivan, Emily and Kareem Khalifa, 2019, “Idealizations and Understanding: Much Ado About Nothing?”, *Australasian Journal of Philosophy*, 97(4): 673–689. doi:10.1080/00048402.2018.1564337
- Suppe, Frederick, 2000, “Theory Identity”, in William H. Newton-Smith (ed.), *A Companion to the Philosophy of Science*, Oxford: Wiley-Blackwell, pp. 525–527.
- Suppes, Patrick, 1960, “A Comparison of the Meaning and Uses of Models in Mathematics and the Empirical Sciences”, *Synthese*, 12(2–3): 287–301. Reprinted in Freudenthal 1961: 163–177, and in Suppes 1969: 10–23. doi:10.1007/BF00485107 doi:10.1007/978-94-010-3667-2_16
- , 1962, “Models of Data”, in Ernest Nagel, Patrick Suppes, and Alfred Tarski (eds.), *Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress*, Stanford, CA: Stanford University Press, pp. 252–261. Reprinted in Suppes 1969: 24–35.
- , 1969, *Studies in the Methodology and Foundations of Science: Selected Papers from 1951 to 1969*, Dordrecht: Reidel.

- , 2007, “Statistical Concepts in Philosophy of Science”, *Synthese*, 154(3): 485–496. doi:10.1007/s11229-006-9122-0
- Swoyer, Chris, 1991, “Structural Representation and Surrogate Reasoning”, *Synthese*, 87(3): 449–508. doi:10.1007/BF00499820
- Tabor, Michael, 1989, *Chaos and Integrability in Nonlinear Dynamics: An Introduction*, New York: John Wiley.
- Teller, Paul, 2001, “Twilight of the Perfect Model”, *Erkenntnis*, 55(3): 393–415. doi:10.1023/A:1013349314515
- , 2002, “Critical Study: Nancy Cartwright’s *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*”, *Noûs*, 36(4): 699–725. doi:10.1111/1468-0068.t01-1-00408
- , 2009, “Fictions, Fictionalization, and Truth in Science”, in Suárez 2009: 235–247.
- , 2018, “Referential and Perspectival Realism”, *Spontaneous Generations: A Journal for the History and Philosophy of Science*, 9(1): 151–164. doi:10.4245/sponge.v9i1.26990
- Tešić, Marko, 2019, “Confirmation and the Generalized Nagel–Schaffner Model of Reduction: A Bayesian Analysis”, *Synthese*, 196(3): 1097–1129. doi:10.1007/s11229-017-1501-1
- Thomasson, Amie L., 1999, *Fiction and Metaphysics*, New York: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511527463
- , 2020, “If Models Were Fictions, Then What Would They Be?”, in Levy and Godfrey-Smith 2020: 51–74.
- Thomson-Jones, Martin, 2006, “Models and the Semantic View”, *Philosophy of Science*, 73(5): 524–535. doi:10.1086/518322
- , 2020, “Realism about Missing Systems”, in Levy and Godfrey-Smith 2020: 75–101.
- Toon, Adam, 2012, *Models as Make-Believe: Imagination, Fiction and Scientific Representation*, Basingstoke: Palgrave Macmillan.
- Trout, J.D., 2002, “Scientific Explanation and the Sense of Understanding”, *Philosophy of Science*, 69(2): 212–233. doi:10.1086/341050

- van Fraassen, Bas C., 1989, *Laws and Symmetry*, Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/0198248601.001.0001
- Walton, Kendall L., 1990, *Mimesis as Make-Believe: On the Foundations of the Representational Arts*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Weisberg, Michael, 2006, “Forty Years of ‘the Strategy’: Levins on Model Building and Idealization”, *Biology & Philosophy*, 21: 623–645.
- , 2007, “Three Kinds of Idealization”, *Journal of Philosophy*, 104(12): 639–659. doi:10.5840/jphil20071041240
- , 2013, *Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World*, Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/acprof:oso/9780199933662.001.0001
- Weisberg, Michael and Ryan Muldoon, 2009, “Epistemic Landscapes and the Division of Cognitive Labor”, *Philosophy of Science*, 76(2): 225–252. doi:10.1086/644786
- Wimsatt, William, 1987, “False Models as Means to Truer Theories”, in Matthew Nitecki and Antoni Hoffman (eds.), *Neutral Models in Biology*, Oxford: Oxford University Press, pp. 23–55.
- , 2007, *Re-Engineering Philosophy for Limited Beings: Piecewise Approximations to Reality*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Woodward, James, 2003, *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*, Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/0195155270.001.0001
- Woody, Andrea I., 2004, “More Telltale Signs: What Attention to Representation Reveals about Scientific Explanation”, *Philosophy of Science*, 71(5): 780–793. doi:10.1086/421416
- Yoshida, Yoshinari, 2021, “Multiple-Models Juxtaposition and Trade-offs among Modeling Desiderata”, *Philosophy of Science*, 88(1): 103–123.

Zollman, Kevin J. S., 2007, “The Communication Structure of Epistemic Communities”, *Philosophy of Science*, 74(5): 574–587.
doi:10.1086/525605

Herramientas académicas

[Cómo citar esta entrada \[en INGLÉS\]](#).

[Avance de la versión en PDF de esta entrada en los amigos de la sociedad SEP.](#)

[Véase los tópicos y pensadores relacionados con esta entrada](#) en el Proyecto de ontología filosófica de internet (InPhO).

[La bibliografía ampliada de esta entrada](#) en [PhilPapers](#), con los enlaces a su base de datos.

Otros recursos de internet

Discusiones conceptuales e históricas

- [Enciclopedia de internet de artículos filosóficos sobre modelos](#)
- [Bibliografía \(1450-2008\), Mueller Science](#)

Ejemplos de modelos

- [Modelos interactivos de distintas ciencias \(Phet, Universidad de Colorado, Boulder\)](#)
- [Modelos del clima global \(Climate.gov\)](#)
- [Modelo de doble hélice del ADN \(Proteopedia\)](#)
- [Una guía biológica al modelamiento matemático en ecología y evolución \(Sarah Otto y Troy Day\)](#)
- [Modelo Lotka-Volterra \(analyticphysics.com\)](#)
- [Modelo Schelling de Segregación \(Frank McCown\)](#)
- [Modelamiento común \(NetLogo\)](#)

- [Redes sociales y económicas: Modelos y análisis \(cursos de Stanford Online\)](#)
- [Modelos de redes neurales \(TensorFlow\)](#)

Entradas relacionadas

[Objetos abstractos](#) | [Razonamiento análogo y analógico](#) | [Biología: experimentos en](#) | [Caos](#) | [Ficciones: entidades ficticias](#) | [Leyes de la naturaleza](#) | [Leyes de la naturaleza: *ceteris paribus*](#) | [Física: relaciones intrateóricas en](#) | [Reducción, científica](#) | [Ciencia: teoría y observación en](#) | [Ciencia: unidad de](#) | [Explicación científica](#) | [Realismo científico](#) | [Representación científica](#) | [Teorías científicas: estructuras de](#) | [Simulaciones en ciencia](#) | [Estadística, filosofía de](#) | [Experimentos mentales](#) | [Semejanza con la verdad](#)

Agradecimiento

Nos gustaría agradecer a Jow Dewhurst, James Nguyen, Alexander Reutlinger, Collin Rice, Dunja Šešelja y Paul Teller por sus fructíferos comentarios en los borradores de la versión revisada de 2019. Cuando escribimos la versión original en 2006, nos beneficiamos de los comentarios y sugerencias de Nancy Cartwright, Paul Humphreys, Julian Reiss, Elliot Sober, Chris Swoyer y Paul Teller.

[Copyright © 2025](#) por

[Roman Frigg](#) <r.p.frigg@lse.ac.uk>

[Stephan Hartmann](#) <stephan.hartmann@lrz.uni-muenchen.de>