

EXPERIMENTOS MENTALES
EN CIENCIAS NATURALES

ENSAYOS

27

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Enrique Luis Graue Wiechers
Rector

Dra. Guadalupe Valencia García
Coordinadora de Humanidades

Dr. Adrián Curiel Rivera
Director del CEPHCIS
Coordinador de la serie

Experimentos mentales en ciencias naturales

DAMIÁN ISLAS MONDRAGÓN



Universidad Nacional Autónoma de México
Mérida, 2020

Islas Mondragón, Damián, autor.

Experimentos mentales en ciencias naturales / Damián Islas Mondragón.

Primera edición. | Mérida : Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Peninsular en Humanidades y Ciencias Sociales, 2020. | Serie: Ensayos ; 27.

LIBRUNAM 2080046 | ISBN 9786073029940.

Ciencia - Filosofía. | Física - Filosofía. | Experimentos del pensamiento. | Racionalismo. | Teoría del conocimiento.

LCC Q175.I749 2020 | DDC 501—dc23

Primera edición: 2020

Fecha de término de edición: 3 de febrero de 2020

D. R. © 2020, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Ciudad Universitaria. Alcaldía Coyoacán,
C. P. 04510, Ciudad de México

CENTRO PENINSULAR EN HUMANIDADES Y CIENCIAS SOCIALES
Ex Sanatorio Rendón Peniche
Calle 43 s. n., col. Industrial
Mérida, Yucatán. C. P. 97150
Tels. 01 (999) 9 22 84 46 al 48
<http://www.cephcis.unam.mx>

© Jorge Víctor Torres Barajas, ilustración de portada,
jorgevtorresb@gmail.com

Prohibida la reproducción parcial o total por cualquier medio
sin la autorización del titular de los derechos patrimoniales

ISBN 978-607-30-2994-0

Impreso y hecho en México

Índice

INTRODUCCIÓN	7
1. ALGUNOS EXPERIMENTOS MENTALES	13
1.1. El universo infinito <i>versus</i> el universo finito	14
1.2. La caída de los cuerpos de Galileo Galilei	17
1.3. La cadena de Simon Stevin	21
1.4. El demonio de Maxwell	25
1.5. El elevador de Einstein	29
1.6. La paradoja del gato de Schrödinger	33
1.7. Paradoja EPR	35
1.8. Conclusiones	42
2. EXPERIMENTOS MENTALES: ESTUDIOS PIONEROS	43
2.1. Ernst Mach	43
2.2. Karl R. Popper	47
2.3. Thomas S. Kuhn	50
2.4. Conclusiones: evaluación de las posturas pioneras	53
3. EXPERIMENTOS MENTALES: ANÁLISIS CONTEMPORÁNEOS	57
3.1. El racionalismo de James R. Brown	58
3.2. El empirismo de John D. Norton	60

3.3. El experimentalismo de Roy Sorensen	62
3.4. Conclusiones: evaluación de los análisis contemporáneos	66
4. PRINCIPIOS DE NATURALEZA EMPÍRICA Y TEÓRICO-CONCEPTUAL	67
4.1. Lenguaje observacional <i>versus</i> lenguaje teórico	68
4.2. Procedimientos experimentales	73
4.3. Conclusiones	74
5. REGLAS EVALUATIVAS DE LOS EXPERIMENTOS MENTALES	77
5.1. Conceptos básicos de probabilidad	78
5.2. Los experimentos mentales y la argumentación inductiva	80
5.3. Los experimentos mentales y la argumentación deductiva	89
5.4. Los experimentos mentales y la falsación empírica	92
5.5. Reglas para evaluar experimentos mentales en competencia	95
5.6. Conclusiones	97
CONCLUSIONES GENERALES	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

Introducción

Los llamados experimentos mentales tienen una tradición antigua. Galileo Galilei (1564-1642) ya los utilizaba para contrastar su teoría de la caída libre de los cuerpos con la teoría predominante de su tiempo elaborada por Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.). Albert Einstein (1879-1955) solía recurrir a este tipo de experimentos para apoyar tanto su teoría general como su teoría específica de la relatividad. Erwin Schrödinger (1887-1961) elaboró un experimento mental muy famoso para ilustrar que la teoría cuántica, tal y como la interpretaba Niels Bohr (1885-1962), está en conflicto con algunas de nuestras creencias de sentido común.

Los experimentos mentales no sólo han sido utilizados en distintas áreas de investigación en ciencias naturales como la física, la astronomía o la biología; con frecuencia, también se aplican en diversas áreas humanísticas y sociales como la filosofía, la ética o la historia. En este libro dejaré de lado el análisis de los experimentos mentales surgidos en las áreas humanísticas y sociales para concentrarme en el estudio de este tipo de experimentos en el ámbito de las ciencias naturales.

El primer capítulo está dedicado al análisis de diferentes experimentos mentales que hoy en día se consideran “paradigmáticos” en distintas áreas de investigación de las ciencias naturales.

Los experimentos mentales —en adelante los llamaré EM por sus siglas en español— son, por su condición, no ejecutados, aunque posiblemente ejecutables. Se trata de mecanismos de la imaginación científica que se utilizan para investigar la natura-

leza de diversas entidades, fenómenos, hechos y procesos científicos. La mayoría de las veces, los EM se construyen en una forma narrativa y se acompañan de dibujos y de diagramas. Una de las razones para expresarlos de forma pictórica se debe a que deben visualizarse en el pensamiento.¹

Dado que los EM precisan de un elemento experimental para su conducción, no deben confundirse con la simple acción de reflexionar *sobre* un experimento “real” llevado a cabo en el laboratorio. Tampoco deberían reducirse a la ejecución de experimentos psicológicos sobre el pensamiento ni a la simple formulación de ciertos estados hipotéticos o contrafácticos. Hasta el día de hoy no ha sido posible establecer con precisión y de manera consensuada la naturaleza y función de los EM. Una de las razones es que, a pesar de su importancia en la generación de conocimiento científico, en realidad no han sido suficientemente estudiados. Prueba de ello es que hasta hace relativamente poco tiempo eran escasos los estudios en torno a este tipo de experimentos. Entre estos trabajos pioneros se encuentran los de Ernst Mach (1906 [1896]), Karl R. Popper (1959 [1934]) y Thomas S. Kuhn (1977 [1964]). En el segundo capítulo analizaré las posturas e ideas de cada uno de estos autores, pues contienen el germen de una buena parte de los planteamientos que se han discutido en años recientes sobre el tema.

Como se verá en el segundo capítulo, es significativo que Thomas S. Kuhn (1922-1996), en la década de los sesenta, admitiera que “la categoría de ‘experimento mental’ es demasiado amplia y vaga para poder ser resumida” (Kuhn 1977 [1964], 241)² y que casi cincuenta años después del texto de Kuhn, Melanie Frappier *et al.* hayan reconocido que “no existe consenso sobre el poder cognitivo de los EM, su carácter lógico, la naturaleza de sus contenidos ni una demarcación precisa de las disciplinas en las que pueden ser aplicados” (2013, 1). Ante este panorama podemos

¹ Por supuesto, la forma pictórica de los EM representa algunos problemas filosóficos como son la necesidad de una intención y la suficiencia con que esa intención se logra. Véase al respecto Blumson 2014, 51-66.

² Todas las traducciones del inglés, del alemán y del holandés al español son mi responsabilidad.

preguntarnos, ¿cuáles son las principales razones de que todavía no se haya alcanzado un consenso en torno a estas y otras preguntas fundamentales sobre los EM? Mi hipótesis es que hemos *confundido* la “naturaleza” de los EM y sus posibles “funciones cognitivas” en el interior de una teoría científica particular.

En relación con la naturaleza de los EM, la mayoría de los filósofos interesados en el tema están de acuerdo en que no existe —al menos hasta ahora— una definición precisa y acabada de este tipo de experimentos. Por ejemplo, para Nancy Nersessian “existe tal variedad de EM, que es imposible elaborar una lista de sus aspectos más sobresalientes” (Nersessian 2007, 147). Otros autores con una posición más radical consideran innecesaria una definición de los EM para evaluar la importancia cognitiva de éstos en el desarrollo de la ciencia. Este es el caso de Aspasia Moue *et al.*, quienes después de haber hecho un breve recuento histórico de algunas de las más importantes posturas filosóficas en torno a este tipo de experimentos, concluyeron que lo importante no es preguntarse qué son los EM, sino cómo funcionan al interior de una teoría científica (2006, 73). En esta misma línea argumentativa se encuentra la postura de Martin Bunzl, para quien buscar una definición precisa de los EM no es particularmente esclarecedor (1996, 228). Otros consideran, incluso, que para distinguir los buenos de los malos EM no es necesario saber con exactitud qué son los EM (Peijnenburg y Atkinson 2003, 306). En resumen, varios autores consideran que el debate en torno a la naturaleza de los EM no tiene un impacto directo ni relevante en la generación y utilidad cognitiva inherente a la elaboración de una teoría explícita sobre los EM (Urbaniak 2012, 750).

Una de las discusiones clásicas sobre este tema se ha dado entre la postura racionalista defendida por James R. Brown, el empirismo propuesto por John D. Norton y el experimentalismo sugerido por Roy Sorensen. En el contexto de este debate, Brown ha cambiado de opinión no sólo en relación con la posibilidad de construir una definición precisa de este tipo de experimentos, sino incluso respecto a la utilidad de hacerlo. En sus primeros escritos sobre el tema, Brown se decía “impactado” por la insufi-

cienta discusión sobre qué son y cómo trabajan los EM (1986, 2); a pesar de ello, años más tarde desestimó la importancia cognitiva de construir una definición de este tipo de experimentos: “es difícil decir con precisión qué es un experimento mental, sin embargo, no es importante hacerlo” (Brown 2004a, 25), y sugirió que para definir un EM es necesario conocer varios ejemplos “paradigmáticos” extraídos de la historia de la ciencia.³

Por su parte, el trabajo de Norton tiene la virtud de haber propuesto una definición, al menos tentativa, de los EM. De acuerdo con este autor, los EM son “argumentos pintorescos”, cuyo valor cognitivo “proviene de las premisas introducidas explícita o tácitamente en el experimento mental” (2004b, 1139-1140). Uno de los elementos interesantes de la definición de Norton es que la naturaleza de los EM —su naturaleza argumentativa— contiene en sí misma su “poder” cognitivo: expresar proposiciones verdaderas o falsas implícitas en las premisas.

De acuerdo con Roy Sorensen, los EM se desarrollaron a partir de experimentos “reales”, de manera que representan casos límite. En el tercer capítulo analizaré a detalle las propuestas de estos tres autores y mostraré algunas de sus virtudes y vicios. La elección de analizar el trabajo de estos tres autores responde a que la mayoría de los textos recientes sobre el tema de los EM discuten, de alguna u otra manera, algún punto de sus respectivas posturas.

Las funciones cognitivas de los EM en una teoría científica pueden ser múltiples. Por ejemplo, algunos EM son ideados para suplir ciertos experimentos reales, imposibles de ejecutar, y las causas son múltiples: problemas tecnológicos, impedimentos físicos e incluso constricciones éticas. Otras veces los EM sirven para ilustrar y clarificar situaciones ideales y abstractas; en este caso, cumplen una importante función pedagógica al acelerar el proceso de entendimiento de esas situaciones. Otros EM son

³ Ciertamente, para poder distinguir un EM “paradigmático” del que no lo es, primero es necesario contar con un criterio específico que nos indique cómo hacer tal distinción. Desafortunadamente, Brown no proporciona ningún criterio al respecto. Aquí no me detengo en esta cuestión y únicamente analizo los EM más representativos en las discusiones recientes sobre el tema.

ejemplos de análisis conceptual y ayudan a despejar ciertas paradojas implícitas en la forma de pensar de los científicos; ésta es la posición de Kuhn respecto a los EM. En otras ocasiones, los EM se utilizan para generar evidencia a favor o en contra de una teoría —o parte de ella— que se desea contrastar.⁴ Al respecto, Brown habla de tres tipos de EM: los destructivos, los constructivos y los platónicos; por supuesto, un mismo EM puede cumplir simultáneamente una o más de estas funciones. Como trataré de argumentar a lo largo de este libro, si se logra aislar la naturaleza de los EM y distinguirla claramente de sus funciones cognitivas, podré formular con mayor precisión la relación entre esa naturaleza y el conocimiento que producen.

En el cuarto capítulo defenderé la hipótesis de que, a pesar de que los EM se desarrollan en la mente de los científicos, la mayoría de éstos son formulados a partir de dos principios metodológicos fundamentales para su construcción. El primer principio sugiere la aceptación de una base empírica con la cual se designan ciertas propiedades de las entidades, fenómenos, hechos y procesos observados (y observables) bajo estudio; esta base empírica se expresa mediante un lenguaje observacional previamente aceptado. El segundo principio sugiere la aceptación de una base teórico-conceptual con la cual se designan ciertas propiedades de estas entidades, fenómenos, hechos y procesos científicos inobservados (y potencialmente inobservables) bajo estudio; esta base teórica se expresa mediante un lenguaje teórico previamente aceptado. Dado que el primer *principio* es de *naturaleza empírica*, me referiré a él como PNE, por sus siglas en español. Como el segundo *principio* es de *naturaleza teórico-conceptual*, lo referiré como PNTC.

Mi tesis sostiene que estos dos principios metodológicos posibilitan la identificación del contenido empírico y teórico-conceptual *constitutivo* de los EM y también establecen las herramientas

⁴ Algunos estudiosos del tema han ido todavía más lejos y señalan que un EM puede ser parte de una transformación epistemológica más amplia, la cual atañe a la manera como un área del conocimiento científico concibe el mundo o las leyes que lo gobiernan (véase Potters y Lauridan 2017).

de análisis necesarias para evaluar la confiabilidad epistémica del conocimiento producido por los EM, sobre todo a la luz de la evidencia disponible. No obstante, mostraré cómo la confiabilidad epistémica de los EM puede verse debilitada debido a ciertos problemas surgidos de exclusiones y sesgos cognitivos y metodológicos intrínsecos a la construcción de este tipo de experimentos. En este capítulo haré una evaluación de mi propia tesis utilizando la distinción entre el lenguaje teórico y el lenguaje observacional. El objetivo es evaluar algunas de las consecuencias que esa distinción provoca en la formulación de los PNE y los PNTC, con los cuales, sostengo, se construyen los EM.

En el quinto capítulo revisaré cuáles son las ventajas de evaluar los resultados cognitivos de dos o más EM en competencia, a partir una “regla general de la probabilidad” de la lógica inductiva. Posteriormente, mostraré —utilizando una idea alternativa de “corroboración” empírica propuesta por Theo Kuipers (2000)— que una teoría probabilística cuantitativa de los EM puede explicar la idea de corroboración y de incremento de la probabilidad de un EM dada la evidencia proporcionada por sus resultados cognitivos. Aunque los EM surgen en un estado de incompletitud intrínseco, argumentaré cómo pueden ser considerados hipótesis explicativas y, por ello, pueden ser evaluados a partir de su plausibilidad con relación a los éxitos y fracasos explicativos que exhibe. Las reglas que propongo para evaluar el éxito cognitivo de los EM pretenden ser independientes del debate empirista/teórico-conceptual en el cual se ha enfrascado la discusión sobre el tema en los últimos años. En la última parte del libro, ofreceré algunas conclusiones generales, las cuales pueden inferirse del presente estudio.

1. Algunos experimentos mentales

Existe una gran cantidad de experimentos mentales tanto en las ciencias naturales —sobre todo en la astronomía, la física y la matemática— como en las humanidades y en las ciencias sociales —en particular en la historia, la economía, la ética y la filosofía—.¹

Puedo mencionar varios ejemplos de EM que han sido fundamentales para las ciencias naturales. Uno de los más citados y estudiados es la caída de los cuerpos ideado por Galileo Galilei (1914 [1638]), el cual representa un tipo especial porque no sólo logró socavar la teoría predominante de su tiempo elaborada por Aristóteles, sino que dio impulso a una nueva ley sobre el movimiento de los cuerpos. Simon Stevin (1605) construyó otro de los EM paradigmáticos de la física mecánica conocido como la “cadena de Stevin”; este experimento ayudó a establecer, por primera vez, las leyes que determinan el comportamiento de los cuerpos en un plano inclinado. Por su parte, el denominado “demonio de Maxwell” es un EM en torno a la teoría cinética de los gases, el cual nos muestra que no es posible construir una máquina capaz de ejecutar funciones específicas sin requerir la realización de cierto trabajo. Arquitas, Albert Einstein y Erwin Schrödinger son autores que también se sirvieron de los EM para explicar algunas de sus principales tesis.²

¹ Como mencioné en la introducción general, en este libro me centraré en los experimentos mentales surgidos en las ciencias naturales.

² Dado que el presente libro no es un estudio histórico sobre los experimentos mentales, aquí no rastrearé ni caracterizaré los numerosos ejemplos que pueden encontrarse en la historia de las distintas disciplinas científicas.

A continuación, analizaré siete EM paradigmáticos de las ciencias naturales, los cuales me servirán para desarrollar el argumento que deseo defender a lo largo de este libro.

1.1. EL UNIVERSO INFINITO *VERSUS* EL UNIVERSO FINITO

El pitagórico Arquitas (428 a.C.-347 a.C.), citado en Lucretius (2001), intentó mostrar por medio de un EM que el universo es infinito. Arquitas se preguntó qué pasaría si se lanzara una flecha hacia el “borde” del universo. De acuerdo con el tarentino, los resultados esperados son dos; primero, si la flecha “atravesara” el límite, confirmaría que éste no existe; segundo, si la flecha “rebotara” de cualquier manera contra el borde, demostraría la existencia de algo más allá. En ambos casos, argumentó Arquitas, no existe un borde del universo, por lo tanto, éste debe ser infinito.

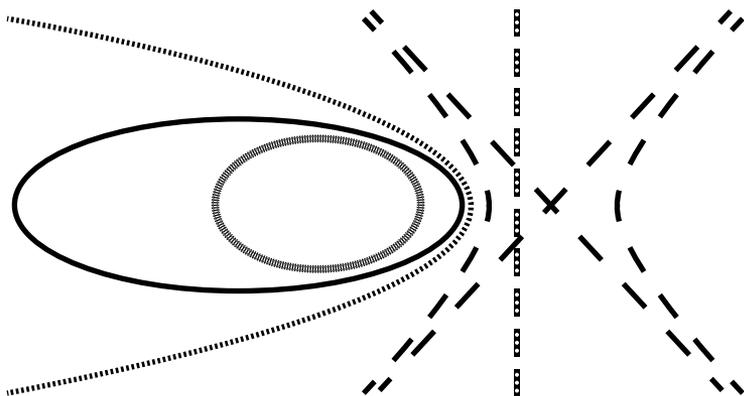


Figura 1. Universo infinito de Arquitas.

Para un recuento de decenas de experimentos mentales, véase Sorensen (1992a). Asimismo, el primer capítulo del libro de Brown ([1991] 2011) está dedicado exclusivamente a caracterizar varios EM que el autor considera centrales para la historia de la ciencia.

Aristóteles formuló un EM para mostrar lo contrario, es decir, la finitud del universo (1941, 5-25). De acuerdo con el griego, la experiencia visual nos indica que los cielos giran en círculo, y como todo cuerpo en rotación debe ser de naturaleza finita, los cielos y el universo también lo son. A partir de este supuesto, Aristóteles infirió —vía un argumento analógico— que como todo movimiento tiene un comienzo, también la distancia recorrida a través del movimiento debe tenerlo. Para mostrar la afirmación, nos invita a imaginar dos líneas paralelas, a saber, ACE y BB. La línea ACE corre de manera infinita hacia la dirección E mientras que la línea BB corre paralela a ACE y de manera infinita en ambas direcciones (véase la figura 2).

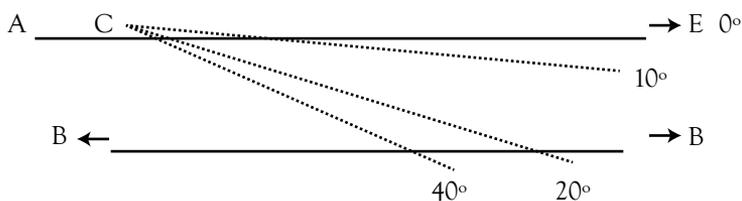


Figura 2. Universo finito de Aristóteles.

Si la línea ACE describe un círculo que gira sobre el punto C como su centro, en su movimiento necesariamente cortará o intersectará la línea BB en algún punto. Dado que el movimiento circular que exhibe ACE debe tener un comienzo, entonces también debe existir un punto específico en el cual la línea ACE intersecta la línea BB por *primera vez*. Sin embargo, determinar ese punto es imposible porque la línea ACE no puede intersectar a la línea BB por *primera vez*. Por ejemplo, no es posible realizar la intersección a los 40 grados de rotación, pues ya la habrá intersectado previamente a los 20 grados; tampoco la línea ACE puede intersectar a la línea BB por primera vez a los 20 grados de rotación, dado que ya la habría intersectado previamente a los 10

grados. Como puede inferirse, es imposible determinar en qué momento y en qué punto específico la línea ACE intersecta por “primera vez” a la línea BB. Debido a lo anterior, si el universo fuera infinito, no podría rotar como “evidentemente” lo hace, por lo tanto, el universo es finito, dice Aristóteles.

Como puede observarse en la representación visual de los dos EM anteriores, ambos conducen a resultados contradictorios entre sí. El primero muestra que el universo es infinito debido a la inexistencia de un borde; el segundo muestra la finitud del universo asumiendo que es imposible determinar el punto preciso donde una línea intersecta a otra por primera vez. Para poder evaluar ambos resultados cognitivos se deben distinguir los presupuestos empíricos y teórico-conceptuales a partir de los cuales se formularon ambos EM. En este sentido, aunque ambos autores están de acuerdo con la existencia del mismo objeto de estudio, esto es, la existencia del universo, no implica que en un nivel más profundo los dos compartan los mismos principios de naturaleza empírica (PNE) y teórico-conceptual (PNTC).³

En el caso de Arquitas, el concepto de “borde” anula la posibilidad de que el universo sea finito. Como esa noción implica “el extremo u orilla de algo”, para imaginar el extremo de cualquier cosa en el mundo “real” se necesita pensar, por un lado, este “algo” existiendo en el espacio y, por el otro lado, se requiere del concepto de “espacio” o de “materia” contiguo a esa orilla para que le dé *sentido* a la noción de “borde”. Dado que en el mundo natural nunca hemos experimentado el borde o el extremo “último” de ninguna cosa, todos los bordes susceptibles de ser imaginados pueden extenderse más allá del límite que marcan.

El EM propuesto por Aristóteles implica la previa aceptación de cierto lenguaje observacional postulado por el autor. Su noción de “universo” está ligado al de un cuerpo que gira en círculo, y como todo movimiento debe tener un comienzo, también

³ Carla Rita Palmerino argumenta algo similar en relación con los debates entre Salvati, Sagredo y Simplicio en los *Dialogues Concerning Two New Sciences* de Galileo (1638 [1914]). De acuerdo con Palmerino, las predicciones de estos tres interlocutores unas veces coincidían y otras veces no, debido a que reflejaban sus propios “compromisos teóricos” (2018, 906).

la distancia recorrida a través del movimiento que describe el universo debe tenerlo. Sin embargo, como es imposible determinar el punto preciso donde dos líneas se intersectan por primera ocasión sin recurrir a una paradoja, Aristóteles concluye que si el universo fuera infinito, éste no podría girar en un círculo como “evidentemente” lo hace. De este presupuesto empírico parte su EM y por lo anterior, el universo debe ser finito.

En resumen, el EM de Arquitas es irrefutable porque lo elaboró a partir de un concepto (PNTC) que imposibilita la concepción de su contraparte. El EM propuesto por Aristóteles está elaborado sobre un supuesto empírico (PNE) que no se cuestiona: el movimiento circular del universo. A partir de ese supuesto tácitamente aceptado, Aristóteles infirió que el universo tiene que ser finito.

Por las razones expuestas, me parece que ambos EM son incomparables al estar elaborados a partir de ciertos presupuestos empíricos y teórico-conceptuales incompatibles. Aunque abordan un mismo objeto de estudio, el universo, sus resultados cognitivos se autojustifican de manera independiente y endógena a cada EM; por ello, en realidad no se trata de dos experimentos en competencia. Una coincidencia demasiado básica no es suficiente para hacer coincidir dos principios: PNE y PNTC. Por supuesto, no se trata solamente de una cuestión cuantitativa, también es importante considerar el aspecto cualitativo. Como se verá más adelante, los distintos presupuestos empíricos y teórico-conceptuales implícitos en la construcción de los EM determinan las distintas maneras de concebir las entidades, fenómenos, hechos y procesos que estudia la ciencia natural mediante este tipo de experimentos.

1.2. LA CAÍDA DE LOS CUERPOS DE GALILEO GALILEI

Como se verá en el siguiente capítulo, Thomas S. Kuhn sostuvo que la principal función de los EM es *reformular* los esquemas conceptuales de los científicos, para lograrlo es necesario confrontar esos esquemas con una paradoja implícita en la manera de

pensar (Kuhn 1977 [1964], 251). Por ello, cuando los resultados cognitivos de un EM señalan una contradicción intrínseca a una teoría específica, se tiende a creer que ese experimento exhibe resultados cognitivos “valiosos”. Éste es el caso del EM conocido como “la caída de los cuerpos”, con el cual Galileo Galilei mostró una contradicción implícita en la teoría del movimiento de Aristóteles.

De acuerdo con Galileo, Aristóteles no compartía la creencia, ya antigua en su época, de considerar el vacío como un prerrequisito necesario para las leyes del movimiento, pues consideraba a éste un fenómeno que hacía insostenible la idea del vacío. Galileo aseguró que Aristóteles nunca ejecutó ningún experimento “real” para mostrar su idea errónea de que los cuerpos con diferentes pesos viajan en el mismo medio a velocidades proporcionales a sus pesos (Galileo 1914 [1638]).

Si una roca pesa diez veces más que otra y ambas caen simultáneamente desde una altura de cien codos,⁴ es posible inferir, razonaba Aristóteles, que cuando la roca más pesada alcance el suelo, la más ligera no habrá caído más que diez codos, es decir, sólo habrá recorrido la décima parte de la distancia de la roca más pesada (Galileo 1914 [1638], 62). Galileo aseguró que él sí ejecutó el experimento de dejar caer simultáneamente, desde una altura de doscientos codos, una bala de cañón de doscientas libras y una bala de mosquete, cuyo peso era de media libra. No obstante, afirmó (en voz de su interlocutor Salvati) que mediante un EM es posible mostrar, aún sin ejecutar el experimento “real”, cómo un cuerpo más pesado no se mueve con mayor rapidez en relación con el cuerpo más ligero.

Supóngase que se tienen dos rocas de tamaños diferentes. En caída libre, la más grande se mueve a una velocidad de ocho codos, mientras que la más pequeña lo hace a una velocidad de cuatro. Ahora supóngase que se conforma un sistema con estas dos rocas al unir las entre sí con una cuerda. Si ambas se dejan

⁴ El codo fue una unidad de longitud antropométrica empleada en muchas culturas y corresponde a la distancia que media entre el codo y el final de la mano abierta.

caer simultáneamente, se puede esperar que la más pequeña retarde el movimiento de la más grande y, así, el sistema completo se movería a una velocidad menor a ocho codos, esto es, a una velocidad menor a la que se mueve la roca más grande por sí sola. Sin embargo, también se puede esperar que el sistema completo se mueva a una velocidad mayor a ocho codos si se considera que las dos rocas unidas constituyen un sistema más grande que cualquiera de las dos aisladas. En resumen, en este sistema, la roca más rápida sería parcialmente retardada por la más lenta, y a su vez, la más lenta sería de alguna manera acelerada por la más rápida. Como puede verse, concluyó Galileo, esta situación hipotética contradice la suposición original de Aristóteles (Galileo 1914 [1638], 63).

El EM le permitió a Galileo inferir que cuando dos cuerpos están en movimiento, el más pequeño unido al más grande no “suma” su peso a este último y consecuentemente no existe un incremento, como sí ocurre cuando ambos cuerpos están en reposo. Galileo concluyó que, contrario a la suposición de Aristóteles, los cuerpos grandes y los pequeños tienen la misma gravedad específica, *independientemente* de su peso, por lo tanto, se mueven a la misma velocidad, alcanzando el suelo al mismo tiempo cuando se los deja en caída libre (Galileo 1914 [1638], 64 y 65).

El éxito del EM de Galileo radica en el supuesto empírico de que existe cierto retardo causado por la roca más pesada, factor no considerado por Aristóteles. Si es verdad que el griego no ejecutó ningún experimento real para establecer sus cálculos (como apuntó Galileo), entonces puede afirmarse que el cálculo de Aristóteles y el EM ideado por Galileo no comparten los mismos presupuestos empíricos (PNE), a pesar de que ambos, como afirma Ana Butkovic “quieren decir la misma cosa con el concepto de más ‘veloz’” (Butkovic 2007, 65).⁵

⁵ Sin embargo, no estoy de acuerdo con Ana Butkovic cuando afirma que como Aristóteles y Galileo se referían al mismo concepto de velocidad, no puede existir inconmensurabilidad entre ambos paradigmas (2007, 66). Ciertamente, el EM de Galileo se relaciona con el concepto de velocidad, pero también, como se ha visto, con el de tamaño y peso. Me parece que la comparación interteórica no puede reducirse a compartir un solo concepto.

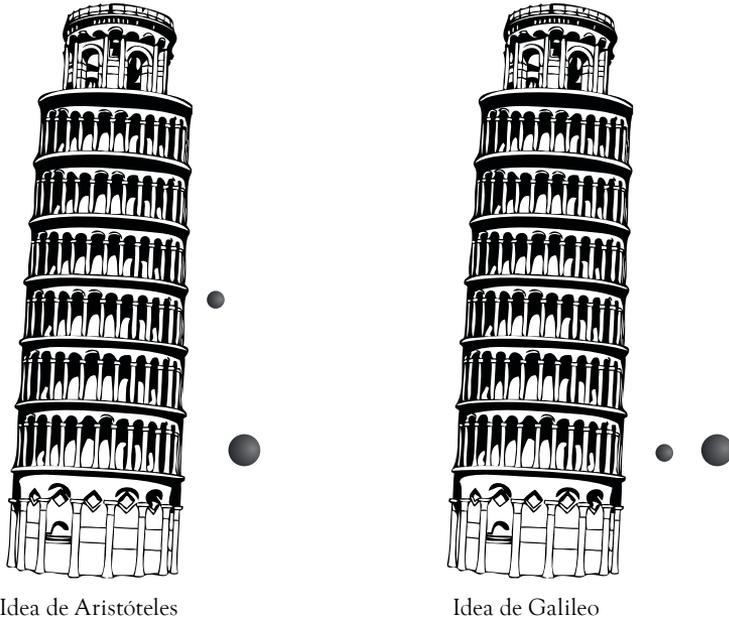


Figura 3. La caída de los cuerpos según Aristóteles y Galileo.

En resumen, la propuesta de Galileo nos induce a pensar que cuando un EM exhibe cierto éxito en la consecución de determinados fines cognitivos —en este caso señalar una contradicción interna a una teoría— es posible considerar el hecho como evidencia suficiente para afirmar que el EM en cuestión es epistémicamente confiable, independientemente de la evaluación de sus PNE y PNTC constitutivos. Esta postura puede denominarse instrumentalista de los EM, cuya razón de ser sería cumplimentar un objetivo cognitivo específico. En el quinto capítulo analizaré si es suficiente considerar los resultados cognitivos de un EM para evaluar su confiabilidad epistémica o si la confiabilidad epistémica de un EM depende de algo más que la exhibición de resultados cognitivos exitosos.

1.3. LA CADENA DE SIMON STEVIN

Uno de los EM más famosos es el conocido como la “cadena” o el “plano inclinado” de Simon Stevin (1548-1620). El experimento ayudó a establecer por primera vez las leyes que determinan el comportamiento de los cuerpos en un plano inclinado, el cual se conforma de una superficie idealmente lisa sin relieves ni elevaciones, es un objeto que contiene infinitos puntos y rectas que conforma con el suelo un ángulo agudo. Una de las funciones de los planos inclinados es facilitar el ascenso y descenso de objetos. También han sido utilizados como cuñas, por ejemplo, una tijera o un cuchillo.

El plano inclinado puede ser visto como una máquina simple donde inciden diversas fuerzas, a saber, la fuerza de gravedad mediante el peso que surge de la magnitud de la masa en dirección vertical cuando se utiliza para elevar objetos; la fuerza de reacción que el plano ejerce sobre los objetos de acuerdo con la tercera ley de Newton: para cada acción siempre existe una reacción opuesta e igual (Newton 1846, 83); y la fuerza de fricción, esto es, la fuerza de rozamiento que ejerce resistencia respecto al sentido del desplazamiento del objeto con relación a la superficie.

Stevin fue un matemático, físico e ingeniero. Algunos historiadores consideran que descubrió —antes de Galileo, su contemporáneo— que la velocidad de los cuerpos es independiente de su peso, como se vio en el EM anterior. Lo cierto es que fue uno de los primeros científicos en distinguir entre los equilibrios estables e inestables y propuso una solución al problema del equilibrio de un cuerpo en un plano inclinado. En su extensa obra *Wisconstighe Ghedachtnissen*, de 1605,⁶ afirmó:

Quando un triángulo tiene su plano perpendicular a la horizontal y su base es paralela a ésta, y si sobre cada uno de los otros lados se coloca un cuerpo esférico del mismo peso, entonces, así como el lado derecho del triángulo es al izquierdo, también lo es la fuerza del cuerpo del lado izquierdo a la fuerza del cuerpo del lado derecho (1605, 37).

⁶ Mejor conocida por su versión en latín como *Hypomnemata mathematica*.

El EM de Stevin para mostrar el equilibrio de los cuerpos en planos inclinados representa una cadena formada por un cierto número de eslabones, la cual es colocada en un soporte prismático como se muestra en la figura 4.

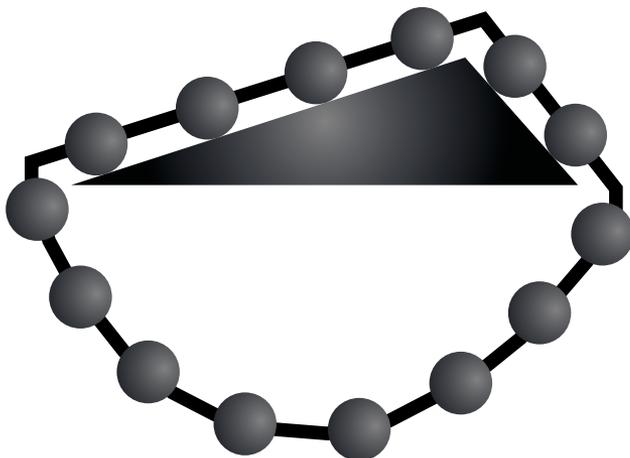


Figura 4. La cadena o plano inclinado de Stevin.

El soporte prismático está conformado por tres planos lisos que van del punto A al punto B, del punto B al punto C y del punto C al punto A; este último conforma la base del prisma (véase la figura 5). El EM ideado por Stevin pretende explicar qué sucede cuando hay una mayor cantidad de eslabones en el lado más corto que va del punto B al punto C del triángulo, en relación con el lado más largo que va del punto A al punto B.

Una posible respuesta es suponer que, debido a la diferencia de pesos, la cadena comenzaría a moverse de la siguiente manera: el tramo AB en dirección ascendente, el tramo BC en dirección descendente y el tramo CA conservará su forma geométrica. Nótese que de ser este el caso, la cadena giraría en el sentido de las manecillas del reloj de manera *perpetua*. Enton-

ces, no sería difícil añadir a esta máquina las ruedas y engranajes necesarios para crear una máquina que sin ningún tipo de combustible se moviera de modo continuo, produciendo trabajo incesantemente. Como se sabe, la creación de una máquina de movimiento perpetuo ha sido uno de los grandes sueños de la física mecánica.

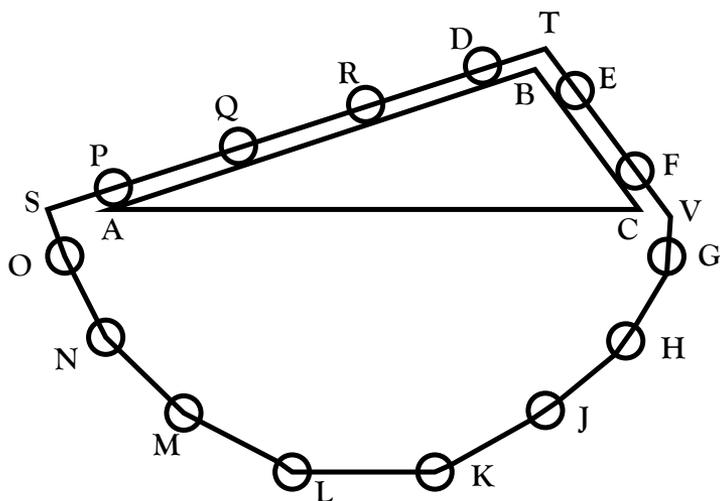


Figura 5. Planos lisos de la cadena de Stevin.

Desafortunadamente, el EM de Stevin mostró que si se relacionan los pesos de los distintos tramos de la cadena y las distintas fuerzas mencionados arriba —la de gravedad, la de reacción y la de fricción— con los elementos geométricos asociados a los planos inclinados —como los catetos, las hipotenusas y los ángulos que conforman un triángulo—, puede predecirse un equilibrio estable del sistema. Este equilibrio se explica a partir de los pesos que descansan sobre cada uno de los lados del prisma, los cuales están en la misma razón que sus longitudes, esto es, 4 a 2, como el número de eslabones de cada lado del prisma. Si se toma en

cuenta la simetría de la distribución de pesos y la suma de las fuerzas actuantes, puede mostrarse, aseguró Stevin, que los pesos deben estar en la misma proporción que las longitudes de los lados del triángulo sobre los cuales reposan en un estado de equilibrio, como se muestra en la figura 6.

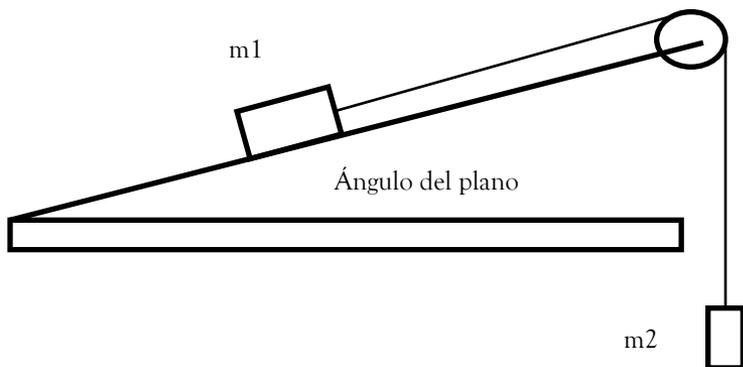


Figura 6. Condición de equilibrio.

Algunos autores afirmaron que el EM de Stevin para mostrar el equilibrio del plano inclinado lleva implícito un compromiso de corte psicológico en su formulación: la imposibilidad de que existan máquinas de movimiento perpetuo (véase, por ejemplo, Brown 2011 [1991], 4). Ernst Mach también aludió a un presupuesto de tipo cognitivo: “No hay duda de que el presupuesto del que parte Stevin, esto es, que la cadena infinita no se mueve, involucra básicamente una cognición instintiva. Él siente —y nosotros con él— que en realidad nunca se ha observado algo parecido a un movimiento perpetuo” (1907, 26).

Sin embargo, me parece que no existen presupuestos psicológicos ni instintivos relevantes en el resultado del EM de Stevin. En realidad, es producto de un cálculo físico y matemático utilizado para medir la distribución de pesos de la cadena a uno y otro lado del prisma, y donde se calculan las distintas fuerzas que intervienen en el sistema. Por supuesto, para la demostra-

ción matemática de la estabilidad del plano inclinado se requiere la elaboración de ciertas ecuaciones de equilibrio y su relación con la ley de la palanca: el producto de la potencia por el brazo de la potencia es igual al producto de la resistencia por el brazo de la resistencia. A su vez, la certeza de esta demostración matemática requiere de la aplicación de la ley de los senos, según la cual la relación de la longitud de un lado del triángulo al seno del ángulo opuesto a ese lado es igual para todos los lados y ángulos en un triángulo dado.

Asimismo, ante la sugerencia escéptica de que los EM con frecuencia pueden ejecutarse empíricamente y corroborarse mediante experimentos físicos, algunos autores han contraargumentado que no es cierto, pues los universos vacíos o los planos sin fricción —como el ideado por Stevin, según la versión de James Brown (2011 [1991], 3)— no pueden reproducirse en el laboratorio. Sin embargo, como se ha sugerido, el EM de Stevin no requiere la suposición de que el plano inclinado no ejerza cierta fricción, por el contrario, la fricción es una de las tres fuerzas —junto con la de gravedad y la de reacción— que deben tomarse en cuenta para predecir el equilibrio estable del sistema. En resumen, puede afirmarse que el EM de Stevin involucra la interacción de los dos principios —PNE y PNTC— con los cuales se muestra el equilibrio del plano inclinado.

1.4. EL DEMONIO DE MAXWELL

La segunda ley de la termodinámica nos dice que la entropía total de un sistema cerrado nunca decrece. Recurriendo a una definición simple del concepto “entropía”, puede entenderse como el grado de desorden de un sistema. También puede considerarse un patrón de medida, es decir, una magnitud termodinámica que mide la parte de la energía no utilizable para realizar trabajo. De acuerdo con James Clerk Maxwell (1831-1879):

Uno de los hechos mejor establecidos en termodinámica es la imposibilidad de producir desigualdad sin la pérdida de trabajo en un

sistema cerrado, en el cual se impida el cambio de volumen y la transferencia de calor y en el cual la temperatura y la presión sean iguales en todo el sistema. Esta segunda ley de la termodinámica es indiscutible si se piensa que sólo es posible manipular cuerpos con masa, esto es, que no tenemos el poder de percibir o manipular las moléculas de manera aislada a partir de las cuales se crea la masa de los cuerpos (Maxwell 1872 [1871], 308).

Maxwell fue un físico escocés conocido por desarrollar la teoría electromagnética clásica. Ideó un EM conocido como “El demonio de Maxwell”, el cual pone a prueba la teoría cinética de los gases. En su época, esa teoría apenas comenzaba a dar frutos de las manos de Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888), Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) y del propio Maxwell.

Como es sabido, la teoría cinética de los gases opera a nivel microscópico mientras que la segunda ley de la termodinámica lo hace a un nivel macroscópico. Al final de su famoso libro *A Theory of Heat* de 1871, Maxwell se preguntó si era posible ordenar las moléculas de un gas de manera que se violara la segunda ley de la termodinámica a un nivel microscópico. Para responder esta pregunta, imaginó una entidad (el famoso demonio), cuyas facultades eran tan precisas que le era posible seguir fácilmente el curso de cada molécula en movimiento. Si esta entidad existiera, razonaba Maxwell, en realidad podría hacer lo que en principio es imposible para nosotros: inventar una máquina que realice diversas tareas sin utilizar ningún tipo de trabajo.

Para elaborar su EM, Maxwell partió de dos presupuestos teóricos-conceptuales (PNTC). El primero es que no todas las moléculas en un gas se mueven a la misma velocidad. Algunas viajan a baja velocidad, mientras que otras lo hacen a velocidades muy elevadas; no obstante, la mayoría viaja a velocidades promedio. El segundo presupuesto es que la temperatura de los gases es susceptible de elevarse mediante cualquier mecanismo capaz de incrementar la velocidad promedio, esto es, a mayor promedio de velocidad, el gas estará más caliente.

Con estos dos presupuestos en mente, imaginemos, dice Maxwell, un demonio que manipula dos contenedores —el con-

tenedor A y el contenedor B—, los cuales están interconectados por un sistema cerrado que llena de gas el sistema. El demonio puede cerrar y abrir el sistema a voluntad y como está capacitado para ver cada una de las moléculas que pasan por él, permite que “sólo las moléculas más ligeras pasen del contenedor A hacia el contenedor B y que sólo las más lentas pasen del contenedor B hacia el contenedor A. De ser esto posible —afirmó Maxwell— el demonio podría incrementar la temperatura del contenedor B y disminuir la temperatura del contenedor A a voluntad; contradiciendo la segunda ley de la termodinámica (1872 [1871], 308 y 309).

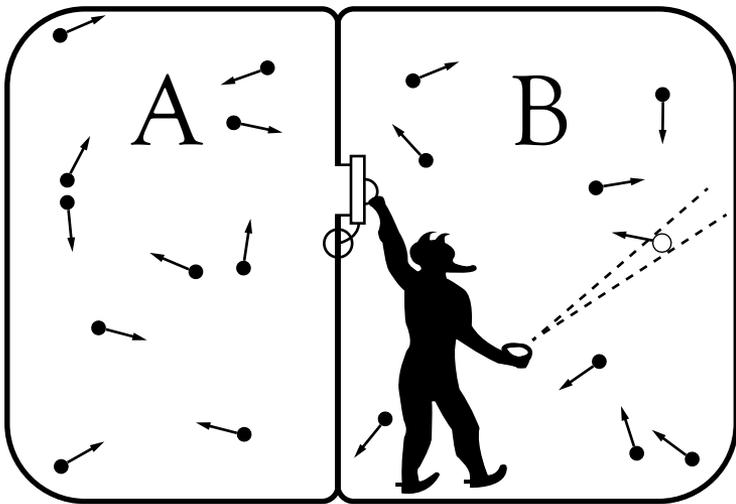


Figura 7. El demonio de Maxwell.

A continuación revisaré a detalle el EM citado. El objetivo del demonio es bombear o transferir calor desde el contenedor más frío hacia el contenedor más caliente y para hacerlo actúa de la siguiente manera: abre el sistema y permite que una molécula

pase y aumente la velocidad molecular promedio del gas caliente mientras que simultáneamente disminuye la velocidad promedio del gas frío. Existen, al menos, dos maneras de hacer lo anterior: a) dejar que las moléculas más rápidas pasen del contenedor con el gas más frío — enfriándolo— mientras se incrementa la temperatura del gas caliente, y b) dejar que las moléculas más lentas pasen desde el contenedor más caliente incrementando la velocidad promedio de aquellas moléculas que se quedan en el contenedor haciendo aumentar su temperatura.

Nótese que un número equivalente de moléculas pasan en ambas direcciones y así las masas del gas caliente y del gas frío permanecen sin cambio. Por lo anterior, el volumen de ambos gases tampoco cambia. Con este mecanismo, el demonio podría disminuir la temperatura del contenedor del gas frío sin tener que conectarlo a un contenedor todavía más frío, esto es, el contenedor mismo conferiría la cantidad de energía requerida para mantener la temperatura del gas frío. Similarmente, el gas caliente rechazaría la suficiente cantidad de calor, manteniendo su temperatura en un valor constante. De esta manera, el calor rechazado por el gas caliente podría ser usado para hacer funcionar una máquina sin la realización ni pérdida de trabajo alguno.

Lamentablemente es imposible crear una máquina con estas características, a pesar del EM propuesto por Maxwell. La razón es que el demonio no puede excluirse del sistema debido a que debe interactuar con las moléculas para poder medir sus respectivas velocidades. La medición realizada por el demonio —o por cualquier mecanismo instrumentalizado del demonio— requiere, por un lado, de un intercambio de energía con las moléculas y, por otro lado, que parte de la energía liberada en el proceso “alimente” al demonio —o al mecanismo instrumentalizado— para que éste pueda trabajar o funcionar. En resumen, el EM de Maxwell nos muestra que tanto el demonio como cualquier mecanismo instrumentalizado *requiere* de energía para realizar su trabajo de selección y medición, por lo tanto, no es posible construir una máquina capaz de realizar funciones específicas sin requerir la realización de cierto trabajo.

1.5. EL ELEVADOR DE EINSTEIN

Albert Einstein (1879-1955) fue uno de los físicos que con más frecuencia recurrió a la formulación de diversos EM:

Los experimentos mentales no pueden ejecutarse a pesar de que posibilitan un entendimiento más profundo de los experimentos reales [...] La ley de la inercia marca el primer gran avance de la física, de hecho, su verdadero comienzo se obtuvo mediante la contemplación de un experimento mental: un cuerpo moviéndose indefinidamente sin fricción y sin ninguna otra fuerza externa actuando. A partir de este ejemplo, y posteriormente de otros más, puede reconocerse la importancia de los experimentos mentales creados con el pensamiento (Einstein e Infeld 2014 [1938], 8 y 226).

Uno de los EM más conocidos es el llamado “elevador” de Einstein. Con él, el afamado físico pretendió mostrar que, de acuerdo con la teoría general de la relatividad, tanto los rayos de luz como los cuerpos proyectados a través de un campo gravitacional experimentan una curvatura en su trayectoria (Einstein 1920, 127). De acuerdo con Einstein, en todos los experimentos mecánicos —sin importar su tipo— lo primero que debe hacerse es determinar con precisión la posición de un punto de referencia material en un momento específico. Como la determinación de la posición de este punto material necesariamente tiene que ser descrita en relación con un marco de referencia, éste debe estar conectado a la Tierra según las leyes de la mecánica. A este marco se le conoce como “sistema coordinado”, respecto al cual todas nuestras observaciones tienen una referencia.

El problema de formular leyes físicas válidas para cada sistema coordinado —es decir, para los que se mueven uniformemente y para los que se mueven de manera arbitraria— se resolvió mediante la llamada “teoría general de la relatividad”, mientras que la “teoría especial de la relatividad”, elaborada previamente por Einstein, sólo era aplicable a los sistemas inerciales. Por supuesto, las dos teorías no pueden contradecirse entre sí porque

deben incluirse las leyes de la teoría especial de la relatividad en las leyes generales de los sistemas inerciales.

Como se sabe, uno de los principales problemas para el desarrollo de la teoría general de la relatividad consistió en vincularla con dos problemas centrales: la gravitación y la geometría. Para resolver ambos, Einstein nos invitó a imaginar un sistema coordinado en el cual la ley de la inercia es válida, esto es, un sistema donde todos los cuerpos preservan su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta a menos que sean obligados a cambiar de estado por alguna fuerza que actúe sobre ellos (primera ley de Newton).

El EM de Einstein propone un elevador atado a una cuerda, la cual lo levanta verticalmente con una fuerza constante. Como las leyes de la mecánica son válidas en este sistema coordinado, el elevador entero se mueve con una aceleración constante hacia arriba. Ahora supóngase, nos dice Einstein, que dos personas observan el evento, una desde el interior del elevador y otra desde el exterior. Para la persona que observa desde el exterior, el sistema coordinado es inercial y se mueve con una aceleración constante debido a que una fuerza constante actúa sobre éste. Para la persona que observa desde el interior del elevador, todos los cuerpos sobre los que ninguna fuerza está actuando se encuentran en reposo. De esta manera, si se deja caer un cuerpo libremente, pronto chocará con el piso del elevador debido a que ese piso se mueve hacia arriba en dirección a cualquier cuerpo que se deje caer libremente. Asimismo, si una persona al interior del elevador brincara, el piso del elevador también lo alcanzaría. Por lo anterior, para la persona que observa desde el interior no existe razón alguna para creer que el elevador está en movimiento absoluto. En otras palabras, para este observador interno, los objetos soltados caen libremente porque el elevador entero constituye un campo gravitacional.

De acuerdo con Einstein, ambas explicaciones —la de la persona que observa el fenómeno desde el interior del elevador como la de la persona que observa desde el exterior— son consistentes, por lo tanto, no existe posibilidad alguna de determinar

cuál es la correcta. En otras palabras, cualquiera de estas posturas describe y explica el mismo fenómeno adecuadamente, una mediante el movimiento no uniforme y la ausencia de un campo gravitacional y la otra, mediante su presencia.

Para poder decantarse por alguna de las dos explicaciones, Einstein imaginó otro EM: un rayo de luz entra en el elevador con una trayectoria horizontal a través de uno de sus lados y alcanza el lado opuesto después de un breve lapso de tiempo. De acuerdo con quien observa este nuevo fenómeno desde el exterior del elevador y asume que éste tiene un movimiento acelerado, el rayo de luz ingresa al elevador y se mueve horizontalmente a través de una línea recta a una velocidad constante en dirección a la pared opuesta. Dado que el ascensor se mueve hacia arriba, durante el pequeño lapso de tiempo que tarda el rayo de luz en entrar al elevador y alcanzar el lado opuesto, el elevador cambia de posición provocando que el rayo de luz choque con un punto no exactamente paralelo al punto desde el cual entró. Este punto de choque estaría un poco más abajo. La diferencia entre el punto de entrada y el punto donde llega la luz en la pared opuesta es mínima, pero existente; por lo tanto, el rayo de luz viaja, de manera relativa al elevador, no a lo largo de una línea recta, sino a lo largo de una línea ligeramente curvada. La diferencia entre el punto de entrada y el punto de salida se debe a la distancia recorrida por el elevador durante el tiempo que el rayo de luz cruzó de un extremo a otro (véase la figura 8).

Por otro lado, de acuerdo con quien observa este fenómeno desde el interior del elevador y considera que un campo gravitacional actúa sobre todos los objetos del interior, no existe un movimiento acelerado del elevador, sólo la acción de ese campo. Como un rayo de luz no tiene peso, no resulta afectado por la gravitación y si se envía en una dirección horizontal a través del elevador, alcanzará un punto exactamente opuesto al de entrada. De acuerdo con Einstein, este presupuesto teórico es incorrecto debido a que un rayo de luz tiene energía y la energía posee masa. Y como a toda masa inercial la atrae un campo gravitacional en virtud de que las masas inerciales y las masas gravitacionales

son equivalentes, el rayo de luz necesariamente se curvará en un campo gravitacional exactamente igual como lo haría un cuerpo si se le lanza horizontalmente con una velocidad equivalente a la de la luz.

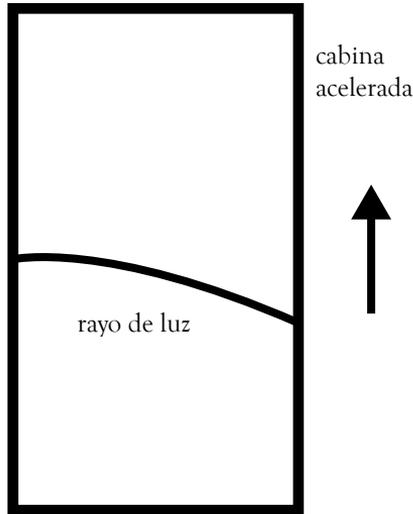


Figura 8. El elevador de Einstein.

Dado que el campo gravitacional de la Tierra es demasiado débil como para “doblar” los rayos de luz, es difícil comprobar mediante un experimento “real” la curvatura de la luz. Sólo los experimentos ejecutados durante los eclipses pueden mostrar —aunque de manera indirecta— la influencia de un campo gravitacional sobre el camino recorrido por un rayo de luz. De aquí la importancia del EM ideado por Einstein, con el cual, aseguó:

Los fantasmas del movimiento absoluto y de los sistemas coordinados inerciales pueden ser expulsados de la física y, así, construirse una nueva física relativista. Nuestro experimento mental muestra cómo el problema de la teoría general de la relatividad está íntima-

mente conectado con la teoría gravitacional y por qué la equivalencia de la masa gravitacional e inercial es esencial para esta conexión. La solución del problema de la gravitación que ofrece la teoría general de la relatividad debe diferir de la solución que elaboró Newton al respecto. Las leyes de la gravitación —así como las leyes naturales— deben formularse para todos los sistemas coordinados posibles, mientras que las leyes de la mecánica clásica tal y como las formuló Newton tienen validez únicamente para los sistemas inerciales coordinados (Einstein e Infeld 2014 [1938], 235).

1.6. LA PARADOJA DEL GATO DE SCHRÖDINGER

El experimento mental conocido como “La paradoja del gato”, ideado por el físico austriaco Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961), representa un caso negativo de EM porque pretende mostrar que ciertos compromisos ontológicos contradictorios al interior de una teoría científica pueden conducirnos a ciertas paradojas. Imagínese, nos dice Schrödinger, un gato encerrado en una cámara de acero junto a una sustancia radiactiva y un dispositivo, y estos dos elementos están al margen de la interferencia directa del gato. El dispositivo es un contador Geiger en el cual hay una sola partícula de la sustancia radiactiva con una posibilidad 0.5 de desintegrarse en un tiempo determinado. Cuando uno de los átomos se desintegra, el tubo del contador se descarga y con un martillo rompe un frasco que contiene ácido cianhídrico, liberando el veneno y matando al gato. Al cumplirse este tiempo, determinado previamente, la probabilidad de que el dispositivo se haya activado es de 0.5 y la probabilidad de que el dispositivo no se haya activado y el gato siga con vida tienen el mismo valor.

De acuerdo con este experimento, la descripción correcta del sistema en el momento en que el tiempo determinado concluye, corresponde al resultado de la superposición de los estados “vivo” y “muerto” del gato. Es decir, el sistema expresaría esta situación teniendo al gato simultáneamente vivo y muerto, mezclado o embarrado en partes iguales (Schrödinger 1935, 812) (véase la figura 9).

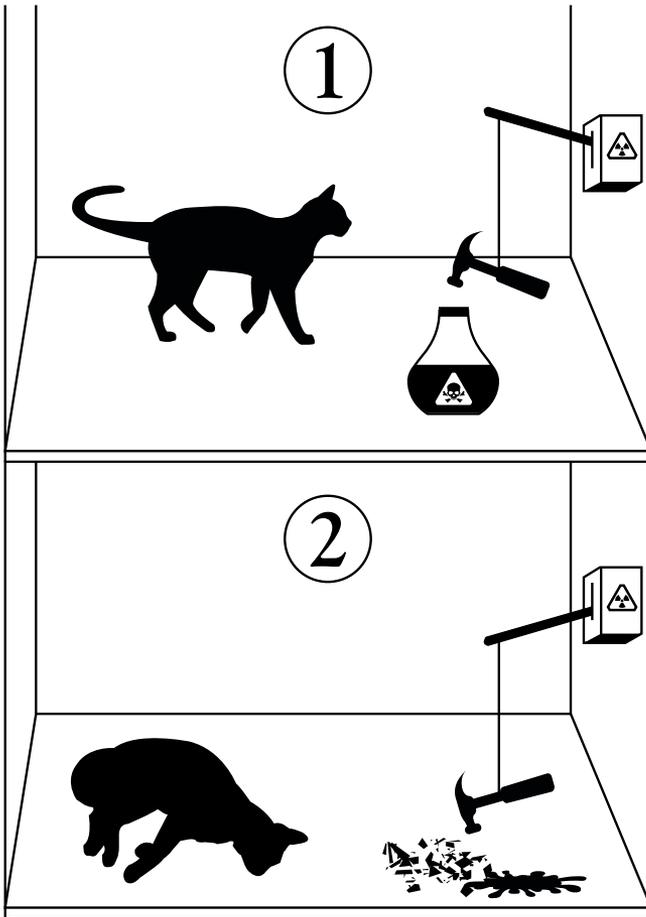


Figura 9. Paradoja del gato de Schrödinger.

Por supuesto, una vez que la cámara se abre, puede ser “corroborado” el estado actual del gato: si sigue vivo o muerto. Con este EM, Schrödinger pretendió mostrar que la teoría cuántica, tal y como la interpretó Niels Bohr, está en conflicto con algunas de las creencias de sentido común que tenemos respecto a los objetos macroscópicos, por ejemplo, los gatos no pueden estar simultáneamente muertos y vivos como parecería aceptar la

interpretación de Copenhague que defendió Bohr. Schrödinger sostuvo que, de acuerdo con esta interpretación, el gato estaría simultáneamente vivo y muerto *hasta* que alguien lo observara al interior de la cámara de acero. Después de que alguien “mira” en el interior del sistema se puede afirmar con certeza si efectivamente está vivo o muerto. De acuerdo con Schrödinger, este EM muestra que la teoría cuántica de Bohr contiene una paradoja intrínseca irresoluble y, por lo tanto, también sería incompleta. En el siguiente EM profundizaremos en esta cuestión.

1.7. PARADOJA EPR

La premisa central de la que parte el EM conocido como “Paradoja EPR” —por las siglas de sus autores Albert Einstein (1879-1955), Boris Podolsky (1896-1966) y Nathan Rosen (1909-1995)— es que, si cada uno de los elementos de la realidad tiene su contraparte en una teoría física, entonces se cumple la condición de completitud de la teoría. Ahora bien, como los elementos de la realidad no pueden estar determinados de manera *a priori*, entonces deben determinarse a partir de los resultados de la experimentación y de la medición científicas. En otras palabras, la realidad exhibe ciertas propiedades que son susceptibles de ser descubiertas mediante la experimentación y medición científicas, en este caso, la física.

El *criterio o principio de realidad*, postulado por EPR, asegura que si puede predecirse con certeza —con una probabilidad igual a la unidad— el valor de una magnitud física específica sin perturbar ningún sistema, entonces *existe* un elemento de la realidad que *se corresponde* con esa magnitud. Aunque ésta no es una condición exhaustiva ni necesaria para determinar todas las maneras con las cuales es posible conocer la existencia de alguna entidad, fenómeno, hecho o proceso físico, sí constituye una condición suficiente para este fin (Einstein *et al.* 1935, 777). Con estas premisas en mente, analizaré el EM de EPR.

La descripción que hace la mecánica cuántica del comportamiento de una partícula libre está basada en el concepto de

“estado”, éste supuestamente se caracteriza de manera *completa* por la función de onda ψ , la cual representa una de las variables elegidas para describir el comportamiento de dicha partícula. Si existe un operador A que se corresponda con cada una de las magnitudes físicas observables y si ψ es una autofunción del operador A , esto es, si:

$$(I) \psi \equiv A\psi = a\psi$$

donde a es un número, entonces la magnitud física A tiene con *certeza* el valor a siempre y cuando la partícula se encuentre en el estado dado por ψ . De acuerdo con el principio de realidad establecido más arriba por EPR, a toda partícula en el estado dado por ψ para la cual la ecuación (I) según sea el caso, le corresponde un elemento de la realidad que hace referencia a la magnitud física A .

Sin embargo, de acuerdo con la mecánica cuántica, la probabilidad relativa de que una medición resulte entre a y b es:

$$(II) P(a, b) = \int_b^a |\psi|^2 dx = \int_b^a dx = b - a$$

Y como la probabilidad es independiente de a y más bien depende de la diferencia entre $b - a$, resulta que todos los valores de la coordenada son *igualmente probables*. Por ello, no es posible asignarle un valor definitivo a la coordenada y , por lo tanto, el valor de una partícula no es predecible para la mecánica cuántica.

Se ha argumentado que dicho valor podría obtenerse a partir de una medición directa. No obstante, una medición de este tipo perturbaría la partícula y alteraría su estado, es decir, una vez que se determinara la coordenada de la partícula, ésta no permanecería en el estado determinado por ψ . Esto significa que cuando el *momentum* (o cantidad de movimiento o impulso) de una partícula se conoce, sus coordenadas no exhiben más una realidad determinable (Einstein *et al.* 1935, 778).

Por lo anterior, EPR argumentaron que si los operadores correspondientes a dos magnitudes físicas son inconmutables (A y B ,

por ejemplo), esto es, si $AB \neq BA$, entonces el conocimiento preciso de uno de estos factores imposibilita el conocimiento del otro porque si ambas magnitudes son simultáneamente reales —y por ello tienen valores definitivos— sus valores podrían ser descritos de acuerdo con la condición de completitud de la teoría. En otras palabras, si la mecánica cuántica pudiera construir una descripción completa de la realidad, entonces contendría estos valores definitivos y predecibles. Al no ser este el caso, EPR sostienen que 1) la descripción de la realidad obtenida por la función de onda de la mecánica cuántica es incompleta o bien, 2) cuando los operadores correspondientes a dos magnitudes físicas son inconmutables, las dos magnitudes no pueden ser simultáneamente reales (Einstein *et al.* 1935, 778) (véase la figura 10).

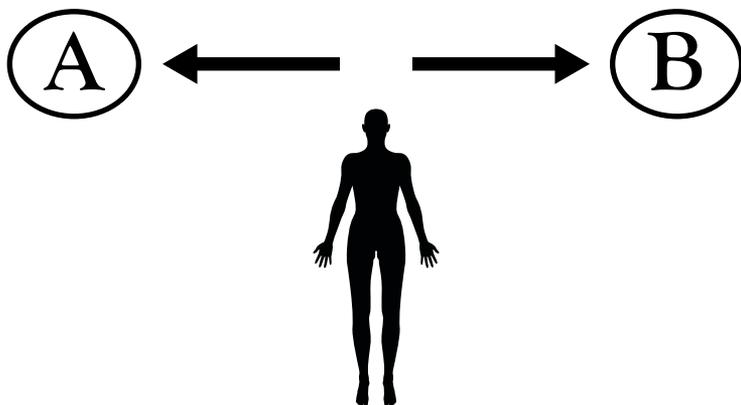


Figura 10. EPR.

Como es sabido, la mecánica cuántica usualmente asume que la función de onda sí contiene una descripción completa de la realidad. Sin embargo, EPR afirmaron que esta asunción conduciría a una contradicción si se considera el criterio o principio de realidad que he caracterizado más arriba. Al respecto, EPR inten-

taron mostrar los siguiente: si se niega que la función de onda es incapaz de ofrecer una descripción completa de la realidad (caso 1), entonces debe negarse que dos magnitudes físicas con operadores inconmutables no pueden tener una realidad simultánea (caso 2). De acuerdo con EPR, el caso 2 no puede negarse pues es posible mostrar que dos funciones de onda con operadores inconmutables *pueden* pertenecer a la misma realidad (Einstein *et al.* 1935, 779-780). Por lo tanto, concluyen EPR, en el caso 1, la descripción cuántica de la realidad a partir de una función de onda es incompleta.

Niels Bohr escribió (1935) lo que se conoce actualmente como una réplica al artículo de Einstein, Podolsky y Rosen, la cual también se publicó en *Physical Review* algunos meses después de la publicación del artículo de Einstein *et al.* En su réplica, Bohr argumentó que la aparente “contradicción” a la que apelan EPR sólo pone al descubierto la inadecuación del punto de vista habitual asumido en la filosofía natural respecto a la explicación racional del tipo de fenómenos físicos involucrados en la mecánica cuántica. De acuerdo con Bohr, la interacción entre un objeto y la manera de medirlo —condicionada por la existencia de la acción cuántica, esto es, por la imposibilidad de controlar la reacción de un objeto que se está midiendo con un instrumento científico— implica la necesidad de renunciar al concepto de “causalidad” tal y como lo concibe la física clásica (1935, 697). Por lo anterior, Bohr aseguró que el principio de realidad de EPR es ambiguo. A continuación, analizaré a detalle el argumento del físico danés.

En su artículo, Bohr nos pide imaginar una partícula que pasa a través de la hendidura en un diafragma. Incluso si se supiera la posición del diafragma en relación con el marco espacial antes de la primera medición del *momentum* de la partícula —y a pesar de que su posición se fijara con precisión después de la última medición—, debido al desplazamiento incontrolable del diafragma durante cada proceso de colisión, estaríamos imposibilitados para conocer la posición exacta de la partícula al pasar a través de la rendija.

Una estrategia alterna implicaría, por un lado, medir el *momentum* de la partícula y, por otro lado, determinar su posición inicial, relativa al resto del sistema. Sin embargo, como en el primer caso es necesario hacer una segunda determinación del *momentum* del diafragma, esta cuestión nos imposibilitaría conocer la posición exacta de la partícula al pasar por la hendidura. En el segundo caso, dado que es necesario determinar la posición relativa del diafragma en relación con el marco espacial, esto nos impediría precisar el *momentum* de intercambio entre el diafragma y la partícula (Bohr 1935, 698). En otras palabras, si se determina el *momentum* del diafragma, entonces no es posible saber su posición exacta. Y por el contrario, si se determina la posición exacta de una partícula en relación con un marco espacial particular, inevitablemente se pierde la posibilidad de conocer el *momentum* intercambiado entre el diafragma y la partícula.

De acuerdo con Bohr, el ejemplo anterior muestra que la mecánica cuántica no está describiendo de manera incompleta diferentes elementos de la realidad en detrimento de la descripción de otros. En realidad, se trata de la discriminación racional entre diferentes arreglos experimentales ideados para el uso no ambiguo de la idea de posición espacial o para la aplicación legítima del teorema de la conservación del *momentum*. Bohr argumentó que la naturaleza de la teoría cuántica nos imposibilita controlar con precisión —en cada arreglo experimental— la reacción de los objetos en el proceso de medición, es decir, controlar la transferencia del *momentum* en el caso de la medición de la posición espacial y del desplazamiento en el caso de la medición del *momentum*.

Por lo anterior, Bohr sostuvo que la comparación entre la mecánica cuántica y la mecánica clásica es esencialmente *irrelevante* para el caso que nos ocupa. No es que la mecánica cuántica “ignore” el valor de ciertas magnitudes físicas y que, por ello, describa la realidad de manera incompleta, como argumenta Einstein en una carta dirigida a Popper y reproducida en *The Logic of Scientific Discovery* (Popper 1959 [1934], 483). En realidad, afirmó Bohr, la mecánica cuántica está “imposibilitada” para determi-

nar estas magnitudes, desde sus propios postulados no clásicos, de una manera no ambigua (Bohr 1935, 699).

A partir de estas premisas, Bohr sostuvo que el criterio o principio de realidad propuesto por EPR contiene una ambigüedad en relación con el significado de la expresión “sin perturbar el sistema”.⁷ Bohr argumentó que, si bien puede no haber una “perturbación”, sí existe una “influencia” en las condiciones que determinan los posibles tipos de predicciones vinculados al comportamiento futuro del sistema que se mide. Dado que estas condiciones constituyen un elemento *inherente* a la descripción de cualquier fenómeno en el cual el término “realidad” puede ser adjudicado apropiadamente, el argumento de EPR no logra justificar su conclusión: la mecánica cuántica elabora una descripción incompleta de la realidad (Bohr 1935, 700).

Nótese que ambas posturas —la que sostienen EPR y la que defiende Bohr— en el fondo se relacionan con distintos compromisos de índole ontológico y epistémico que están en la base de cada posición y que determinan sus distintas “visiones del mundo”. La postura antirrealista de Bohr afirma que es *inevitable* la influencia ejercida por el procedimiento de medición sobre las condiciones implícitas en la descripción que hace la mecánica cuántica del comportamiento de una partícula. Por su parte, la postura realista de EPR afirma que, considerando la influencia mencionada, la descripción que ofrece la mecánica cuántica sobre el comportamiento de una partícula está incompleta porque toda descripción debería ser “independiente” del sistema que describe. En este sentido, la necesidad de discriminar en cada arreglo experimental entre aquellas partes del sistema físico que deben ser consideradas “instrumentos de medición” y aquellas que deben considerarse los “objetos” bajo investigación, constituyen una distinción esencial entre las descripciones de los fenómenos físicos desde la física clásica y desde la mecánica cuántica, respectivamente.

⁷ Recuérdese que este criterio sugiere que, si es posible predecir algo, entonces este “algo” debe existir en la realidad (Einstein, citado por Popper en 1959 [1934], 484).

De acuerdo con Bohr, esta discriminación a la que aluden EPR es un asunto de “conveniencia”. Así, mientras que en la física clásica la distinción entre “objeto” y “medición” no tiene ninguna implicación seria para la descripción del fenómeno físico bajo investigación, en la mecánica cuántica esta distinción es fundamental. El problema surge, entonces, de la intención de utilizar conceptos de la física clásica en la interpretación cuántica de las mediciones, incluso a sabiendas de que la física clásica es “insuficiente” para explicar los nuevos tipos de regularidades involucradas en la física atómica (Bohr 1935, 701). En otras palabras, lo que argumenta Bohr es que la utilización de ciertos conceptos de la física clásica estaría detrás de la imposibilidad que muestra la mecánica cuántica para determinar el valor de algunas magnitudes físicas de una manera no ambigua.

En resumen, el debate entre EPR y Bohr respecto al de causalidad, tal y como se entiende desde la perspectiva de la mecánica cuántica, nos obliga a realizar una revisión radical de nuestra actitud hacia el problema de la realidad. Ciertamente, el dilema realista/antirrealista del comportamiento de una partícula, implícito en la discusión entre EPR y Bohr, difícilmente puede resolverse a partir de una comparación de los compromisos ontológicos y epistemológicos de cada una de estas posturas. Pretender evaluar la postura antirrealista de Bohr desde los principios aceptados por la postura realista de EPR, simplemente es improcedente. Pretender hacer lo contrario, esto es, evaluar la postura realista desde los principios antirrealistas defendidos por Bohr tampoco tiene pertinencia.

En resumen, ambas concepciones asumen una postura realista mínima al estar de acuerdo en la existencia de ciertas entidades —las partículas— susceptibles de ser medidas. El desacuerdo surge cuando EPR afirma que toda descripción debe ser independiente del sistema que describe; pues por su lado, la mecánica cuántica afirma que, debido a la influencia del procedimiento de medición en las condiciones implícitas a la descripción del comportamiento de estas partículas, es imposible determinar las magnitudes de una manera no ambigua. Como estas con-

diciones constituyen un elemento inherente a la descripción de cualquier entidad, en relación con la cual el término realidad adquiere sentido, los criterios con los que se aprehende la realidad deberían ser reevaluados.⁸

1.8. CONCLUSIONES

Como se ha visto hasta aquí, los principios de naturaleza empírica (PNE) y teórico-conceptual (PNTC), implícitos en la construcción de estos y otros EM, así como las implicaciones ontológicas y epistemológicas de estos dos principios, han conducido a que sus inventores se enfrasquen en diversas controversias de índole metafísica, metodológica y de visiones del mundo. Desde el punto de vista filosófico, una de las consecuencias más serias, derivadas de estas controversias, es que hasta el día de hoy no ha sido posible establecer con precisión cómo deben evaluarse dos o más EM en competencia, esto es, de manera no aislada.

Una de las causas de este disenso radica en que, a pesar de la importancia de los EM para generar conocimiento científico, en realidad no han sido suficientemente estudiados. Prueba de ello es que hasta hace relativamente poco tiempo eran muy escasos los estudios en torno a este tipo de experimentos. Entre los trabajos pioneros pueden mencionarse los de Ernst Mach, Karl R. Popper y Thomas S. Kuhn. En el siguiente capítulo analizaré las posturas e ideas de cada uno de estos autores para tener presente los elementos valiosos que aportaron al análisis filosófico de los EM.

⁸ Para un debate actual sobre el tema, véase Proietti *et al.* 2019.

2. Experimentos mentales: estudios pioneros¹

A pesar de que los científicos de todas las épocas han recurrido a los experimentos mentales, en realidad son un tópico poco estudiado desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia. Entre los trabajos filosóficos pioneros puedo mencionar el de Ernst Mach (1906 [1896]), Karl R. Popper (1959 [1934]) y Thomas S. Kuhn (1977 [1964]). En este capítulo analizaré las posturas e ideas de cada uno de estos autores, pues contienen el germen de varios de los planteamientos filosóficos que se han venido proponiendo en años recientes sobre el tema.

2.1. ERNST MACH

Ernst Mach (1838-1916) fue uno de los primeros filósofos interesados en el tema de los “gedankenexperimenten” o experimentos mentales. El primer artículo de Mach sobre este tema apareció en enero de 1896.² De acuerdo con Mach, dado que cada uno de los pasos de un investigador está guiado por el razonamiento, a todos los experimentos “reales” ejecutados en

¹ Un estudio preliminar de este capítulo se publicó en *Revista Portuguesa de Filosofia* (Islas 2018).

² Me refiero a su capítulo titulado “Über Gedankenexperimente. *Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht*”, incluido después en *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth, 1906 [1896], 181-200. Sin embargo, su posición al respecto está esparcida en toda su obra.

el laboratorio los antecede un conjunto de pensamientos. Visto desde esta perspectiva, todo experimento real es la *continuación* natural de un EM.

No obstante, a pesar de que la mayoría de los experimentos reales están guiados por una teoría, no todos requieren ser ejecutados en el laboratorio. De hecho, los resultados cognitivos de un EM pueden ser tan decisivos y definitivos, sostuvo Mach, que la ejecución de un experimento real puede llegar a ser innecesaria o, incluso, superflua (1906 [1896], 188). Esta afirmación puede ser seriamente cuestionada, pues implica saber *a priori* que los presupuestos empíricos (PNE) y teórico-conceptuales (PNTC), utilizados en la construcción de un EM, son correctos. Notemos que, de manera implícita, Mach defiende una especie de inferencia a la mejor explicación de los EM³ porque acepta que el éxito de los resultados cognitivos de un EM es suficiente para evaluar su confiabilidad epistémica.

De acuerdo con él, la decisión de cuándo es o no necesario ejecutar un experimento “real” que apoye los resultados cognitivos alcanzados por un EM no es una decisión arbitraria del investigador; depende de los resultados cognitivos que pueden inferirse de manera válida del EM. En otras palabras, la postura de Mach plantea que la necesidad de ejecutar un experimento real es directamente proporcional al grado de incertidumbre de los resultados cognitivos arrojados por el EM; pero aún más importante, su afirmación supone que los resultados cognitivos de los EM pueden previsualizarse en el pensamiento.

Para Mach, todos los seres humanos tenemos una inclinación instintiva a ejecutar experimentos reales. En este sentido, los EM surgen en un nivel intelectual “más alto” que los experimentos reales (1906 [1896], 186). Para que un EM se elabore en la mente de un científico, éste primero debe imaginar y concebir ciertas circunstancias asociadas a una idea o suposición. Los conceptos con los que se articulan estas circunstancias en el pensamiento

³ Algunos autores contemporáneos han continuado esta línea argumentativa de los EM como argumentos a la mejor explicación. Véase al respecto Borge y Mettini (2018).

deben ser buenas “copias” de los hechos reales que acaecen en el mundo natural. Un EM sólo surge cuando las ideas de los científicos *representan* de la “mejor manera” los hechos físicos.⁴

Para Mach, el lenguaje es el instrumento mediante el cual estas ideas y conceptos representan de manera genuina los hechos naturales. Así entendido, este autor concibe el lenguaje no sólo como un receptáculo de nuestra experiencia, preservada en la memoria, sino también como un puente entre nuestro mundo natural y las ideas con las que lo concebimos. Por ello, los resultados cognitivos de los EM dependen de la *experiencia práctica* del investigador que los formula. Como puede verse, la postura intelectualista de Mach se basa en una postura empirista, al menos en relación con los EM.

Este autor aseguró que el método básico de los EM es el mismo que el de los experimentos reales ejecutados en el laboratorio, es decir, el de la *variación* (1906 [1896], 191). A mayor variación, mayor consistencia de los EM. Al modificarse continuamente las circunstancias y las ideas relacionadas con ellas, implícitas en los EM, este tipo de experimentos incrementa su rango de validez. Por ello, la causa de que un EM no produzca resultados cognitivos definitivos no se encuentra en sí mismo, sino en la impericia del investigador que no supo asociarlo con precisión a las circunstancias “apropiadas”. No obstante, cuando este es el caso, no estamos ante un EM, sino ante una simple “conjetura” que se sitúa en algún punto intermedio entre un EM y un experimento real (Mach 1906 [1896], 194).⁵

En resumen, Mach sostuvo que si un EM no produce los resultados cognitivos esperados no se debe a la *naturaleza* de éste, sino a una falla asociativa del investigador que lo elabora. Como puede verse, su postura presupone que los EM son herramientas heurísticas potencialmente infinitas. En su postura está impli-

⁴ De acuerdo con Mach, la diferencia entre un *investigador* de la ciencia y un *inventor* es que las circunstancias que “conciben” estos últimos no necesariamente están ligadas a la realidad por algún medio (Mach 1906 [1896], 186).

⁵ No obstante, las conjeturas, de acuerdo con Mach, pueden representar procedimientos metodológicamente adecuados para la ciencia y frecuentemente son las únicas disponibles para acceder a la “forma” del experimento real.

cita la idea de que un EM puede explicar todas las entidades, fenómenos, hechos y procesos científicos que están —o pueden estar— en su espectro explicativo. Lo que se requiere para potenciar la capacidad de los EM es adecuarlos “correctamente” a las circunstancias apropiadas. Si un EM no logra explicar todos estos aspectos se debe a la limitación cognitiva de los científicos y no a la naturaleza de este tipo de experimentos.

Ahora bien, de acuerdo con Mach, dado que tenemos un acceso más expedito a nuestras propias ideas que a los hechos físicos del mundo natural, ellas “preparan” el camino hacia la ejecución de los experimentos reales. Como nuestras ideas preceden cognitivamente a los experimentos reales, podemos considerarlas una precondition necesaria para la ejecución de éstos al ordenar entidades, fenómenos, hechos y procesos físicos inconexos que se combinan en el pensamiento mediante el uso de los EM, de manera que los EM tienen una función ordenadora y heurística en el pensamiento. Mach menciona un ejemplo de este proceso inventivo: el caso de George Stephenson (1718-1848) quien, teniendo conocimiento empírico previo de los trenes, los rieles y la máquina de vapor pudo, con la ayuda de un EM, “combinar” su saber inconexo e inventar un tren sobre rieles impulsado por una máquina de vapor.⁶ Uno de los rasgos heurísticos más interesantes de los EM, según la postura empirista de Mach, es que pueden utilizarse como técnicas de descubrimiento de nuevas propiedades de las entidades, fenómenos, hechos y procesos científicos, los cuales, sin la ayuda de los EM, permanecerían inconexos y desconocidos.⁷

Los EM tienen una función propedéutica clave para el desarrollo de la investigación científica porque ayudan a transformar el pensamiento de los científicos hasta “revelarles” los caminos más significativos para su investigación, previniéndolos del error

⁶ En 1814, Stephenson construyó una locomotora llamada Blucher, la cual se considera la primera locomotora sobre rieles impulsada por vapor.

⁷ Un ejemplo del uso heurístico de los EM es mostrar la indivisibilidad de los átomos “imaginando” que un pedazo de cualquier material se corta en pequeñas partes hasta llegar a unas tan pequeñas que no es posible fragmentar más.

(Mach 1906 [1896], 189). Así entendidos, los EM serían fundamentales para el progreso cognitivo de la ciencia. En este proceso progresivo de la ciencia, donde los EM tendrían una función esencial, el surgimiento de ciertas paradojas en el pensamiento sería fundamental para percibir no sólo la naturaleza de un problema, sino la dificultad del contenido de la paradoja en cuestión. El surgimiento de ciertas paradojas motiva la “excitación del pensamiento” que es esencial para el surgimiento de los EM (Mach 1906 [1896], 196). Como se verá en el siguiente capítulo, esta idea la retomó y la reformuló Thomas S. Kuhn, quien aseguró que mediante la confrontación del conocimiento científico con una paradoja implícita en su manera de pensar, los EM pueden reformar los esquemas conceptuales de los científicos con el objetivo de evitar el error (Kuhn 1977 [1964], 251).⁸

Cabe mencionar, finalmente, que Mach nos advierte —como lo han hecho otros autores— que no le fue posible analizar todas las formas y fases de la riqueza cognitiva, metodológica y heurística de los EM. En el siguiente apartado analizaré las ideas de Karl R. Popper en torno a los EM. Aunque tampoco agota todas las funciones, formas y de los EM, como él aceptó, la crítica que hizo a este tipo de experimentos es fundamental para entender las posturas contemporáneas sobre el tema.

2.2. KARL R. POPPER

Karl R. Popper dedicó un apéndice completo de su extenso libro *The Logic of Scientific Discovery*, de 1934, a hacer una crítica de los EM, específicamente a partir de la teoría cuántica, tal y como la concibió este autor. Para él, los EM constituyen un método argumentativo que no siempre se utiliza correctamente, en especial cuando se recurre a ellos de manera *apologética* (Popper 1959 [1934], 464). Según este pensador, Galileo fue uno de los autores que utilizó con mayor ingenio y de manera crítica los EM (465). El uso crítico de los EM puede tener como uno de sus objetivos

⁸ No obstante, en ningún lugar Kuhn refiere que el origen de su postura se encuentra en las ideas de Mach.

cognitivos más importantes mostrar que ciertas posibilidades empíricas, en relación con la aplicación de una teoría, han sido pasadas por alto. Nótese que esta afirmación de Popper guarda cierta semejanza con la posición desarrollada por Mach, quien afirmó que los EM sirven para descubrir nuevas propiedades de los hechos físicos, los cuales, sin la ayuda de los EM, se pasarían por alto.

En este punto conviene señalar la diferencia entre la cualidad que exhiben los EM de mostrar ciertas posibilidades empíricas de las teorías científicas o señalar nuevas propiedades de los hechos físicos y la concepción de los EM como experimentos empíricamente ejecutables. Como se mencionó en el primer capítulo, Einstein sostuvo que los EM no son, en principio, ejecutables (Einstein e Infeld [1938] 2014). Como se verá en el siguiente capítulo, una posición intermedia la sostiene James Robert Brown, quien afirma que los EM *frecuentemente* no pueden ser ejecutados como experimentos “reales” por distintas razones, entre ellas, la carencia de la tecnología necesaria para su implementación (Brown 2011 [1991], 1).

Sin embargo, notemos que si los EM son, en principio, ejecutables, entonces existiría cierta tensión en su naturaleza, porque si *tienen* que serlo para mostrar su efectividad cognitiva son, en potencia, experimentos “reales” que simplemente no se han ejecutado por diversas razones.⁹ Esta disyuntiva nos enfrenta al problema que ya señalamos en Mach: establecer cómo es posible saber *a priori* que un EM es cognitivamente confiable sin recurrir a su ejecución efectiva.

Popper aceptó el uso “ilustrativo” y “expositivo” de algunos EM, pero rechazó su uso “argumentativo”. De acuerdo con este autor, el problema surge cuando los EM se utilizan como argumentos que se valen de ciertas idealizaciones y presupuestos no aceptados por el interlocutor del EM en cuestión. En general,

⁹ Allen I. Janis considera que la imposibilidad para ejecutar un EM va del rango de las dificultades tecnológicas —las cuales, en principio, pueden solventarse en un futuro— a las dificultades de principio, por ejemplo, cuando el EM requiere imaginar un universo diferente del que conocemos (1991, 113).

el uso argumentativo de los EM es legítimo como instrumento cognitivo de evaluación teórica siempre y cuando la forma argumentativa del EM establezca con claridad y precisión el punto de vista del oponente o de la teoría que se critica (Popper 1959 [1934], 466).

Un ejemplo paradigmático del uso argumentativo de un EM lo constituye la réplica construida por Bohr (1935) al EM propuesto por Einstein, Podolsky y Rosen, que se analizó en el capítulo anterior. Popper sostuvo que la réplica de Bohr es inaceptable debido a que el argumento original de EPR trata de resolver el problema de la interferencia de los procedimientos de medición con los que se determina la posición o el *momentum* de un sistema; mientras que la respuesta de Bohr sostiene que la interferencia se da al nivel del marco de la referencia o de coordenadas con los que se mide dicho sistema y no al nivel del sistema en sí mismo.

Por supuesto, la crítica de Popper a Bohr se fundamenta en la visión realista del mundo que —junto con Einstein— defendió Popper. Como señalé en el capítulo anterior, no es que Bohr “deseche” injustificadamente el argumento realista de EPR, como sostuvo Popper (1959 [1934], 468). Bohr afirmó que la “influencia” de las condiciones utilizadas para predecir el comportamiento de cualquier sistema atómico no puede ser valorada de manera *independiente* a la descripción del sistema como supuestamente es en “sí mismo”. En otras palabras, no es posible tener acceso cognitivo al sistema como supuestamente es en sí mismo, independientemente de la manera en que éste sea descrito.

En resumen, Popper sostuvo que, si los EM se utilizan como “argumentos” a favor o en contra de una teoría científica específica, los presupuestos empíricos (lo que he llamado PNE) y las idealizaciones (que forman parte de lo que he llamado PNTC) utilizados en la construcción de esos EM, deben ser previamente aceptados por los defensores de la teoría que se desea rebatir. Sin embargo, en el capítulo anterior vimos que los científicos muchas veces no comparten los presupuestos empíricos o teóricos-conceptuales necesarios y suficientes para establecer con “cla-

ridad” y “precisión” el punto de vista del oponente (Popper 1959 [1934], 466). Dicho de otra manera, los desacuerdos entre los PNE y los PNTC provocan que los científicos trabajen con distintas visiones del mundo.

Por otro lado, si se pretende que el EM funja como un criterio de evaluación neutral que establezca un parámetro de conmensurabilidad aceptable por los defensores y detractores de una teoría específica, el disenso puede surgir de la interpretación de los PNE y PNTC que se aceptan como constitutivos del EM, como fue el caso del elevador de Einstein. El mismo problema puede surgir entre dos o más EM en competencia, como en el caso de Arquitas y Aristóteles, revisado en el primer capítulo. Con el fin de salvar algunos de estos problemas, en el quinto capítulo propondremos algunas reglas evaluativas para comparar el éxito explicativo de diferentes EM en competencia, los cuales, como se argumentará, son independientes de estos principios empíricos y teórico-conceptuales.

2.3. THOMAS S. KUHN

Thomas S. Kuhn sostuvo que los EM se basan en cierto conocimiento empírico previamente aceptado (lo que hemos llamado PNE) (1977 [1964], 241). Esta característica es el origen de uno de los tópicos más discutidos desde el punto de vista filosófico sobre el tema: explorar cómo es posible, basados exclusivamente en datos empíricos previamente aceptados, que un EM puede producir *nuevo* conocimiento empírico sobre el mundo natural. La respuesta de Kuhn a esta interrogante es que los EM no sólo producen información acerca del mundo natural, sino que simultáneamente generan información relevante sobre los esquemas conceptuales utilizados implícitamente por los científicos.

De acuerdo con Kuhn, la principal función de los EM es *reformular* los esquemas conceptuales con los que trabajan los científicos mediante la confrontación de éstos con una paradoja implícita en su manera de pensar y, así, “contribuir a evitar el

error” (Kuhn 1977 [1964], 251).¹⁰ Si el EM es exitoso, llevará a los científicos a encarar resultados inesperados o anormales. Sin embargo, dado que los EM no contienen información empírica adicional al conocimiento previamente aceptado por los científicos, en realidad éstos no aprenden nada nuevo del resultado.

Veamos un ejemplo. Kuhn sostuvo que las implicaciones teóricas del concepto de “velocidad”, desarrollado por Aristóteles, no pudieron haber sido cuestionadas en un “mundo” donde todos los movimientos eran uniformes, como el *mundo aristotélico*. No fue sino hasta el desarrollo de la física postaristotélica que este concepto mostró su incapacidad para “encajar” en la estructura del “nuevo mundo” galileano. Nótese que esta estructura a la que se refirió Kuhn no depende exclusivamente del esquema conceptual en el que trabajan los científicos, también depende de la propia naturaleza del mundo físico: “La naturaleza, y no sólo la lógica, es la responsable de la aparente confusión” (Kuhn 1977 [1964], 261).

Ciertamente, uno de los problemas de la postura de Kuhn es que la referencia a un *mundo* en el cual un concepto es aceptable y otro *mundo* donde el mismo concepto no lo es, no deja claro cómo demarcar dónde termina la concepción del “mundo” construida por un esquema conceptual específico y dónde comienza el mundo “real” en el cual dicho concepto debe aplicarse. A pesar de que Kuhn dejó abierta esta cuestión, me parece que el compromiso metafísico tácito involucrado en su posición es innegable. En este punto, conviene especificar qué se entiende por “compromiso metafísico”. El término “metafísico” se utiliza aquí de acuerdo con el sentido tradicional de la doctrina, la cual sostiene que existe un mundo natural, *independiente* de los seres humanos. En este sentido, un compromiso metafísico es la postura que defiende la existencia de un mundo natural, independiente de la mente humana.¹¹

¹⁰ Ya he mencionado que esta idea tiene su origen en el trabajo de Ernst Mach (1906 [1896], 452).

¹¹ Por supuesto, hablar de un realismo metafísico desde el cual se defiende la idea de que existe un mundo natural “independiente” de la mente humana podría ser cuestionable si se considera la necesidad de un mundo natural

Mencioné más arriba que, de acuerdo con Kuhn, los EM permiten a los científicos resolver ciertas confusiones conceptuales y *evitar* errores. Esta afirmación implica que si los científicos son capaces de construir mejores esquemas conceptuales —al menos en el sentido de que exhiban menos errores—, entonces debe existir algún criterio con el cual puedan evaluar el éxito de esta tarea. Parece que para Kuhn este criterio es la mayor *coincidencia* entre los esquemas conceptuales reformados con la ayuda de los EM y el mundo natural, cuestión que explicaría por qué la naturaleza, y no sólo la lógica, es la responsable de la aparente confusión conceptual en la cual pueden incurrir los científicos.

También resulta interesante señalar que la función “reconceptualizadora” de los EM y la responsabilidad de la “naturaleza” en la confusión conceptual de los científicos implican que la noción de “mundo” no es equivalente a la noción de “naturaleza” para Kuhn. La primera depende del esquema conceptual de los científicos, el cual puede ser transformado mediante el cambio de los sistemas conceptuales; la segunda se refiere al mundo “físico” en el cual los científicos *aplican* los EM. Cito un pasaje de la *Estructura de las revoluciones científicas* para apoyar esta idea:

Galileo no fue el primer hombre en sugerir que las rocas caen con un movimiento uniformemente acelerado. Desarrolló su teorema, junto con muchas de sus consecuencias, antes de experimentar con el plano inclinado. Este teorema fue uno más de la red de nuevas regularidades accesibles al genio en un mundo determinado conjuntamente por la naturaleza y por el paradigma (Kuhn 1970 [1962], 125).

“conceptualizado”. Al respecto, se ha afirmado que algunos estadios mentales pueden representar al mundo incluso si el sujeto que lo hace no posee los conceptos necesarios para especificar su contenido. Sin embargo, los realistas pueden contraargumentar que la formulación de la noción de “contenido no-conceptual”, aplicable a distintos dominios científicos, *depende* del significado de la noción misma de “concepto” (véase Evans 1982). Para los propósitos que busco en este libro, dejaré a un lado esta discusión.

Retomando el ejemplo del concepto de “velocidad”, Kuhn sostuvo que cuando éste se aplica a los movimientos lineales, una de sus funciones es especificar, mediante las llamadas “ecuaciones galileanas de la transformación”, algunas propiedades físicas que nos proporcionan “invaluable información sobre el mundo natural” (Kuhn 1977 [1964], 260).

En resumen, de acuerdo con Kuhn, el mundo físico —o naturaleza— *constrñe* el uso de los conceptos científicos. Esta afirmación protege su postura sobre los EM de acusaciones relativistas que se le han planteado en relación con otros aspectos de su obra.

2.4. CONCLUSIONES: EVALUACIÓN DE LAS POSTURAS PIONERAS

La propuesta de Mach sobre los EM como “buenas copias” de los hechos físicos parte de la noción de que nuestras ideas, al preceder cognitivamente a los experimentos reales, son una precondición necesaria —aunque no suficiente— para la ejecución de estos últimos. De acuerdo con él, los EM ordenan entidades, fenómenos, hechos y procesos físicos previamente inconexos que se “combinan” en el pensamiento mediante la utilización de este tipo de experimentos. Claramente, la idea de copia y la idea de combinación tienen su origen en el concepto de “impresión” de David Hume (1711-1776), quien a su vez retomó el concepto de idea “simple” y “compleja” de John Locke (1632-1704).

Recuérdese al respecto que, de acuerdo con Locke (1979 [1690]), todas nuestras ideas —las cuales constituyen nuestros pensamientos— se derivan de la experiencia. Por supuesto, el empirismo de Locke no estaba discutiendo el tema de los EM, sino el concepto cartesiano de “idea innata”, con el cual se pretendía deducir la verdad de la razón. De acuerdo con el pensador inglés, las ideas complejas se componen de ideas simples y las ideas simples se derivan de manera directa de nuestras experiencias. No obstante, tanto Descartes como Locke usaron el concepto de “idea” de una manera imprecisa, es decir, como el término que mejor servía para designar todo cuanto pueda ser

objeto del entendimiento durante el proceso del pensamiento (Locke 1979 [1690], 8).

Por su parte, Hume consideró inapropiado el uso generalizado del concepto de “idea” dado que implica una contradicción entre dos operaciones mentales distintas: la conciencia de las sensaciones, por un lado y la consideración de los pensamientos, por el otro. De acuerdo con Hume, sólo estos últimos pueden considerarse ideas. Por lo anterior, descompuso el concepto de idea de Locke en dos partes: “impresiones”, para referirse a las sensaciones y sentimientos, y “percepciones”, para referirse a la clase general de objetos de la mente. De esta manera, las ideas de Locke se convirtieron en las percepciones de Hume. Por ejemplo, cuando se piensa en una “montaña de oro” —o en la idea de un “tren sobre rieles” citando a Mach— en realidad se unen dos ideas simples pero consistentes, la idea de “oro” y la de “montaña”, adquiridas previamente. Asimismo, podemos concebir la idea compleja de un “caballo virtuoso” porque previamente hemos sentido y concebido lo “virtuoso” que se une a la idea de “caballo”. De aquí que todas las ideas provengan de nuestra experiencia. La mezcla —o combinación en términos de Mach— de este tipo de ideas simples en una idea compleja sólo puede realizarse en el pensamiento. Por ello todas nuestras ideas son “copias” de nuestras impresiones (Hume 2007 [1748], 13).

No obstante, la postura de Mach claramente exhibe una idea germinal muy interesante para poder evaluar cognitivamente los EM. Por un lado, para que un EM sea aceptado como productor de conocimiento, se requiere de la tácita o explícita aceptación de las circunstancias y condiciones necesarias con las cuales se formula. En los términos que he propuesto aquí, se requiere de la previa aceptación de ciertos presupuestos de naturaleza empírica (PNE) que constituyen los EM. Por otro lado, sostuvo Mach, se requiere de un mínimo consenso al respecto de los conceptos con los cuales se articulan estas circunstancias y condiciones. En los términos que he propuesto aquí, se necesita la previa aceptación de ciertos presupuestos teórico-conceptuales (PNTC), también constitutivos de los EM.

El primer principio implica la aceptación de una base empírica expresada mediante un lenguaje observacional previamente aceptado, con el cual se construye el EM. El segundo principio implica la aceptación de una base teórico-conceptual expresada mediante un lenguaje teórico, también previamente aceptado como constitutivo de los EM. Mi tesis es que un EM requiere la aceptación explícita de estos dos requerimientos metodológicos en su formulación para ser aceptado como productor de conocimiento confiable.

Con relación a la postura de Popper, me parece que el uso argumentativo de los EM es insuficiente para considerarlos instrumentos cognitivos útiles para la evaluación teórica. De manera ideal, sería conveniente establecer con claridad y precisión el punto de vista del oponente o de la teoría que se critica. Sin embargo, para evaluar si un EM puede rebatir a una teoría científica específica —o una parte de ésta—, primero debemos asegurarnos de que los dos principios metodológicos PNE y PNTC son relevantemente compartidos por ambos contendientes. En otras palabras, los principios PNE y PNTC constituyen la condición *sine qua non* para poder establecer la conmensurabilidad entre dos visiones del mundo en competencia.

Por último, el uso analítico de los EM, de acuerdo con la posición de Kuhn, puede trazarse de la siguiente manera: primero debe haber una crisis inducida por las expectativas de aplicación empírica fallidas de algún aspecto del sistema conceptual donde trabajan los científicos. Posteriormente, con la ayuda de los EM, los científicos transforman estas “anomalías” en una confusión conceptual concreta. Después, reconceptualizan algunos aspectos clave del problema. Finalmente, el proceso culmina con la producción de nuevas leyes y teorías científicas diferentes de aquellas que se habían trabajado. Este proceso permite a los científicos que utilizan este tipo de experimentos, acceder a un tipo de conocimiento previamente inaccesible para ellos. Notemos que si los EM generan información relevante sobre los esquemas conceptuales de los científicos, entonces exhiben una virtud autoconstructiva porque reforman y regeneran la base

teórico-conceptual (PNTC) que los constituye. La función “reconceptualizadora” de los EM es una virtud cognitiva que los autocorriga y los enriquece con la práctica científica.¹²

En el siguiente capítulo analizaré algunos de los debates filosóficos actuales en torno a los EM. Revisaré la postura racionalista, la empirista y la experimentalista. Como se verá más adelante, las discusiones actuales sobre el tema de los EM se han enfrascado en el dilema empirista/racionalista que he revisado hasta aquí.

¹² La idea de la autocorrección de los sistemas conceptuales se aproxima al concepto de “rectificación” operacionalista, surgida del convencionalismo (véase Chang 2004, 234).

3. Experimentos mentales: análisis contemporáneos¹

En este capítulo analizaré la postura “racionalista” desarrollada por James. R. Brown, la postura “empirista” defendida por John D. Norton y la postura “experimentalista” propuesta por Roy Sorensen en torno a la naturaleza y función de los experimentos mentales. La decisión de abordar estas perspectivas no es arbitraria. En realidad, responde a que la mayoría de los análisis contemporáneos sobre el tema abordan uno u otro aspecto de la obra de estos autores.²

De acuerdo con Brown, algunos EM posibilitan el proceso de formación de creencias sin el *input* de información empírica nueva, de modo que este tipo de conocimiento sería de naturaleza *a priori*. Por su parte, Norton sostiene que los EM son sólo “argumentos pintorescos”, es decir, argumentos deductivos o inductivos disfrazados de formas pintorescas o narrativas vívidas. En otras palabras, no son más que la reformulación del conocimiento empírico previamente aceptado mediante un pro-

¹ Un estudio preliminar de este capítulo se publicó en *Transversal: International Journal for the Historiography of Science* (Islas 2017).

² Ejemplos de estudios que han abordado uno o más tópicos desarrollados por estos autores son Stuart (2016b); Praëm y Steglich-Petersen (2015); Camilleri (2014); Colaco *et al.* (2014); Fehige y Stuart (2014); Kösem y Özdemir (2014); Kukkonen (2014); Meynell (2014); Clatterbuck (2013); Cohnitz (2013); El Skaf e Imbert (2013); Kujundzic (2013); Pierce (2013); Urbaniak (2012); Ierodiakonou y Roux (2011); Machery (2011); Shieber (2010); Galili (2009); Häggqvist (2007); Gendler (1998 y 2004); McAllister (2004); Borsboom *et al.* (2002); Boniolo (1997); Gooding (1992) y Hacking (1992), entre otros.

ceso argumentativo que preserva la verdad implícita en las premisas de su forma argumentativa. A su vez, Sorensen afirma que los EM se desarrollaron a partir de experimentos “reales”, por lo tanto, representan casos límite de éstos.

Norton sostiene que su modesto empirismo es compatible con el platonismo defendido por Brown. Y en efecto, si el acceso al mundo platónico que defiende éste se hace vía la construcción de argumentos deductivos o inductivos, entonces la explicación de los EM construida por Norton sería indistinguible de la de Brown y sólo sería preferible por su simplicidad. Por su parte, Sorensen está de acuerdo con Norton en que los EM son argumentos, pero si esto es así, entonces también los experimentos “reales” lo son. A continuación, revisaré a detalle sus respectivas posturas.

3.1. EL RACIONALISMO DE JAMES R. BROWN

James R. Brown y John D. Norton han discutido el tema de los EM durante más de veinte años. Ha sido tan importante la influencia de este debate en los análisis contemporáneos que la mayoría de los trabajos recientes abordan uno u otro aspecto de esta discusión. La obra de Brown respecto a los EM es extensa (2013; 2011 [1991]; 2004a; 2004b; 1992 y 1986). Una de las contribuciones más importantes de Brown es su taxonomía, en la cual se establece que los EM se dividen en dos grandes grupos: destructivos y constructivos. Los EM constructivos pueden ser de tres tipos: a) directos: comienzan con un fenómeno no problemático y terminan con una teoría bien articulada, b) conjeturales: los científicos tratan de establecer un fenómeno específico y, c) mediáticos: se trata de derivar una conclusión a partir de una teoría adecuadamente articulada. Con la ejecución de los EM se da un “salto” inductivo desde un caso examinado de manera aislada hacia la conclusión teórica que pretende establecerse (Brown 2011 [1991], 43-44).

Existen, empero, unos experimentos mentales llamados “platónicos”, que son “simultáneamente” constructivos y destructi-

vos. La importancia de los EM platónicos proviene de que, con su utilización, los científicos son capaces de “destruir una teoría científica a la vez que construyen una nueva y mejor” (Brown 2011 [1991], 99). Este es el caso del EM sobre la caída de los cuerpos, el cual se revisó a detalle en el primer capítulo. De acuerdo con Brown, la construcción de este experimento contribuyó a que Galileo descubriera una ley de la naturaleza y destruyó la teoría aristotélica sobre el tema.

Las leyes de la naturaleza son “entidades independientes que existen de manera abstracta. Cosas que por sí mismas son responsables de las regularidades del mundo físico” (Brown 2011 [1991], 199). Este tipo de entidades abstractas supuestamente existirían fuera del espacio y del tiempo. Por ello, el conocimiento científico de sus leyes, adquirido con la ayuda de los EM, es de naturaleza *a priori* si consideramos que es independiente de los sentidos.³ La percepción *a priori* que los científicos tienen de estas leyes de la naturaleza se obtiene con el “ojo de la mente” de los científicos (Brown 2011 [1991], vii).

Ahora bien, dado que las leyes de la naturaleza son “relaciones entre universales” y que “estas relaciones entre universales abstractos explican las regularidades observables del mundo físico” (Brown 2011 [1991], 87), con la ayuda de los EM platónicos es posible conocer el mundo natural mediante el acceso *a priori* al reino abstracto en el cual se encuentran las leyes naturales. En resumen, de acuerdo con Brown, la principal función cognitiva de los EM platónicos es producir conocimiento *a priori* del mundo natural mediante el uso de las intuiciones científicas.

Sin embargo, la formulación de Brown presenta algunos problemas filosóficos. Primero, él aceptó que la intrínseca falibilidad de los EM platónicos convierte en “tentativo” el uso de términos como “constructivo” y “destrutivo” que son centrales en su postura (Brown 2011 [1991], 42). Desafortunadamente, de ser éste el caso, la característica más sobresaliente de los EM platónicos es incierta. En caso de ser falibles, no tenemos un criterio

³ La noción de “*a priori*” construida por Brown no tiene nada que ver con el conocido concepto kantiano de “forma *a priori* de la percepción”.

confiable para discernir si los resultados que se infieren de este tipo de experimentos son o no cognitivamente valiosos; cuestión que evidentemente es crucial para la evaluación de este tipo de experimentos.

Por otro lado, si se considera que la capacidad del “ojo de la mente” de los científicos, con la que supuestamente se capturan las leyes de la naturaleza, es equivalente a la noción menos enigmática de “intuición científica”, entonces Brown debió ofrecer alguna justificación cognitiva del uso de ésta. Aunque el tema de la intuición científica es un tópico que se discute cada vez más en los debates actuales al interior de la filosofía de la ciencia, desafortunadamente Brown no profundizó en él. No obstante, el uso de las intuiciones es la principal diferencia entre su postura y la de Norton respecto a los EM (Brown 2004a, 35).

3.2. EL EMPIRISMO DE JOHN D. NORTON

La obra de John D. Norton en torno al tema de los EM (1991; 1996; 2004a; 2004b), no es tan extensa como la de Brown; no obstante, su posición al respecto ha sido ampliamente comentada y analizada por varios autores. En contra de la postura racionalista de Brown, Norton afirma que los EM “son simples argumentos y no algún tipo de nueva ventana misteriosa al mundo físico” (1991, 142). A partir de lo que llamó un “modesto” empirismo, Norton sostuvo que los EM en las ciencias naturales son sólo “argumentos pintorescos” mediante los cuales los científicos “1) *adelantan estados hipotéticos o contrafácticos* y 2) *proponen particularidades irrelevantes para la generalidad de la conclusión*” (1991, 129, énfasis en el original). Por lo anterior, el conocimiento producido por los EM proviene de las premisas introducidas explícita o implícitamente al interior de los propios EM (Norton 2004b, 1140).

Este autor asegura que el conocimiento producido por los EM se transforma mediante el uso de inferencias deductivas o inductivas, las cuales explican cómo es el mundo natural sin recu-

rrir a nueva información del mundo físico.⁴ El punto central de Norton es que los resultados cognitivos de los EM son confiables sólo si el contenido cognitivo presupuesto en las premisas de su forma argumentativa es “verdadero” y si los científicos logran preservar esta verdad, o al menos su probabilidad, mediante el uso de procesos argumentativos válidos. A esta afirmación se le conoce como “tesis de la confiabilidad” de Norton (2004b, 1143). Por lo anterior, la confiabilidad de un experimento mental coincidiría exactamente con la confiabilidad de las premisas de su forma argumentativa. Es por ello que los EM son, aseguró Norton, cognitivamente poco interesantes.

Nótese que el contenido cognitivo de los EM puede justificarse sólo si su reconstrucción argumentativa puede justificar su conclusión. Por lo anterior, Norton ha dedicado parte de su obra a reconstruir en su forma argumentativa distintos EM. A este respecto, ha afirmado que todos los EM que conoce han podido reconstruirse como argumentos. Algunos autores han tratado de apoyar esta tarea. Por ejemplo, Rafal Urbaniak (2012) hizo una reconstrucción argumentativa del experimento de la caída libre de los cuerpos de Galileo. No obstante, otros autores han mostrado que algunos experimentos mentales no pueden reconstruirse como argumentos (véase Bishop 1999; 2012; Borsboom *et al.* (2002); Gendler (2004) y Nersessian (2007).

Sin embargo, me parece que la postura de Norton también presenta un vacío explicativo importante. Él aseguró que los EM justifican sus resultados cognitivos “si proceden de premisas verdaderas” (2004a, 64) y que no lo hacen si las conclusiones de su forma argumentativa provienen de la utilización de “inferencias falaces” o de la “utilización por parte de los científicos de proposiciones falsas” (51). En otras palabras, redujo su posición a la idea de que los EM *son* argumentos que tácita o explícitamente contienen premisas verdaderas o falsas.

⁴ Por supuesto, existen experimentos mentales que no se relacionan con el mundo natural, como en las matemáticas o en la ética. Sin embargo, nuestro interés en este libro son los experimentos mentales tal y como se utilizan en las ciencias naturales.

No obstante, esta aseveración no dice nada acerca de cómo podría saberse si el conocimiento presupuesto tácita o explícitamente en las premisas de la forma argumentativa de los EM es o no verdadero, por lo que tampoco podría establecerse si sus resultados cognitivos están o no justificados.⁵ Ciertamente, no es posible criticarle a Norton no haber mostrado las causas empíricas o teórico-conceptuales por las que un EM específico es corroborado o falsado. El problema con su postura es que la crítica al platonismo de Brown es débil, pues pocos autores negarían que es posible considerar los EM como argumentos. Sin embargo, y a favor de Norton, podemos decir que es uno de los pocos autores que elaboró un criterio general de demarcación entre los EM exitosos y los no exitosos. Un experimento mental exitoso es aquel constituido por un argumento válido mientras que un experimento mental no exitoso es aquel constituido por un argumento inválido.

3.3. EL EXPERIMENTALISMO DE ROY SORENSEN

Roy Sorensen desarrolló lo que se conoce como la postura experimentalista de los EM (1991a; 1991b; 1992a; 1992b). De acuerdo con este autor, los EM evolucionaron a partir de experimentos “reales” vía un proceso de atenuación. Sostiene que los EM son casos límite de experimentos “reales” tal y como los círculos representan “casos límite de las elipses” (Sorensen 1992a, 186). Para comprender esta idea, nos invita a reflexionar sobre lo que es un experimento “real”. De acuerdo con este autor, se trata de un procedimiento para responder o sugerir una pregunta acerca de la relación entre variables. La mayoría de los experimentos reales están diseñados alrededor de dos: una que se manipula directamente (llamada “variable independiente”) y otra que se manipula indirectamente (conocida como “variable dependiente”).

Ciertamente, no todos los experimentos reales están hechos para confirmar o refutar teorías científicas. Muchos son ejecuta-

⁵ Michael T. Stuart llegó a una conclusión similar a la mía (2016a).

dos con el objetivo de establecer constantes, como en el caso de aquellos sobre el punto de congelación de ciertas sustancias químicas como el oxígeno. Aunque los experimentos generalmente se asocian a la ciencia, en realidad varios de ellos surgen en disciplinas no científicas como el arte, la historia o la música. Asimismo, muchos actos de la vida diaria pueden ser vistos como experimentos, como cuando alguien varía la cantidad de azúcar en la preparación de una limonada con el fin de que quede más sabrosa. Como vimos en el primer capítulo, Mach sostuvo una idea similar al sugerir que el método básico de los EM es el mismo que el de los experimentos reales ejecutados en el laboratorio, esto es, el método de la variación.

Sorensen afirma que todos los experimentos —reales o mentales— tienen un punto en común: ambos se realizan persiguiendo una meta u objetivo cognitivo. Ahora bien, si para caracterizar un experimento basta que éste se realice con un fin cognitivo, cabe preguntarse si es correcto atribuirle “intenciones” a los animales (Sorensen 1992a, 190) porque, al parecer, varios “ejecutan” experimentos, al menos de manera simple. Los caballos “tocan” el hielo para corroborar si éste puede sostener su peso, algunos chimpancés cambian la longitud de las ramas que utilizan como instrumentos para sacar a las termitas de los troncos podridos. De acuerdo con Sorensen, ninguno de estos comportamientos de “ensayo y error” visto en estos y otros animales constituye “claramente” un acto experimental, ya que es difícil atribuirles un contenido cognitivo específico a sus “intenciones”.

Lo cierto es, afirma este autor, que los primeros “experimentadores mentales” pudieron haber avanzado por encima del umbral de los experimentos reales mediante procedimientos cada vez más audaces, como cuando se nos invita a adivinar los resultados probables de ensayos no ejecutados de experimentos reales. En el extremo de esta postura, cuando ninguno de los ensayos de un experimento real está destinado a realizarse, tenemos el comienzo de un EM. No obstante, en este punto es importante no confundir un ensayo no ejecutado con la formulación de estados hipotéticos o contrafácticos posibles.

Al respecto, en la introducción general de este libro se mencionó que un EM no debe reducirse a la ejecución de experimentos psicológicos ni a la *simple* formulación de estados hipotéticos o contrafácticos, como cuando un científico imagina —o nos invita a imaginar— las diversas consecuencias de una guerra nuclear a gran escala. Los experimentos que un científico pudiera diseñar con este fin *no* constituyen necesariamente un EM dado que podrían ser sólo elucubraciones hipotéticas carentes de una base empírica (PNE) y teórico-conceptual (PNTC) coherente y aceptable. Sostengo que el EM es genuino cuando los estados hipotéticos o contrafácticos se derivan de presupuestos empíricos o teórico-conceptuales plausibles.

Asimismo, en la introducción general también comenté que algunos EM se idean para suplir ciertos experimentos reales imposibles de ejecutar. Al respecto, algunos autores sugieren que esta es la característica esencial de un EM. Por ejemplo, Kathleen Wilkes afirma que “estas incursiones de la imaginación son llamadas experimentos mentales precisamente porque son imaginarios, esto es, no pueden ser realizados en el mundo real” (Wilkes 1988, 2). Sin embargo, he argumentado que los EM no pueden reducirse a esta función de suplementación. También se han ideado para cumplimentar otros fines cognitivos como ilustrar y clarificar situaciones ideales y abstractas; como ejemplares para el análisis conceptual; como instrumentos heurísticos para despejar ciertas paradojas implícitas en la forma de pensar de los científicos; como instrumentos metodológicos que generan evidencia a favor o en contra de una teoría que se desea contrastar; o como métodos argumentativos críticos o apoloéticos, entre otras funciones.

Retomando a Sorensen, un experimento mental pretende lograr su objetivo cognitivo sin el beneficio de la ejecución (1992a, 205). Sin embargo, este autor afirma que un “diseño” experimental puede considerarse un EM en una interpretación o un “experimento ordinario” en otra. Por ello, para que un experimento sea considerado mental, debemos recurrir a las intenciones cognitivas de quienes lo idearon (Sorensen 1992a,

210). Asimismo, dado que los experimentos “reales” son procedimientos y los procedimientos deben tener un número de pasos complejos, meter el dedo gordo del pie en una piscina no es un EM, pues tomar la temperatura de esta manera es demasiado “simple”.

Por supuesto, Sorensen está consciente de que el concepto “complejidad” es relativo. Por ello, además de que los EM son relativos a las intenciones cognitivas de quienes los formulan, también son relativos a ciertas “normas” de complejidad. Por lo anterior, los EM podrían haber evolucionado *indirectamente* a partir de los experimentos “reales” mediante la formulación de inferencias hipotéticas. En lugar de probar una hipótesis llevándola a cabo en la vida real, se prueba “en el pensamiento”, para ello se debe creer en lo que la persona encargada de idear el EM considera posible o imposible. Una vez que estas suposiciones o creencias “alcanzan cierto un grado de complejidad”, entonces el procedimiento califica como un experimento mental (Sorensen 1992, 212). En esta idea podemos constatar nuevamente la importancia que tienen los presupuestos empíricos (PNE) y teórico-conceptuales (PNTC) involucrados en la construcción de un EM.

En resumen, Sorensen sostiene que los experimentos mentales se desarrollaron a partir de experimentos “reales” y no a la inversa. Sin embargo, afirma que ambos tipos de experimentos evolucionaron de manera paralela, pero no aislada. Esta afirmación se basa en las notables semejanzas entre los dos. A partir de esta premisa, nos invita a considerar a los EM como casos límite de los experimentos reales, es decir, subclases de experimentos reales, como en el caso de las subclases “experimento químico” o “experimento costoso”. Ahora bien, aunque en la postura de Sorensen los EM son un subconjunto de los experimentos reales, esto no significa que ambos justifiquen sus resultados cognitivos de manera similar. Como él reconoce, los EM dependen de información empírica “antigua” (Sorensen 1992a, 214).

3.4. CONCLUSIONES: EVALUACIÓN DE LOS ANÁLISIS CONTEMPORÁNEOS

Los tipos de EM más importantes para Brown son los platónicos. Luego, al aceptar que éstos son falibles, entonces también lo es el éxito que pueden exhibir en la “destrucción” de una vieja teoría y en la “construcción” de una nueva que la remplace. Por otro lado, el principal problema del empirismo defendido por Norton es que su crítica al platonismo de Brown es débil. Aquél se limitó a señalar que, si las premisas de la forma argumentativa de un EM son verdaderas, entonces también lo es el EM que las contiene. Esta noción se desprende de la definición clásica de un argumento válido: “si las premisas son verdaderas, entonces la conclusión es verdadera”. Ciertamente, me parece que pocos autores —entre ellos Brown— negarían que es posible considerar a los EM como argumentos.

Finalmente, al igual que Norton y al contrario de Brown, Sorensen sostuvo que los experimentos reales aportan información nueva que los EM son *incapaces* de producir; pero a diferencia de Norton, afirmó que si los EM son argumentos, entonces los experimentos reales *también* lo son. Ciertamente, la información empírica *antigua* a la que hace referencia Sorensen es equivalente a la noción de “presupuesto” empírico que he desarrollado a lo largo de este texto como PNE. Sin embargo, Sorensen no estableció con claridad cómo es que esta información empírica *antigua* *justifica* los resultados cognitivos de los EM.

Para abordar este tema, en el siguiente capítulo exploraré los dos tipos de lenguaje con los que la ciencia hace referencia a las relaciones y propiedades de entidades, fenómenos, hechos y procesos científicos sobre los que produce conocimiento. Me refiero al lenguaje observacional y al lenguaje teórico. Analizaremos la función de ambos en la construcción de los EM.

4. Principios de naturaleza empírica y teórico-conceptual

En el primer capítulo se analizó el experimento mental conocido como “El elevador”, de Einstein, con el cual este físico apuntaló su teoría de la relatividad general. Este EM tiene como antecedente otro, conocido como “El barco”, de Galileo Galilei. El EM de Galileo muestra que ninguna observación empírica dentro de un marco de referencia puede indicarnos si el barco se mueve a una velocidad constante o es estacionario, estableciendo un principio temprano de la relatividad. Este caso es un ejemplo de cómo un EM puede apuntalar a otro, aunque ambos estén separados por varios siglos de distancia.

En el EM de Einstein conocido como “El elevador” imaginamos un elevador atado a una cuerda y jalado por una fuerza continua de manera que todo el sistema se mueve con una aceleración constante. Asimismo, si imaginamos a dos personas observando el movimiento del sistema, una desde el interior del elevador y otra desde el exterior, puede afirmarse que quien observa desde el exterior tiene bases para sostener que el elevador constituye un sistema inercial. Por su parte, quien observa desde el interior también tiene bases para afirmar que el elevador está en movimiento absoluto.

Como se señaló, Einstein afirmó que ambas explicaciones son consistentes y no existe posibilidad alguna de determinar cuál es la correcta. En otras palabras, no existe evidencia alguna, derivada del EM, para decidir qué sistema es el acertado. Esto es así porque es posible que dos predicciones empíricas equivalentes

provengan de dos PNE distintos, aunque no incomparables. Una de las razones es que no está del todo claro cómo demarcar con precisión el lenguaje observacional y el lenguaje teórico del que se valen los científicos cuando desarrollan un EM. A continuación, discutiré el papel que tiene la llamada “carga teórica de la observación” y su relación con los resultados cognitivos de los EM.

4.1. LENGUAJE OBSERVACIONAL VERSUS LENGUAJE TEÓRICO

Hemos sostenido hasta aquí que a pesar de que los EM se desarrollan en la mente de los científicos, la mayoría se formulan a partir de dos principios metodológicos fundamentales para su construcción. El primer principio sugiere la aceptación de una base empírica con la cual se designan ciertas propiedades de las entidades, fenómenos, hechos y procesos observados (y observables) bajo estudio. Esta base empírica se expresa mediante un lenguaje observacional previamente aceptado. El segundo principio sugiere la aceptación de una base teórico-conceptual¹ con la cual se designan ciertas propiedades de estas entidades, fenómenos, hechos y procesos científicos inobservados (y potencialmente inobservables)² bajo estudio. Esta base teórica es expresada a través de un lenguaje teórico-conceptual previamente aceptado. Dado que el primer *principio* es de *naturaleza empírica*, aquí me he referido a él como PNE, por sus siglas en español. Dado que el segundo *principio* es de *naturaleza teórico-conceptual*, aquí me he referido a él mediante las siglas PNTC. El lenguaje observacional y el lenguaje teórico constituyen dos de las herramientas esenciales con las cuales los científicos hacen referencia a distintos tipos de entidades científicas.

¹ El conocimiento teórico-conceptual es fundamental para la construcción de EM provenientes de las matemáticas o de la ética.

² Ejemplos de entidades inobservables, postuladas por algunas ciencias naturales son: muchos organismos extintos; la estructura interna de las estrellas; el núcleo de hierro, níquel, azufre, oxígeno y silicio que está en el centro de la Tierra; la masa postulada por Issac Newton; los genes postulados por Gregor Mendel; los rayos x fotónicos; las ondas electromagnéticas, etcétera.

La ciencia amplía su lenguaje observacional mediante la realización de los llamados “saltos” inductivos, con el objetivo de investigar nuevos dominios del mundo natural. No obstante, como se verá en el quinto capítulo, las inferencias inductivas nos permiten realizar saltos válidos sólo cuando contamos con “suficiente” evidencia confirmada.

Ciertamente, la distinción entre el lenguaje observacional y el lenguaje teórico que utiliza la ciencia no es del todo precisa. Al parecer, existe una ineludible dependencia teórica de los enunciados observacionales que hacen de esta distinción una práctica epistémica “circular”, incapaz de producir conocimiento objetivo del mundo. Supóngase que un EM_1 y un EM_2 se encuentran en competencia y han sido propuestos para explicar las mismas entidades, fenómenos, hechos y procesos científicos; considérese también que ambos pueden estar sujetos a cierto grado de corroboración empírica. Debido a que la evidencia de ambos, a favor o en contra, consistiría en confirmar o refutar algunas de sus explicaciones observacionales, no puede existir un dependencia total o parcial entre el EM_1 y el EM_2 , pues de suceder, no existiría evidencia “independiente” con la cual refutar o confirmar convincentemente las explicaciones que nos proporcionan cada uno de estos EM. Este caso hipotético convertiría en *autojustificables* las explicaciones emitidas tanto por el EM_1 como por el EM_2 .

Ahora, imaginemos que las explicaciones elaboradas por cada uno de estos EM son totalmente opuestas o suficientemente distintas entre sí. En este caso, deberíamos encontrar un tipo de evidencia “neutral” con la cual fuera posible evaluar de manera “objetiva” a ambos. Ciertamente, la evidencia neutral que se pudiera “encontrar” tendría que ser ella misma, independiente no sólo del EM_1 y del EM_2 , sino de cualquier otro criterio que *incline la balanza* a favor de alguno de los EM bajo evaluación. La falta de una evidencia neutral ha motivado la exploración de otras vías para la evaluación cognitiva de dos o más EM en competencia. Una de estas propuestas sugiere hacer una distinción entre los conceptos “centrales” que dependen de un EM, digamos

EM_1 , y los conceptos que dependen de teorías o hipótesis secundarias y auxiliares implícitas en la formulación de EM_1 . De acuerdo con esta propuesta, sólo el primer tipo de conceptos —los conceptos centrales— son los que estarían directamente bajo prueba, mientras que los conceptos del segundo tipo lo estarían sólo de manera indirecta.

Sin embargo, aunque con esta estrategia podría evitarse la justificación de ciertos conceptos ligados a teorías e hipótesis secundarias y auxiliares implícitas en el EM_1 , todavía se tendría el problema de tener que justificar los conceptos centrales dependientes del EM_1 que están bajo evaluación. Por otro lado, sería complicado construir un consenso amplio sobre los conceptos que deben considerarse centrales y los que deben considerarse secundarios o auxiliares.

Ahora bien, supóngase que es posible trazar una distinción clara y precisa entre los conceptos que dependen de manera directa del EM_1 y los que dependen de teorías o hipótesis secundarias y auxiliares asumidas por el EM_1 . Ante este escenario, todavía existiría un problema más por resolver. Dejar de evaluar uno o más de los conceptos de las teorías secundarias y auxiliares podría “repercutir” de manera directa en la evaluación que se hace de los conceptos dependientes directamente de EM_1 , debido a la estrecha relación entre ambas clases de conceptos. Como ha señalado correctamente Gerhard Schurz, al final de la cadena de conceptos bajo evaluación siempre quedarían algunos ligados al EM_1 que estarían empíricamente injustificados, lo que nos conduciría a una regresión justificativa *ad infinitum* (2015, 140).

Por otro lado, varios autores han insistido en que no está claro cómo distinguir entre los conceptos centrales y los secundarios involucrados en la construcción de un EM específico. Asimismo, tampoco está claro cómo es posible trazar una distinción precisa y útil entre el lenguaje teórico y el observacional para evaluar dos o más EM en competencia. Revisaré un ejemplo aparentemente inocuo que ilustra este dilema.

Pensemos en el siguiente enunciado observacional: “Este objeto es verde”. Se ha argumentado que este tipo de enunciado

trasciende el contenido de la experiencia subjetiva al expresarse de un modo realista al valerse de la noción “este objeto”.³ En el caso del enunciado “este objeto es verde”, nuestras creencias sobre estos objetos podrían ser erróneas y seguramente el origen del error podría ser multifactorial: la alucinación, la impericia visual, el daltonismo, etcétera.

De acuerdo con Schurz, aunque el argumento de que podríamos estar en un error respecto a nuestras creencias sobre estos y otros objetos es correcto, esta situación *no es atinente* para el debate sobre la dependencia teórica de la observación. El debate real, sostiene Schurz, tiene que ver con el “contenido” de una observación y su supuesta dependencia con el contenido de las teorías que se asumen previamente, las cuales configuran nuestras expectativas y formas de ver el mundo. En este sentido, Schurz argumenta que asumir una postura epistemológica específica, por ejemplo, una postura realista o una postura antirrealista de tipo fenomenológico respecto a la existencia o inexistencia de ciertos objetos en el mundo, no afecta el contenido de sus observaciones, sino sólo su *interpretación* (2015, 141).

Analizaré este argumento a detalle. El término “objeto” para un realista se refiere a un tipo de entidad que se asume como externa a nuestra experiencia, mientras que para un antirrealista —de corte empirista— esa entidad se asume como interna a nuestra experiencia.⁴ No obstante, asumir cualquiera de estas dos posturas no cambiaría, sostiene Schurz, la observación de algo “verde” en una observación de algo “azul”. Si bien acepta que las teorías asumidas previamente determinan la selección de los problemas relevantes para la investigación científica y el tipo de observaciones que los científicos desean encontrar, éstas no determinan el “contenido” de las observaciones.

³ Un ejemplo similar pero menos trivial que se revisó en el primer capítulo es la controversia entre EPR y Bohr. El concepto realista que ambas posturas discutían era el referente a las moléculas.

⁴ Regresando al debate entre Bohr y EPR, el primero asume que la descripción del comportamiento de una partícula depende de los procesos de medición; mientras que para los segundos, la descripción debería ser independiente de estos procesos.

Si esto es así, mediante la formulación de distintos EM, los defensores de teorías incompatibles no necesariamente observarán cosas diferentes al acercarse a una misma área espacio-temporal específica de la investigación científica. A lo más, las diferentes expectativas y formas de ver el mundo, implícitas en cada postura, podrían provocar que los científicos ignoren ciertas observaciones por considerarlas irrelevantes y se centren en las que consideren importantes. La propuesta de Schurz es que una prueba intersubjetiva —o en este caso interteórica— capaz de evaluar de manera “objetiva” el contenido de las observaciones, no sólo sería posible, sino que constituiría una manera de evitar el dogmatismo científico (2015, 142).

Sin embargo, las cosas son más complicadas de como las piensa Schurz. Imaginemos nuevamente que dos EM —digamos EM_1 y EM_2 — tienen intereses comunes de investigación, pero sus expectativas y formas de ver el mundo son incompatibles, como en el caso de la controversia entre EPR y Bohr, revisada en el primer capítulo. Ciertamente, el EM_1 podría hacer notar un rasgo particular, por ejemplo, el rasgo X, que el EM_2 pasa por alto —de manera voluntaria o involuntaria— *siempre* y *cuando* X esté en el espectro de las observaciones que EM_1 no ignora. Lo mismo aplica para el caso de la prueba inter teórica a la que se refiere Schurz. Un rasgo ignorado tanto por el EM_1 como por el EM_2 podría ser “traído a la conciencia” de sus defensores siempre y cuando esté en el espectro de las variables que la prueba analiza. Ambas situaciones implican que lo *potencialmente* explicable y predecible por un EM específico, en efecto, depende de las teorías e hipótesis implícitas en su formulación, las cuales determinan su espectro o rango de visión y aplicabilidad.

Además, la dependencia teórico-conceptual (PNTC) que guía el proceso de formulación de un EM le da sentido a la afirmación “este objeto es verde”. Sin esta guía colocada en la base de la construcción de cualquier EM, el enunciado observacional “este objeto es verde” carecería de sentido o, incluso, no podría formularse. Por lo anterior, en el caso particular de la experimentación, los conceptos observacionales teóricamente neutrales que

postula Schurz son imposibles de obtener si los conceptos para describir los resultados experimentales de la investigación científica poseen significados diferentes e incompatibles. Un ejemplo citado por Allan Franklin es el concepto de “masa”, el cual, en la mecánica de Newton, se refiere a una “constante”; mientras que, en la mecánica relativista de Einstein, “depende” de la velocidad del objeto (2015, 157).

Aunque los defensores de ambas posturas teóricas —la mecánica newtoniana y la mecánica relativista— describen cada procedimiento experimental de manera distinta, pueden estar de acuerdo en que sus respectivas explicaciones, predicciones y mediciones inferidas de cada procedimiento se obtienen “genuinamente”. De ser este el caso, el verdadero problema de la inconmensurabilidad estaría ubicado en el nivel experimental y no en el nivel teórico (Franklin 2015, 158).

4.2. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Uno de los principales problemas que exhiben los procedimientos experimentales utilizados en la ciencia, como la utilización de EM, es que para su construcción dependen de una teoría desde el punto de vista cognitivo y también del metodológico. Desde la perspectiva cognitiva, la emergencia de un rasgo observacional X (o de manera negativa, la no emergencia del rasgo observacional X) puede depender a tal grado de la formulación y del alcance de los procedimientos experimentales —esto es, de los (PNE) y los (PNTC) para el caso de los EM— que difícilmente puede aceptarse que X sea una evidencia confiable sin caer en la circularidad argumentativa mencionada más arriba. De ser así, la dependencia de los procedimientos experimentales que exhiben los EM —y también los experimentos “reales”— es susceptible de analizarse en los mismos términos de la dependencia teórica de los conceptos observacionales que muestran las teorías científicas.

Desde el punto de vista metodológico, otro de los problemas es que los presupuestos empíricos y teórico-conceptuales, implí-

citados en la formulación de un EM, pueden concebirse y diseñarse —ex profeso— de manera que su ejecución excluya la inferencia de entidades —fenómenos, hechos y procesos científicos no predichos por el EM o “visión del mundo”— que está detrás de su formulación, con el fin de alcanzar el éxito cognitivo esperado. Cuando este tipo de “exclusiones” son involuntarias, entonces estamos ante un “problema lacunae”.⁵ Sin embargo, lo que me interesa enfatizar aquí es que la emergencia —o no emergencia— de un rasgo específico X en el procedimiento experimental —causada por omisiones, fallas o manipulaciones voluntarias o involuntarias— puede repercutir en una deficiente interpretación de los resultados cognitivos inferidos de un EM específico.

4.3. CONCLUSIONES

No todos los “datos” teóricos están involucrados en los presupuestos empíricos y teórico-conceptuales utilizados en el diseño y construcción de los EM. Sin embargo, es un hecho que existen los llamados “cortes”, los cuales se aplican a los datos en sí mismos o a los análisis de los resultados obtenidos experimentalmente. Como señalé antes, una manera de validar estos resultados es “variar” los cortes y corroborar si los resultados son estables. No obstante, como es de esperarse, esos cortes también repercuten en la interpretación que se hace de los resultados cognitivos obtenidos por los EM.

Utilizar ciertas porciones de datos, ya sea de naturaleza empírica (PNE) o teórico-conceptual (PNTC), implica la exclusión de otras porciones. Asimismo, la decisión de variar los cortes de una manera determinada y no de otra, es una forma de manipular no sólo los presupuestos que se asumen previamente en el diseño y construcción de un EM específico, sino también los resultados cognitivos que se infieren de este tipo de experimentos. Este conjunto de sesgos puede debilitar la capacidad de los EM para producir conocimiento “objetivo” del mundo.

⁵ Realicé un análisis de los problemas lacunae en *Revista de Filosofía* (Islas 2014).

Para tratar de lidiar con este problema, en el siguiente y último capítulo usaré la idea de “corroboración” y la vincularé con la noción de “incremento de la probabilidad” con el fin de sugerir algunas reglas de corte lógico, útiles para la evaluación del éxito cognitivo de dos o más EM en competencia.

5. Reglas evaluativas de los experimentos mentales

La intención de este libro no ha sido corroborar o falsar empíricamente los resultados cognitivos de los experimentos mentales. Evidentemente, un trabajo de esta índole requeriría varios estudios de caso, lo que no ha sido mi objetivo. En este capítulo utilizaré la idea de “corroboración” empírica, ligada a la noción de “incremento de la probabilidad” de los EM, para sugerir algunas reglas que pueden servirnos de *guía* para 1) evaluar el éxito cognitivo de este tipo de experimentos y, 2) comparar el éxito explicativo de diferentes EM en competencia, *independientemente* del debate y repercusiones en torno a si el conocimiento producido por este tipo de experimentos es de naturaleza empírica o teórico-conceptual, como he discutido hasta aquí.

A lo largo de este libro, he sugerido que los defensores de posturas instrumentalistas de los EM consideran que la confiabilidad epistémica de éstos depende de la evidencia proporcionada por sus resultados cognitivos. No obstante, como señalé en el cuarto capítulo, esta evidencia puede fundamentarse sobre una base empírica y teórico-conceptual sesgada. En este capítulo se verá cómo la prueba a la que puede someterse un EM tiene una naturaleza condicional BK, $(IC \rightarrow E)$ —por sus iniciales en inglés—. BK denota el conocimiento previamente aceptado (*background knowledge*), IC indica el conjunto de condiciones iniciales que han sido previamente establecidas por el EM (*initial conditions*) y E (*evidence*) denota la evidencia implícita en los resultados cognitivos proporcionados por el EM. Con estas herramientas mostraré

que un EM es explicativamente “exitoso” si, y sólo si (*sii*) implica la evidencia que debe explicar, y “fracasa” explicativamente *sii* la evidencia disponible no la implica el EM.

Para desarrollar esta idea, primero mostraré que existen varias razones —unas de corte lógico y otras de tipo cognitivo— que nos impiden aceptar el fracaso explicativo de un EM de manera *concluyente*. Para aquellos que no estén familiarizados con temas de probabilidad lógica, comenzaré explicando la simbología a utilizar y expondré algunas nociones básicas de probabilidad de un lenguaje de primer orden. De cualquier manera, las razones de tipo cognitivo, expuestas posteriormente, son suficientes para mostrar que es inaceptable establecer conclusivamente el fracaso de un EM.

5.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE PROBABILIDAD

Para desarrollar esta sección, me valdré de la siguiente simbología lógica: \neg representa la negación de una proposición, \vee (la disyunción), \wedge (la conjunción), \rightarrow (el condicional), \vDash (la implicación lógica), \nVdash (la negación de la implicación lógica), \equiv (la equivalencia lógica), $P[A|B]$ (el grado en que B justifica inductivamente A).

A continuación, expondré algunas nociones básicas de probabilidad de un lenguaje de primer orden.¹ La probabilidad de un lenguaje de primer orden es una función que le asigna un número entre el cero (0) y el uno (1) a cada oración de ese lenguaje. En las leyes de la probabilidad de un lenguaje de primer orden si A es una oración de ese lenguaje, entonces los siguientes principios se cumplen:

$$P1. 0 \leq P(A) \leq 1$$

$$P2. \text{ Si } A \text{ y } B \text{ son lógicamente incompatibles, entonces } P(A \vee B) = P(A) + P(B)$$

¹ El lector con conocimientos previos en probabilidad de lenguajes de primer orden puede dirigirse directamente al siguiente apartado.

P3. Si A es lógicamente necesaria, entonces $P(A) = 1$

Se dice que la probabilidad de P es regular si y sólo si (*sii*) la condición de P también es necesaria, esto es, *sii* ninguna oración contingente tiene probabilidad 1. Dada la probabilidad de P en un lenguaje L , la condición de probabilidad $P(B|A)$ se define por los pares de oraciones A, B cuando $P(A)$ es positivo:

Si $P(A) > 0$ entonces $P(B|A) = P(A \wedge B)/P(A)$

Las oraciones A, B son independientes en P si:

$P(A \wedge B) = P(A)P(B)$

El conjunto $\{A_1, \dots, A_k\}$ es completamente independiente en P *sii* para cada subconjunto no vacío $\{B_1, \dots, B_n\}$ de $\{A_1, \dots, A_k\}$ se cumple:

$P(B_1 \wedge \dots \wedge B_n) = P(B_1)P(B_2) \dots P(B_n)$

De lo anterior se sigue que:

C1. Si A es lógicamente inconsistente entonces $P(A) = 0$

C2. $P(A) + P(\neg A) = 1$

(Nótese que cada oración consistente tiene una probabilidad positiva).

Si A y B son lógicamente equivalentes, entonces:

$[(A \wedge B) \vee \neg A]$ y $[(A \wedge B) \vee \neg B]$ son ambos lógicamente necesarios.

Así, por $P2$ y $P3$, si A y B son lógicamente equivalentes, entonces:

$P(A) = P(A \wedge B) = P(B)$

Y entonces, puede afirmarse que:

C3. Las oraciones que son lógicamente equivalentes siempre son “equiprobables”.

C4. Si $P(A)$, $P(B)$ son ambas positivas, entonces A y B son independientes en P sii $P(B|A) = P(B)$.

Si A y B son independientes en P , entonces:

C5. Si A y B son independientes en P , entonces A y $\neg B$ son independientes en P .

5.2. LOS EXPERIMENTOS MENTALES Y LA ARGUMENTACIÓN INDUCTIVA

La lógica inductiva es un sistema de justificación de la evidencia obtenida a partir de inferencias no conclusivamente verdaderas, esto es, de inferencias probables. En un argumento *deductivo válido*, las premisas “implican” de manera lógica la conclusión, donde la implicación significa que la verdad de las premisas le confiere una garantía de verdad a la conclusión (Hawthorne 2014). En un argumento *inductivo válido*, las premisas deberían conferir algún grado de “justificación” a la conclusión, donde la justificación inductiva significa que la verdad de las premisas indica con cierto “grado” de certeza la verdad de la conclusión.

El problema de la inducción se relaciona con la manera de justificar los métodos inductivos. A pesar de que éstos son esenciales en el razonamiento científico y en el razonamiento general de nuestra vida cotidiana, el problema de su justificación nos conduce al siguiente dilema. Por un lado, un método inductivo no puede justificarse deductivamente dada la naturaleza contingente de sus premisas (sólo las verdades necesarias pueden justificarse deductivamente). Por otro lado, un método inductivo tampoco puede justificarse inductivamente, argumentando, por ejemplo, que estas metodologías han sido “confiables en el pasado”. Este argumento nos llevaría a cometer la falacia

de petición de principio, al asumir lo que se supone está bajo justificación.

La lógica deductiva, al menos la que concierne a la lógica de primer orden, es demostrablemente completa, esto es, las premisas de un argumento deductivo construido acorde con las reglas de esta lógica deductiva implican la conclusión del argumento. En cambio, la lógica inductiva no cuenta con una teoría acabada ni demostrablemente completa. En realidad, no existe un solo grupo de reglas que nos conduzca a la obtención de un “buen” argumento inductivo. La razón de ello es que la conclusión —la cual puede inferirse de los argumentos inductivos— no “preserva” la verdad de sus premisas como sí lo hacen los argumentos deductivos. De hecho, las premisas de un argumento inductivo podrían conducirnos a la obtención de una conclusión falsa. No obstante, existen varios intentos que buscan justificar una teoría de la inducción. A continuación, revisaré a detalle algunas propuestas.

Para que la lógica de una buena argumentación inductiva adquiera cierto valor cognitivo, se requiere que su justificación cumpla con el siguiente criterio de adecuación, a saber, CoA:

El grado en el que la acumulación de la evidencia de enunciados verdaderos justifica una hipótesis a partir de ciertos criterios de medición lógica, debe establecer sin ambigüedad que las hipótesis falsas son probablemente falsas y que las hipótesis verdaderas son probablemente verdaderas.

Revisaré un ejemplo de un argumento inductivo:

Cada cuervo visto en una muestra aleatoria de 5 000 cuervos ha sido negro. Por lo tanto, esta muestra apoya con cierto grado de certeza que los cuervos son negros.

Un argumento de este tipo es inductivo por *enumeración* de casos. Para poder analizarlo lógicamente, lo primero que debe hacerse es caracterizarlo de manera semiformal de la siguiente manera:

Premisa: En una muestra aleatoria S , la cual integra n miembros de la población B , la proporción de los miembros de la muestra con el atributo A es r .

Por lo tanto: Con un grado de justificación p .

Conclusión: La proporción de todos los miembros de B que tienen el atributo A está entre un rango de $r - q$ y $r + q$ (esto es, está dentro del margen de error q de r).

Una caracterización formal del mismo argumento es la siguiente:

Premisa 1: La frecuencia (o proporción) de los miembros con un atributo A entre los miembros de S es r

Formalización: $F[A, S] = r$

Premisa 2: S es un ejemplo aleatorio de B

Formalización: Aleatoriedad $[S, B, A]$

Premisa 3: El ejemplo S tiene exactamente n miembros.

Formalización: Tamaño $[S] = n$

Por lo tanto: Con el grado de justificación p

Formalización: ===== $\{p$

Conclusión: La proporción de todos los miembros de B que tienen el atributo A está dentro del rango $r - q$ y $r + q$.

Formalización: $F[A, B] = r \pm q$

Por supuesto, el problema para una lógica inductiva formal de este tipo es 1) establecer el grado de probabilidad p para el cual las premisas de un argumento enumerativo justifican inductiva-

mente la conclusión dentro del margen de error q y, 2) satisfacer el criterio de adecuación CoA, señalado más arriba.

En un argumento inductivo por enumeración, si la conclusión expresa la proporción aproximada mediante la cual un atributo específico de una población determinada es verdadero, entonces es probable que un número “suficiente” de ejemplos aleatorios de esta población nos proporcione las premisas verdaderas para construir un buen argumento inductivo que le confiera un grado de justificación p a la conclusión cercana al 1.

Sin embargo, no todos los argumentos inductivos son enumerativos. Esta forma de inducción sólo puede aplicarse a la justificación de argumentos que implican condiciones universales simples de la forma: todos los B son A , y para argumentos relacionados con la proporción de un atributo específico en una población dada. Como se vio previamente, la justificación para este tipo de argumentos sólo funciona cuando la evidencia a favor está basada en los ejemplos observados de B que son o no son A . Existen otras teorías e hipótesis científicas de tipo inductivo que no tienen esta forma enumerativa. La teoría mecánica de Newton, mencionada anteriormente, es un buen ejemplo. Las tres hipótesis centrales (o leyes) de la mecánica newtoniana afirman que todos los objetos permanecen en reposo o exhiben un movimiento uniforme y rectilíneo a menos que se les obligue a cambiar su estado mediante una fuerza externa que actúe sobre éstos. Cuando esto ocurre, el cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impuesta sobre el objeto en cuestión y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se impuso. Por último, a toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria.

La evidencia a favor o en contra de estas tres hipótesis no puede obtenerse buscando y examinando al azar un conjunto de objetos y fuerzas que actúan sobre los cuerpos. Esta teoría debe ponerse a prueba mediante el cálculo de fenómenos observables en una gran variedad de contextos específicos y entonces corroborar si el fenómeno descrito por la teoría es el caso. De acuerdo con los defensores de las lógicas inductivas, este tipo

de teoría puede comprobarse con una lógica inductiva, esto es, se argumenta que una explicación de tipo inductivo no puede reducirse a los casos de la inducción enumerativa, como en el argumento de los cuervos negros. De manera que una explicación inductiva también debería explicar la lógica del razonamiento hipotético, como en el caso de la mecánica newtoniana. La prueba para este tipo de razonamiento debe basarse en la corroboración de las predicciones que se hacen de observaciones específicas. Para el caso de los EM, la prueba inductiva debe sustentarse en la justificación de la evidencia proporcionada por los resultados cognitivos que se infieren del EM.

Ahora bien, en este punto podemos preguntarnos cómo aplicar la argumentación inductiva a los EM. Para resolver esta cuestión, conviene comenzar postulando y explicando los siguientes seis axiomas. Si L es un lenguaje para predicados lógicos con identidad y, como ya mencioné, \models representa la implicación lógica y $\not\models$ representa la negación de la implicación lógica, entonces la expresión " $B \models A$ " dice que "B lógicamente implica A" y la expresión " $\models A$ " dice que "A es una tautología". Una función de justificación es una función $P\alpha$ que va de pares de oraciones de L a números reales entre 0 y 1 que satisfacen los siguientes axiomas:

Para todas las oraciones A, B y C:

1. Si $B \models A$, entonces $P\alpha [A | B] = 1$
2. Si $\models (B \equiv C)$, entonces $P\alpha [A | B] = P\alpha [A | C]$
3. Si $C \models (\sim (B \wedge A))$, entonces $P\alpha [(A \vee B) | C] = P\alpha [A | C] + P\alpha [B | C] - 1$
4. $P\alpha [(A \wedge B) | C] = P\alpha [A | (B \wedge C)] \times P\alpha [B | C]$.²

A continuación, explicaré cada uno de estos axiomas, sobre todo para el lector no familiarizado con este tipo de lenguajes lógicos. Cada grado de justificación de la función $P\alpha$ en L mide la "fuerza" de justificación con valores numéricos entre el 0 y el 1 (con una justificación máxima en 1). Así, el axioma 1 nos

² Nótese que la idea de "justificación" inductiva aquí desarrollada se basa en una generalización de la relación deductiva de la implicación lógica.

dice que cuando B lógicamente implica A , la justificación de A , basada en B , es máxima, esto es, igual a 1. El axioma 2 establece que, si B es lógicamente equivalente a C , entonces las premisas de B como las premisas de C confieren la misma justificación para cada conclusión. El axioma 3 establece que si la justificación inductiva se incrementa plausiblemente cuando C implica lógicamente la incompatibilidad de A y B , entonces la justificación que C le confiere a B y A , respectivamente, puede sumarse a la justificación para la disyunción (la excepción a este axioma es cuando C implica una contradicción lógica y justifica a todos los enunciados con un grado de probabilidad 1). Finalmente, para comprender el axioma 4, debe pensarse en la justificación de la función $P\alpha$ como la descripción de un mundo o estados hipotéticos posibles (por ejemplo, los implicados en ciertos EM). Así, si A es verdadera en un mundo o estado hipotético posible donde B y C son verdaderas, y si B , junto con C , es verdadera en todos los mundos y estados hipotéticos posibles, entonces A , B y C son verdaderas.

A partir de estos cuatro axiomas, pueden establecerse dos axiomas más de suma importancia para el tema de los EM.

Axioma 5. Si A es un axioma de un conjunto de teorías científicas sólidamente establecidas o de una parte de la matemática pura empleada por una teoría científica bien establecida; o si A es verdadera analíticamente, esto es, si es verdadera dado el significado de sus términos en L , entonces para todo C , $P\alpha [A | C] = 1$.

Lo que nos indica el axioma cinco es que la lógica inductiva no debe presuponer ningún valor de verdad para enunciados contingentes en L , esto es, ninguna función de justificación $P\alpha$ debe presuponer una premisa tautológica y asignarle un grado de justificación 1 a un enunciado contingente del tipo $P\alpha [C | B \wedge \sim B]$. Tal enunciado debe tener una probabilidad menor a 1 cuando C es contingente. Tal es el caso para el valor de verdad de las premisas contenidas en los PNE y los PNTC que constituyen a los EM.

La razón de lo anterior es que el objetivo de una lógica inductiva pretende explicar inductivamente la probabilidad de los

valores de verdad, de la conclusión inferida *válidamente de un argumento* con premisas contingentes. La lógica inductiva no puede lograr este objetivo si se “presuponen” los valores de verdad de las premisas involucradas en el argumento o en el EM. El *último* axioma resume este objetivo de la siguiente manera.

Axioma 6. Si para todo C , $P\alpha [A | C] = 1$, entonces A es 1) una verdad lógica, 2) un axioma de un grupo de teorías sólidamente establecidas, 3) una parte de la matemática pura empleada por una teoría científica bien establecida o, 4) una verdad analítica de acuerdo con el significado de los términos de L , tal y como se representan en $P\alpha$.

Nótese que un valor de verdad asignado a una oración de un lenguaje L representa la verdad —o falsedad— “actual” (no sólo posible) de estas oraciones, y su asignación “depende” del significado de los términos no lógicos, así como del estado actual del mundo.

Ahora bien, dado que todo argumento inductivo involucra premisas contingentes, la función de “probabilidad” para este tipo de argumentos está ligada al tipo de justificación que le confiere la lógica inductiva a la conclusión de un argumento con premisas contingentes. Existen dos posibles caminos para ello:

1. La probabilidad condicional “ $P\alpha [A | B]$ ” se define como la razón de probabilidad incondicional “ $P\alpha [A \wedge B] / P\alpha [B]$ ”, donde cada función de probabilidad $P\alpha$ representa la “fuerza de la creencia” en $[A \vee B]$ de un agente “idealmente” racional.³

2. Cada $P\alpha$ es una medida de los mundos posibles o estados hipotéticos posibles. La idea es que, si tenemos un lenguaje L completamente signifiante, entonces es el caso de “ $P\alpha [A | B] = r$ ”, es decir, de entre todos los mundos posibles en los cuales B es verdadero, A es verdadero en proporción r .

La opción 1 la excluiré del presente análisis por la siguiente razón. De acuerdo con esta opción, el agente debe estar “convencido” de que cierta evidencia E es $= 1$ para cada una de las hipótesis bajo prueba. Esto es, si $Q\zeta$ es la “función de creencia”

³ Para un estudio sobre el grado de creencia y el de justificación de la lógica bayesiana, véase Hawthorne 2005.

de este agente y $Q_z [E] = 1$, entonces se sigue de los axiomas de la teoría de la probabilidad que $Q_z [E | H \wedge BK \wedge IC] = 1$ *independientemente* de lo que pueda decir H , esto es, incluso si H implica que E es poco probable dados BK e IC . De modo que la única manera para que la función de creencia del agente pueda capturar apropiadamente la probabilidad “objetiva” de E , es cuando E está completamente aislada de las restantes creencias del agente. Esta cuestión es prácticamente imposible pues todo agente está condicionado por el contexto, el cual le impide —por naturaleza— ser un agente racional idealmente perfecto.

Para los fines que aquí me interesan, desarrollaré la segunda opción. La lógica inductiva sugiere que el grado en el cual la evidencia (E) justifica una Hipótesis (H) es relativa a las hipótesis auxiliares (H auxiliares), al conocimiento previamente aceptado (BK) y a las condiciones iniciales (IC) representadas en la probabilidad posterior de H ($H, P\alpha [H | BK \wedge IC_n \wedge E_n]$). La probabilidad posterior representa el grado de plausibilidad de la hipótesis H que resulta de la evidencia E y es una función de justificación de la forma:

$$P\alpha [E | H \wedge BK \wedge IC]$$

Esta función expresa cuán probable es que el resultado E ocurra de acuerdo con H , BK e IC . En otras palabras, según esta postura, la probabilidad inductiva representa el *contenido empírico* de la hipótesis, esto es, lo que la hipótesis H (junto con BK e IC) probabilísticamente implica sobre la evidencia E . En el caso que ocupa a este libro, esto significa lo que el EM, el PNE y el PNTC probabilísticamente implican sobre el resultado cognitivo del EM.

Sin embargo, esta postura todavía debe resolver el problema de la objetividad científica que puede alcanzar un EM, la cual se basa en el “grado” de acuerdo intersubjetivo entre los científicos que evalúan un EM a partir de los valores numéricos asignados a su probabilidad inductiva. En este sentido, una vez dado un conjunto de resultados cognitivos de un EM, la probabilidad de que tales resultados sean objetivos tiene la forma:

$P\alpha [E | H \wedge BK \wedge IC] = r$, donde r oscila entre 0 y 1.

No obstante, la objetividad de los valores numéricos asignados a la probabilidad inductiva también depende de la probabilidad “previa” de la hipótesis H basada en BK e IC . Esta probabilidad previa representa el “peso” cognitivo de las consideraciones ajenas a la evidencia. Un ejemplo de este tipo de consideraciones son las “visiones del mundo” que están detrás de la formulación de un EM, como en el caso del debate entre EPR y Bohr, revisado en el primer capítulo.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, considero que con la siguiente regla general, cuasi formal, de la probabilidad inductiva, es posible comparar dos o más EM en competencia:

Una vez dado cualquier par de hipótesis H defendidas por dos EM incompatibles (EM_1 y EM_2), sin importar la probabilidad con la que $P\alpha [En | H_2 \wedge BK \wedge ICn]$ y $P\alpha [En | H_1 \wedge BK \wedge ICn]$ estén definidas, la evidencia $E (Cn \wedge En)$ justifica H_2 sobre H_1 , dada BK , *si* $P\alpha [En | H_2 \wedge BK \wedge ICn] > P\alpha [En | H_1 \wedge BK \wedge ICn]$. La proporción de la probabilidad $P\alpha [En | H_1 \wedge BK \wedge ICn] / P\alpha [En | H_2 \wedge BK \wedge ICn]$ mide la plausibilidad de la evidencia para H_2 sobre H_1 , dada BK .

Nótese que esta regla general de la probabilidad funciona a un nivel explicativo siempre y cuando se considere que el valor de la probabilidad $P\alpha$ de un EM no es absoluto. No obstante, la probabilidad de una hipótesis H contenida en un EM está dada en α para indicar que esta ley general de la probabilidad es válida para *cada función* de justificación inductiva $P\alpha$, *incluso* cuando los valores de la probabilidad todavía no son “objetivos” o no gozan de un consenso universal por la mayoría de los agentes de una comunidad científica dada. De ahí que existan distintos EM en competencia, como vimos anteriormente.

Puede argumentarse que se requiere de una inferencia de probabilidad directa para tener “bien” una probabilidad, es decir, que la hipótesis H constitutiva de un EM (junto con BK e IC) “implique lógicamente” sus resultados cognitivos. De ser este el caso, requerimos de una justificación deductiva de los

resultados cognitivos de los EM. En el siguiente apartado veremos que también la justificación deductiva exhibe ciertos problemas en la aplicación de la medición de la evidencia implicada por los EM.

5.3. LOS EXPERIMENTOS MENTALES Y LA ARGUMENTACIÓN DEDUCTIVA

El apartado anterior tuvo que formularse en términos técnicos. No obstante, esta sección será más asequible para aquellos lectores que no están familiarizados con el lenguaje utilizado anteriormente. Existen dos tipos de explicaciones ligadas a las relaciones lógicas entre el explanandum y el explanans de un argumento deductivo. Carl Hempel (1966) y Karl R. Popper (1959 [1934]), entre otros autores, desarrollaron el método hipotético-deductivo (H-D) de la explicación científica, con el objetivo de determinar en qué condiciones una hipótesis (H) es verdadera o falsa, por lo tanto, se trata de un método de prueba. Si se considera que los EM contienen una hipótesis explicativa, entonces el método H-D se puede utilizar para establecer la plausibilidad de un EM en relación con los éxitos y fracasos explicativos que exhibe.

La prueba a la que puede someterse un EM —o una hipótesis (H) que implique un EM— tiene una naturaleza condicional $BK, (IC \rightarrow E)$, donde BK , como ya señalamos, denota el conocimiento previamente aceptado, IC indica el conjunto de condiciones iniciales que han sido previamente establecidas por un EM y E denota la evidencia implícita en los resultados cognitivos producidos por el EM.

Es importante enfatizar que una hipótesis (H) bajo prueba, generalmente se basa en ciertas hipótesis auxiliares que la ligan a la evidencia (E). Sin embargo, incluso cuando una hipótesis auxiliar está “bien confirmada”, no es posible asumirla como “verdadera”. Es decir, el soporte empírico de una hipótesis (H) bajo prueba es relativo a estas hipótesis auxiliares, las cuales, a su vez, pueden estar bajo prueba desde otros contextos. De lo anterior

se infiere que aquello considerado una hipótesis (H), una hipótesis auxiliar, un BK aceptado, e incluso una IC, dependen del contexto epistémico donde surgen estas variables. En otras palabras, ningún enunciado es intrínsecamente una H, una hipótesis auxiliar, un BK o una IC.

Por otro lado, existen varias nociones de “consecuencia lógica” en la literatura filosófica sobre el tema.⁴ Sin embargo, dos maneras básicas de explicar una consecuencia lógica son: 1) mediante un sistema deductivo que consiste en una lista de axiomas y reglas de inferencia y, 2) mediante un modelo semántico de interpretación de lenguajes formales. Para los fines que aquí persigo, me concentraré en el primer tipo de explicación deductiva de la consecuencia lógica en el que Γ es un conjunto de proposiciones del lenguaje natural, γ es un conjunto de fórmulas, φ es una fórmula bien constituida de un lenguaje formal dado y D es un sistema deductivo.

Así, un argumento $\langle \varphi, \gamma \rangle$ en un lenguaje formal es deductivamente válido si existe una secuencia de fórmulas que culminan con φ , de modo que cada integrante de la secuencia es un miembro de γ o un axioma de D , o se rige por una de las reglas de inferencia aceptadas de D . De manera semiformal:

- (a) φ es una consecuencia lógica de Γ si es posible deducir φ de Γ mediante una secuencia legítima y “autoevidente” de reglas de inferencia de D .

Con una definición de este tipo, el primer problema a tomar en cuenta es que siempre es posible cuestionar la validez “autoevidente” de las reglas de inferencia aceptadas en D . Ahora bien, la lógica básica del método H-D puede representarse a partir de la aplicación del *modus ponendo ponens*, de manera que la evidencia E constituye un éxito empírico para un EM que es relativo a BK e IC cuando:

⁴ Stewart Shapiro (2005) ofrece una excelente revisión de varios conceptos de consecuencia lógica.

Esquema 1

$$\begin{array}{c} EM \models (BK, IC \rightarrow E) \\ EM, BK, IC \\ \hline E \end{array}$$

Por la implicación del *modus tollendo tollens*, la evidencia *E* constituye un *fracaso empírico* para un EM relativo a *BK* e *IC* cuando:

Esquema 2

$$\begin{array}{c} EM \models (BK, IC \rightarrow E) \\ BK, IC \text{ y } \neg E \\ \hline \neg EM \end{array}$$

El caso que nos interesa enfatizar aquí es cuando en un EM y una evidencia *E* no existe una *BK* universalmente aceptado ni una *IC* disponible que expliquen *E* (en el caso de éxito empírico):

Esquema 3

$$EM, BK, IC \not\models E$$

O la negación de *E* (en el caso de fracaso empírico):

Esquema 4

$$EM, BK, IC \not\models \neg E$$

De acuerdo con Aliseda (2005), los esquemas 3 y 4 caracterizan la posibilidad lógica de los llamados “problemas lacunae”. Ciertamente, un EM puede enfrentar este tipo de problemas cuando la evidencia *E* disponible no *confirme* ni *disconfirme* el EM en cuestión. En la base de este argumento está la idea de que todos los EM surgen en un estado de “incompletitud” intrínseca;

asimismo, también existen razones de tipo cognitivo que apoyan esta idea. Revisaré algunas de estas razones.

Por un lado, la formulación de un EM está necesariamente circunscrita a tres aspectos esenciales, a saber, las hipótesis auxiliares, el conocimiento previamente aceptado (BK) utilizado para su construcción (los PNE y los PNTC) y la formulación de ciertas condiciones iniciales (IC).⁵ Estas tres cuestiones demarcan, necesariamente, el alcance cognitivo de un EM y, por ello, determinan el estado de incompletitud intrínseca a su surgimiento.

Por otro lado, y ligado al argumento anterior, sería ingenuo pensar que un solo EM puede explicar todas las entidades, fenómenos, hechos y procesos científicos que están —o pueden estar— en su espectro explicativo. La afirmación anterior se puede sustentar en tres razones cognitivas:

1. Tal espectro es, en principio, potencialmente infinito.
2. La limitación cognitiva de los científicos que construyen el EM.
3. El alcance heurístico de un EM en un momento específico t_1 .⁶

La evidencia disponible para evaluar los resultados cognitivos de un EM puede ser neutral; asimismo, también sabemos que un EM puede no ser falsado de manera conclusiva. En la siguiente sección revisaré este argumento y sus implicaciones para la mejor comprensión de los EM.

5.4. LOS EXPERIMENTOS MENTALES Y LA FALSACIÓN EMPÍRICA

En la sección anterior vimos que los EM se construyen a partir del conocimiento previamente aceptado (BK) (en nuestros términos: PNE y PNTC) y de la formulación de ciertas condiciones iniciales

⁵ Las condiciones iniciales (IC) pueden, o no, incluir las llamadas cláusulas *ceteris paribus*.

⁶ Un rasgo interesante de los EM es que su poder heurístico puede ampliarse en t_2 .

(IC). Partiendo de estas premisas, un EM es *explicativamente exitoso* sii implica la evidencia *E* que se supone debe explicar (véase el esquema 1 del apartado anterior) y *fracasa explicativamente* sii a la evidencia *E* no la implica el EM (véase el esquema 2 de la sección anterior). El caso que me interesa tratar en esta sección es este último, esto es, el fracaso empírico de un EM. En la literatura filosófica sobre el tema, pueden rastrearse varias razones para no aceptar que un EM fracase explicativamente de manera *conclusiva*. Revisaré tres argumentos.

1. Ya he mencionado el consenso de que toda prueba general de la implicación lógica de un EM no puede obtenerse sin apelar de manera implícita o explícita a una o más hipótesis auxiliares que circundan la hipótesis central de la que parte el EM. Estas hipótesis auxiliares no son parte sustancial del EM, a pesar de estar íntimamente relacionadas con la hipótesis central utilizada para expresar el conocimiento previamente aceptado (PNE y PNTC) con el que los EM se construyen. Ahora bien, si las hipótesis auxiliares son indispensables para derivar la prueba general a la cual se somete la hipótesis central del EM, entonces es posible adjudicar la causa del “error” explicativo —en caso de que el EM fracase explicativamente— a las hipótesis auxiliares, al menos parcialmente. Sin embargo, dado que tradicionalmente las hipótesis auxiliares suelen ser altamente *idealizadas*, es posible argumentar que éstas no están suficientemente *concretizadas* y, así, rechazar el fracaso explicativo del EM, al menos hasta que las hipótesis auxiliares puedan concretizarse.

Un ejemplo paradigmático de una hipótesis idealizada es la ley del péndulo de Galileo. Para elaborarla, imaginó un péndulo que no estaría sujeto a la resistencia del aire y cuya cuerda no tendría masa ni sería elástica. Este péndulo ideal oscilaría indefinidamente con la misma amplitud y el mismo periodo, de modo que su ley obedece a lo siguiente: “el número de veces que oscila un cuerpo colgado de una cuerda es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de la cuerda” (Galilei 1914 [1638], 97).⁷

⁷ Por supuesto, el concepto de “idealización” tal y como es utilizado aquí, no es unívoco. Al respecto, algunos autores han identificado hasta tres dife-

2. La derivación de una prueba general de la implicación presupone que los presupuestos lógico-matemáticos en los cuales se fundamenta están convincentemente justificados, aspecto que en principio es cuestionable. Es decir, los PNTC con los que se construye un EM también pueden ponerse en duda.

3. Desde un punto de vista histórico, existen casos en los que una hipótesis H que fracasó explicativamente en t_1 , se reconsidera en t_2 . Por ejemplo, en el siglo XVII se construyeron dos teorías acerca de la naturaleza de la luz: la teoría corpuscular defendida por Isaac Newton (1643-1727), quien sostuvo que los haces se forman mediante *corpúsculos* o diminutas partículas luminosas y la teoría ondulatoria defendida por Christiaan Huygens (1629-1695), quien consideró la luz un fenómeno ondulatorio análogo al sonido.

Al comienzo del siglo XIX, la teoría ondulatoria la apoyaron Thomas Young (1773-1829) y Augustin-Jean Fresnel (1788-1827). Años más tarde, cuando Leon Foucault (1819-1868) ejecutó algunos experimentos en torno a la velocidad de la luz en diferentes medios como el aire y el agua, el modelo ondulatorio se convirtió en el más aceptado, en contraposición al corpuscular, que comenzó a abandonarse. Sin embargo, al comienzo del siglo XX, a partir de los trabajos de Louis-Victor de Broglie (1892-1987), entre otros científicos, se descubrieron algunos fenómenos que, por un lado, parece que sólo pueden explicarse con el modelo corpuscular y, por otro, consideran que la materia presenta características tanto ondulatorias como corpusculares. Este ejemplo muestra que el rechazo de una teoría científica particular en t_1 puede *reconsiderarse* en t_2 a partir de la nueva evidencia disponible, por lo tanto, el fracaso explicativo es, en principio, contingente. En resumen, hasta aquí hemos establecido lo siguiente:

- a. Hemos visto que todo EM surge en un estado de incompletitud intrínseco.

rentes tipos de idealizaciones utilizadas en ciencias naturales: las llamadas idealizaciones galileanas, las minimalistas y los modelos múltiples (véase Elliott-Graves y Weisberg 2014). Otros autores han hecho una distinción tajante entre una idealización y una abstracción (véase Oh 2016).

- b. Que vía la aplicación del *modus ponendo ponens*, podemos establecer el éxito empírico de un EM (aunque de manera sólo probable).
- c. Que vía la aplicación del *modus tollendo tollens*, podemos establecer el fracaso empírico de un EM.
- d. Existen, sin embargo, tres argumentos para sugerir que no es posible establecer de manera *conclusiva* el fracaso de un EM.

Lo que nos resta es establecer una manera de comparar y evaluar dos o más EM exitosos y en competencia. Para ello, en la siguiente sección sugeriré algunas reglas útiles para tal objetivo.

5.5 REGLAS PARA EVALUAR EXPERIMENTOS MENTALES EN COMPETENCIA

Hasta aquí he preparado el camino con el fin de proponer algunas reglas que considero útiles para comparar el éxito de dos o más EM en competencia. Me interesa enfatizar que la validez de estas reglas es independiente del debate en torno a si el conocimiento producido por este tipo de experimentos es de naturaleza empírica o teórico-conceptual. Esta característica no es menor si pensamos que no previene de enfrascarnos en el debate en torno a los EM en los últimos años.

Ya hemos dicho que una teoría probabilística puede explicar la idea de la corroboración cuantitativa como el incremento de la probabilidad de un EM dada la evidencia proporcionada por sus resultados cognitivos. Siguiendo a Theo Kuipers (2000), esta concepción de la corroboración es contraria a la tradicional, en la cual la evidencia es la que hace más o menos plausible un EM. En nuestro caso, aplicaremos la postura de Kuipers, quien afirma lo contrario, es decir, que el EM es el que hace más o menos plausible la evidencia.

Partiendo de esta idea alternativa de corroboración, lo primero que debemos conceder es la identificación de la noción

de “probabilidad” con la de “plausibilidad”. Si ésta se interpreta como el conocimiento empírico (PNE) y teórico-conceptual (PNTC) previamente aceptado en la construcción de un EM, podemos generar una regla donde E es la evidencia y RC los resultados cognitivos que se infieren válidamente de un EM:

Regla 1. La E proporcionada por el RC corrobora el EM *sii* el EM hace más plausible a E .

Quiero enfatizar que esta regla implica que es el EM es el que hace plausible la evidencia E y no al revés, esto es, no es la evidencia E la que hace plausible un EM. Esta cuestión aplica porque, como mostré en el cuarto capítulo, los PNE y los PNTC implícitos en la construcción de cualquier EM pueden estar “viciados” de origen, debido a la utilización de ciertas porciones de datos que necesariamente excluyen otras porciones de datos. Asimismo, como se vio, la decisión de variar los cortes que se aplican a estos datos de una manera determinada y no de otra, es una forma de manipular no sólo los presupuestos que se asumen previamente en el diseño y en construcción de los EM, sino también los resultados cognitivos (RC) que se infieren de este tipo de experimentos. Este tipo de sesgos debilitan la capacidad de los EM para producir conocimiento “objetivo” del mundo. Sin embargo, debido a que esta clase de vicios es inherente a todos los EM, las reglas que aquí se sugieren para comparar dos o más, son independientes de estos sesgos.

La regla 1 tiene una función evaluativa relevante y práctica: si se quiere comparar dos o más EM con diferentes RC, como en el caso de los EM propuestos por Arquitas y Aristóteles, entonces:

Regla 2. El RC corrobora el EM_1 más que el RC^* corrobora el EM_2 *sii* el EM_1 incrementa la plausibilidad de la E más de lo que el EM_2 incrementa la plausibilidad de la E^* .

Como se señaló en el primer capítulo, la comparación entre la plausibilidad del EM_1 y la plausibilidad del EM_2 puede ser mutuamente inconmensurable. De manera que el incremento de la plausibilidad a la que me refiero aquí debe entenderse como endógena a cada EM.

Si se quiere evaluar dos o más EM que por formularse de manera distinta producen RC contradictorios o incompatibles en ciertos aspectos relevantes, entonces:

Regla 3. Si el EM_1 hace la E más plausible que la E^* , entonces el RC ligado a la E tiene más valor cognitivo que el RC^* ligado a la E^* .

Asimismo, si se quiere comparar el caso en el que un mismo RC corrobora dos EM diferentes, entonces:

Regla 4. Si el RC hace a la E tan plausible como la E^* , entonces el EM_1 ligado a la E tiene el mismo valor cognitivo que el EM_2 ligado a la E^* .

Sin embargo, para evitar esta indeterminación, podemos establecer la siguiente regla:

Regla 5. Si el RC corrobora igualmente al EM_1 y al EM_2 , entonces el RC corrobora al EM_1 más que al EM_2 si la E ligada al EM_1 es más plausible que la E^* ligada al EM_2 .

Y finalmente, con las cinco reglas anteriores es posible construir una regla general para la elección de dos o más EM en competencia:

Regla 6. Cuando un EM_1 ha mostrado estar mejor corroborado que un EM_2 en los términos de las anteriores reglas, elige el EM_1 (al menos en t_1).

Notemos que las reglas anteriores tratan de trazar una sutil pero determinante diferenciación entre tres factores: 1) los elementos constitutivos de un EM, 2) la plausibilidad de la evidencia (E) disponible y, 3) los resultados cognitivos ligados a 1) y a 2).

5.6. CONCLUSIONES

La lógica de la probabilidad inductiva nos ha mostrado que la estructura lógica de los EM no es suficiente para determinar la probabilidad previa que exhibe un EM específico. Los EM están sujetos a consideraciones de plausibilidad basadas en elementos ajenos a la evidencia (E), implicada por la hipótesis (H), el *background knowledge* (BK) y las *initial conditions* (IC) que los constituyen. Tal es el caso las distintas “visiones del mundo” que están detrás de

la construcción de varios EM. Sin embargo, la regla general de la probabilidad inductiva que he propuesto, así como las seis reglas sugeridas en la sección anterior para comparar dos o más EM, buscan ser válidas independientemente de los presupuestos empíricos y teóricos-conceptuales intrínsecos a la construcción de los EM.

Conclusiones generales

Con relación a la naturaleza de los EM, hemos argumentado que éstos se constituyen a partir de dos principios fundamentales intrínsecos: los principios de naturaleza empírica (PNE) y los principios de naturaleza teórico-conceptual (PNTC). En relación con las funciones cognitivas de este tipo de experimentos, he mostrado que los EM se construyen con el objetivo de cumplir múltiples fines cognitivos: suplir ciertos experimentos reales imposibles de ejecutar, ilustrar y clarificar situaciones abstractas, servir de ejemplo para el análisis conceptual, ser instrumentos pedagógicos que ayudan a despejar ciertas paradojas, servir como instrumentos heurísticos que ayudan a generar evidencia a favor o en contra de una teoría —o parte de una teoría o visión del mundo—, o ser herramientas que señalan la implausibilidad de ciertas alternativas lógicamente posibles, entre otras funciones.

A partir del análisis que hice de varios casos específicos y paradigmáticos de los EM, mostré que dos o más de estos experimentos pueden compararse cognitivamente si y sólo si sus respectivos PNE y PNTC coinciden significativamente, cuestión que difícilmente ocurre. A pesar de que en distintos EM se pueden describir los procedimientos de manera diferente, los resultados cognitivos que se infieren pueden ser válidos, de modo que el verdadero problema de la inconmensurabilidad entre dos o más EM en competencia se ubica en el nivel experimental y no en el nivel teórico. Sin embargo, el surgimiento de ciertos problemas inductivos y deductivos —producto de sesgos cognitivos y metodológicos implícitos en los presupuestos empíricos y teórico-con-

ceptuales que se asumen previamente en el diseño y construcción de un EM—, debilitan la confiabilidad epistémica de los EM.

Por todo lo anterior, antes de abandonar una teoría (o parte de una teoría) como consecuencia de la supuesta contradicción conceptual en la que se incurre —contradicción revelada por un EM específico—, los científicos tienen dos opciones:

1. Reevaluar los dos principios metodológicos (PNE) y (PNTC) con los que se construyó un EM. Esto es, revisar la hipótesis central (H) implícita en el EM; las hipótesis auxiliares que ligan los resultados cognitivos inferidos del EM con la hipótesis central; y el conocimiento previamente aceptado (BK) y las condiciones iniciales (IC), involucrados en la formulación del EM.

2. De ser el caso, corregir la contradicción o vacío conceptual implícito en la teoría, modificando o precisando algunos de sus compromisos de índole ontológico y epistemológico (o “visión del mundo”) que están detrás de cada postura.

Sin embargo, a lo largo de esta investigación mostré que es difícil establecer el valor epistémico de los EM, basándonos exclusivamente en el contenido de sus resultados cognitivos. Para poder evaluar cognitivamente un EM, es necesaria una lógica capaz de explicar la probabilidad inductiva de los valores de verdad de la conclusión, la cual se infiere válidamente de las premisas contingentes de un EM. Como señalé, utilizar una teoría probabilística de la corroboración cuantitativa puede explicar la idea de corroboración como el incremento de la probabilidad de un EM, debido a la evidencia proporcionada por sus resultados cognitivos. La regla general de la probabilidad inductiva, junto con las seis reglas propuestas para la evaluación comparativa del éxito cognitivo de dos o más EM en competencia, mostraron ser instrumentos válidos e independientes de los presupuestos empíricos y teóricos-conceptuales intrínsecos a la construcción de los EM.

Referencias bibliográficas

Aliseda, Atocha

- 2005 “Lacunae, Empirical Progress and Semantic Tableaux”. En *Confirmation, Empirical Progress, and Truth Approximation, Essays in Debate with Theo Kuipers*, edición de Robert Festa, Aliseda Atocha y Jean Peijnenburg, 169-189. Amsterdam: Rodopi.

Aristóteles

- 1941 “The Caelo”. En *The Basic Works of Aristotle*, edición de Richard McKeon, 395-466. Nueva York: Random House.

Bishop, Michael

- 1999 “Why Thought Experiments Are Not Arguments”. *Philosophy of Science* 66 (4): 534-541.
- 2012 “A Priori Knowledge of the Way the World Works”. *Metascience* 21: 687-691.

Blumson, Ben

- 2014 *Resemblance and Representation: An Essay in the Philosophy of Pictures*. Cambridge: Open Book Publishers.

Bohr, Niels

- 1935 “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”. *Physical Review* 48: 696-702.

Boniolo, Giovanni

- 1997 “On a Unified Theory of Models and Thought Experiments in Natural Sciences”. *International Studies in the Philosophy of Science* 11 (2): 121-142.

- Borge, Bruno y Guadalupe Mettini
2018 “El estatus epistémico de los experimentos mentales en ciencias fácticas”. *Kriterion* 140: 341-364.
- Borsboom, Denny, Gideon Mellenbergh y Jaap van Heerden
2002 “Functional Thought Experiments”. *Synthese* 130: 379-387.
- Brown, James
1986 “Thought Experiments Since the Scientific Revolution”. *International Studies in the Philosophy of Science* 1 (1): 1-15.
1992 “Why Empiricism Won’t Work”. *Philosophy of Science Association* 2: 271-279.
2011 [1991]. *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*. Nueva York: Routledge.
2004a “Why Thought Experiments Transcend Experience”. En *Contemporary Debates in Philosophy of Science*, edición de Christopher Hitchcock, 23-43. Oxford: Blackwell.
2004b “Peeking into Plato’s Heaven”. *Philosophy of Science* 71 (5): 1126-1138.
2013 “What Do We See in a Thought Experiment?”. En *Thought Experiments in Philosophy, Science, and the Arts*, edición de Melanie Frappier, Letitia Meynell y James Robert Brown, 53-68. Nueva York: Routledge.
- Bunzl, Martin
1996 “The Logic of Thought Experiments”. *Synthese* 106 (2): 227-240.
- Butkovic, Ana
2007 “What is the Function of Thought Experiments: Kuhn vs. Brown”. *Croatian Journal of Philosophy* VII (19): 63-67.
- Camilleri, Kristian
2014 “Toward a Constructivist Epistemology of Thought Experiments in Science”. *Synthese* 191: 1697-1716.
- Chang, Hasok
2004 *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*. Oxford: Oxford University Press.

Clatterbuck, Hayley

2013 “The Epistemology of Thought Experiments: A Non-Eliminativist, Non-Platonic Account”. *European Journal for the Philosophy of Science* 3: 309-329.

Cohnitz, Daniel

2013 “Thought Experiments Outside Science”. *Metascience* 22: 413-417.

Colaco, David, Wesley Buckwalter, Stephen Stich
y Edouard Machery

2014 “Epistemic Intuitions in Fake-Barn Thought Experiments”. *Episteme* 11 (2): 199-212.

El Skaf, Rawadad y Cyrille Imbert

2013 “Unfolding in the Empirical Sciences: Experiments, Thought Experiments and Computer Simulations”. *Synthese* 190: 3451-3474.

Einstein, Albert

1920 *Relativity: The Special & The General Theory. A Popular Exposition*. Traducción de Robert W. Lawson. Londres: Methuen & Co. L.T.D.

Einstein, Albert, Boris Podolsky y Nathan Rosen

1935 “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”. *Physical Review* 47: 777-790.

Einstein, Albert y Leopold Infeld

1938 [2014]. *The Evolution of Physics*. Cambridge: The Cambridge Library of Modern Science.

Elliott-Graves, Alkistis y Michael Weisberg

2014 “Idealization”. *Philosophy Compass* 9: 176-185.

Evans, Gareth

1982 *The Varieties of Reference*. Oxford: Oxford University Press.

Fehige, Yiitach y Michael Stuart

2014 “On the Origins of the Philosophy of Thought Experiments: The Forerun”. *Perspectives on Science* 22 (2): 179-220.

Franklin, Allan

2015 “The Theory-Ladennes of Experiment”. *Journal for General Philosophy of Science* 46 (1): 155-166.

Frappier, Mélanie, Letitia Meynell y James Brown, edición

2013 *Thought Experiments in Philosophy, Science, and the Arts*. Nueva York: Routledge.

Galileo, Galilei

1638 [1914]. *Dialogues Concerning Two New Sciences*. Traducción de Henry Crew y Alfonso de Salvio a partir de *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuoue scienze*. Nueva York: The Macmillan Company.

Galili, Igal

2009 “Thought Experiments: Determining their Meaning”. *Science & Education* 18: 1-23.

Gendler, Tamar

1998 “Galileo and The Indispensability of Scientific Thought Experiment”. *The British Journal for the Philosophy of Science* 49: 397-424.

2004 “Thought Experiments Rethought-and Reperceived”. *Philosophy of Science* 71 (5): 1152-1163.

Gooding, David

1992 “What is Experimental about Thought Experiments?”. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 2: 280-290.

Hacking, Ian

1992 “Do Thought Experiments Have a Life of Their Own?”. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 2: 302-308.

Häggqvist, Sören

2007 “The A Priori Thesis: A Critical Assessment”. *Croatian Journal of Philosophy* VI (19): 47-61.

Hawthorne, James

2005 “Degree-of-Belief and Degree-of-Support: Why Bayesians Need Both Notions”. *Mind* 114 (454): 277-320.

- 2014 “A Primer on Rational Consequence Relations, Popper Functions, and their Ranked Structures”. *Studia Logica* 102 (4): 731-749.
- Hempel, Carl
1966 *Philosophy of Natural Science*. Nueva Jersey: Prentice-Hall.
- Hume, David
2007 [1748]. *An Enquiry Concerning Human Understanding*. Oxford: Oxford University Press.
- Ierodiakonou, Katerina y Sophie Roux, edición
2011 *Thought Experiments in Methodological and Historical Contexts*. Leiden: Koninklijke Brill.
- Islas, Damián
2014 “La falsación empírica y los problemas *lacunae*”. *Revista de Filosofía* LIII (137): 33-41.
2017 “Evaluating the Cognitive Success of Thought Experiments”. *Transversal: International Journal for the Historiography of Science* 3: 68-76.
2018 “Ernst Mach, Karl R. Popper y Thomas S. Kuhn: aportaciones al estudio de los experimentos mentales”. *Revista Portuguesa de Filosofía* 74 (1): 133-150.
- Janis, Allen
1991 “Can Thought Experiments Fail?”. En *Thought Experiments in Science and Philosophy*, edición de Tamara Horowitz y Gerald Massey, 113-118. Maryland: Rowman & Littlefield Publishers.
- Köseme Sule y Ömer Özdemir
2014 “The Nature and Role of Thought Experiments in Solving Conceptual Physics Problems”. *Science and Education* 23: 865-895.
- Kuhn, Thomas
1970 [1962]. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
1977 [1964]. “A function for Thought Experiments”. En *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, 240-265. Chicago: University of Chicago Press.

- Kuipers, Theo
 2000 *From Instrumentalism to Constructive Realism. On Some Relations between Confirmation, Empirical Progress, and Truth Approximation*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Kukkonen, Taneli
 2014 “Ibn Sina and the Early History of Thought Experiments”. *Journal of the History of Philosophy* 52 (3): 433-459.
- Locke, John
 1979 [1690]. *An Essay Concerning Human Understanding*. Oxford: Oxford University Press.
- Lucretius, Titus
 2001 *On the Nature of Things*. Indianapolis: Hackett Publishing Company.
- Mach, Ernst
 1906 [1896]. “Über gedankenexperimente”. En *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*, 108-125. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth. Mejor conocido por su traslación al inglés como “On Thought Experiments”. Traducción de W. O. Price y Sheldon Krimsky, 447-459. Florida: University of South Florida, 1972.
- 1907 *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of its Development*. Traducción de Thomas J. McCormack a partir de *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*. Chicago: The Open Court Publishing Company.
- Machery, Edouard
 2011 “Thought Experiments and Philosophical Knowledge”. *Metaphilosophy* 42 (3): 191-214.
- Maxwell, James Clerk
 1872 [1871]. *Theory of Heat*. Londres: Longmans, Green, and Co.
- McAllister, James
 2004 “Thought Experiments and the Belief in Phenomena”. *Philosophy of Science* 71 (5): 1164-1175.
- Meynell, Letitia
 2014 “Imagination and Insight: A New Account of the Content of Thought Experiments”. *Synthese* 191: 4149-4168.

- Moue, Aspasia, Kyriakos Masavetas y Haido Karayianni
 2006 “Tracing the Development of Thought Experiments in the Philosophy of Natural Sciences”. *Journal for General Philosophy of Science* 37 (1): 61-75.
- Nersessian, Nancy
 2007 “Thought Experimenting as Mental Modeling: Empiricism Without Logic”. *Croatian Journal of Philosophy* 20: 126-161.
- Newton, Issac
 1846 *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Traducción de Andrew Motte a partir de *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Nueva York: Daniel Adee.
- Norton, John
 1991 “Thought Experiments in Einstein’s Work”. En *Thought Experiments in Science and Philosophy*, edición de Tamara Horowitz y Gerald Massey, 129-148. Maryland: Rowman & Littlefield Publishers.
- 1996 “Are Thought Experiments Just What You Thought?”. *Canadian Journal of Philosophy* 26 (3): 333-366.
- 2004a “Why Thought Experiments Do Not Transcend Empiricism”. En *Contemporary Debates in Philosophy of Science*, edición de Christopher Hitchcock, 44-66. Oxford: Blackwell.
- 2004b “On Thought Experiments: Is There More to the Argument?”. *Philosophy of Science* 71 (5): 1139-1151.
- Oh, Jun-Young
 2016 “Understanding Scientific Inquiries of Galileo’s Formulation for the Law of Free Falling Motion”. *Foundation of Science* 21: 567-578.
- Palmerino, Carla Rita
 2018 “Discussing What Would Happen: The Role of Thought Experiments in Galileo’s Dialogues”. *Philosophy of Science* 85: 906-918.
- Peijnenburg, Jeanne y David Atkinson
 2003 “When Are Thought Experiments Poor Ones?”. *Journal for General Philosophy of Science* 34 (2): 305-322.

Pierce, Jeremy

2013 “Glasgow’s Race Antirealism: Experimental Philosophy and Thought Experiments”. *Journal of Social Philosophy* 44 (2): 146-168.

Popper, Karl R.

1959 [1934]. *The Logic of Scientific Discovery*. Londres: Hutchinson.

Potters, Jan y Bert Lauridan

2017 “Studying Scientific Thought Experiments in their Context: Albert Einstein and Electromagnetic Induction”. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 58: 1-11.

Praëm, Sara y Asbjorn Steglich-Petersen

2015 “Philosophical Thought Experiments as Heuristics for Theory Discovery”. *Synthese* 192: 2827-2842.

Proietti, Massimiliano *et al.*

2019 “Experimental Rejection of Observer-independence in the Quantum World”. *Quantum Physics*. Consultado el 14 de julio de 2019. <https://arxiv.org/abs/1902.05080>.

Schrödinger, Erwin Rudolf Josef Alexander

1935 “Die gegenwärtige situation in der quantenmechanik”. *Die Naturwissenschaften* 29 (48): 807-812.

Schurz, Gerhard

2015 “Ostensive Learnability as a Test Criterion for Theory-Neutral Observation Concepts”. *Journal for General Philosophy of Science* 46 (1): 139-153.

Shapiro, Stewart

2005 “Logical Consequence, Proof Theory, and Model Theory”. En *The Oxford Handbook of Philosophy of Mathematics and Logic*, edición de Stewart Shapiro, 651-670. Oxford: Oxford University Press.

Shieber, Joseph

2010 “On the Nature of Thought Experiments and a Core Motivation of Experimental Philosophy”. *Philosophical Psychology* 23 (4): 547-564.

Sorensen, Roy

- 1991a “Moral Dilemmas, Thought Experiments, and Conflict Vagueness”. *Philosophical Studies: An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition* 63 (3): 291-308.
- 1991b “Thought Experiments”. *American Scientist* 79 (3): 250-263.
- 1992a *Thought Experiments*. Oxford: Oxford University Press.
- 1992b “Thought Experiments and the Epistemology of Laws”. *Canadian Journal of Philosophy* 22 (1): 15-44.

Stevin, Simon

- 1605 *Wisconstige Gedachtenissen*. Leyden: Bouwensz.

Stuart, Michael T.

- 2016a “Norton and the Logic of Thought Experiments”. *Axiomathes* 26: 451-466.
- 2016b “Taming Theory with Thought Experiments: Understanding and Scientific Progress”. *Studies in History and Philosophy of Science* 58: 24-33.

Urbaniak, Rafal

- 2012 “‘Platonic’ Thought Experiments: How on earth?”. *Synthese* 187: 731-752.

Wilkes, Kathleen

- 1988 *Real People: Personal Identity without Thought Experiments*. Oxford: Oxford University Press.

Experimentos mentales en ciencias naturales

editado por el CENTRO PENINSULAR EN HUMANIDADES Y CIENCIAS SOCIALES, siendo el jefe de Publicaciones SALVADOR TOVAR MENDOZA, se terminó de imprimir el 10 de febrero de 2020 en los talleres de Gráfica Premier S.A. de C.V., 5 de febrero 2309, col. San Jerónimo Chicahualco, C.P. 52170, Metepec, Estado de México. El texto estuvo al cuidado de SALVADOR TOVAR MENDOZA y de DANIELA MALDONADO CANO. La formación (en tipos Goudy Old Style, 11:13, 10:12 y 9:11 puntos) la llevó a cabo SALVADOR TOVAR MENDOZA. El diseño de los forros lo realizó SAMUEL FLORES OSORIO. El tiraje consta de 250 ejemplares en tapa rústica, impresos en *offset* sobre papel cultural de 90 gramos.