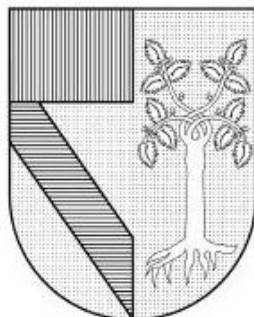


UNIVERSIDAD PANAMERICANA

FACULTAD DE FILOSOFÍA



“EL EXPERIMENTO MENTAL Y LA SIMULACIÓN
INFORMÁTICA EN LA METODOLOGÍA DE LA CIENCIA
EXPERIMENTAL”

T E S I S

Q U E P R E S E N T A

GONZALO VERA ZORRILLA

P A R A O B T E N E R E L G R A D O D E :

DOCTOR EN HISTORIA DEL PENSAMIENTO

DIRECTORA DE LA TESIS:

Dra. KAREN GONZÁLEZ FERNÁNDEZ

Dedicatoria y agradecimientos

El universo, colmado de maravillas, está diseñado para ser conocido por el hombre que en él puede descubrir al Autor. Al contemplar nuestra propia capacidad de sintonizar con el lenguaje del cosmos, se vislumbra también al Hacedor en nuestro intelecto. Resulta, por tanto, natural y necesario dedicar cualquier trabajo de la mente en su investigación sobre el universo, a Dios Creador que nos otorga este don para encontrar el camino hacia Él en un itinerario lleno de fascinación.

A mis padres, Irma y Paco (+), con profundo agradecimiento por traerme a la vida, regalarme abundancia de hermanas y hermanos, cuñadas y cuñados que son otros tantos hermanos y a quienes también dedico este trabajo, y enseñarme a descubrir motivos de asombro en todo lo que nos rodea.

San Josemaría Escrivá inspira algunas reflexiones de fondo en esta investigación. Él me ha mostrado cómo buscar y encontrar lo extraordinario en lo cotidiano: profundamente le agradezco la visión de la vida que ha sabido transmitirme.

Finalmente y no por ello con menor aprecio, agradezco a la Dra. Karen González por su enseñanza en la dirección de este trabajo, al Dr. Jorge Morán (+) quien siempre me impulsó al estudio disciplinado, y al Dr. Fernando Nájera que no cesó de alentarme con su motivación y consejo, además de recomendarme ricos materiales científicos.

Índice

Introducción.....	5
El gato de Schrödinger.....	6
Tiempos de cambio para la ciencia experimental.....	9
Enfoque de este trabajo.....	10
Objetivos de cada capítulo.....	13
Cap. 1: La interacción con la naturaleza.....	17
1.1. La vida empírica.....	18
1.2. El conocimiento en la ciencia experimental.....	35
1.3. Caracteres y condiciones del experimento.....	44
1.4. La amplitud metodológica.....	71
Cap. 2: El laboratorio de la mente.....	81
2.1. Prolegómenos históricos.....	82
2.2. Comprender el trabajo experimental de la mente.....	83
2.3. Elementos e ilustraciones sobre el experimento mental.....	91
2.4. Componentes del experimento.....	103
Cap. 3: La mente y el recurso informático.....	131
3.1. Preludio: nuevas posibilidades experimentales.....	131
3.2. Las matemáticas.....	135
3.3. Representaciones y modelos.....	142
3.4. La simulación.....	153
3.5. Valoración epistemológica de la simulación informática...160	
Cap. 4: Conclusiones.....	187
4.1. Taxonomía.....	187
4.2. Mapa metodológico.....	198
4.3. Navegar por el mapa metodológico.....	217
Bibliografía.....	225

Introducción

“No, no. No estás pensando, sólo estás siendo lógico”¹.

Se dice que Niels Bohr espetó esa frase a Albert Einstein en el curso de sus múltiples debates: ambos eran hombres creativos, de mente poderosa, inquisitiva y eminentemente abierta a lo desconcertante.

Ambos muestran un límpido ejemplo de los derroteros experimentales en donde la posibilidad de acudir a instrumentos científicos tradicionales se ve limitado por su objeto de estudio: uno se ocupa de grandes masas y velocidades, otro de las dimensiones más increíblemente pequeñas. Y aunque en el curso de su vida no lograron llegar a un acuerdo —hecho que nunca fue obstáculo para una cálida amistad y fructífera colaboración intelectual— la contribución de ambos al mundo del trabajo de la mente en las ciencias experimentales ha sido de órdago: durante meses y años, estas dos poderosas inteligencias blandieron afilados experimentos mentales para tratar de demostrar una postura, desbancar otra, desentrañar la verdad, confirmar la inadecuación a la realidad.

La curiosidad natural del hombre respecto de la naturaleza ha transitado por diversos caminos que le lleven a desentrañar con mayor profundidad los secretos ocultos de la naturaleza; caminos no siempre fáciles, francos o luminosos, y en este itinerario un gran número de pensadores —filósofos, polímatas, naturalistas, científicos— han usado y perfeccionado las vías de acceso a esos secretos que nos colocan en la situación actual de avances notables no solo en aquello que sabemos, sino en cómo es que lo sabemos.

1 Frase atribuida a Niels Bohr en “*The mass-extinction debates: how science works in a crisis*”, William Glen, 1994. 62.

Entre estos recursos, el que he resaltado por el uso que Bohr y Einstein le dan de maneras deliciosas, es el experimento mental, objeto del presente trabajo de investigación. Para introducir el mundo de este aspecto del trabajo inmaterial dentro del ámbito de la ciencia experimental, presento un ejemplo pintoresco, desconcertante y ampliamente reconocido como paradigmático: el gato de Schrödinger.

El gato de Schrödinger

En los años veintes y treintas del siglo pasado, el mundo de las ciencias naturales —concretamente, la física y aquellas disciplinas más directamente en contacto con esta— enfrenta un momento de crisis intelectual: el debate acerca de la comprensión misma de los entramados básicos de la materia se encuentra en un punto álgido entre la nueva y desconcertante teoría subatómica de la realidad y la contra-intuitiva y no menos extraña teoría de la simultaneidad, siempre mejor conocida como la teoría de la relatividad. Cuando Niels Bohr y Albert Einstein, quizá dos de las más poderosas mentes científicas del siglo XX se enzarzan en un cordial y enconado debate², Erwin Schrödinger ofrece —como resultado de una intensa correspondencia con Einstein— en un escrito³ acerca de la situación de la mecánica cuántica, un experimento mental que incluye en sí algunos rasgos que pueden ayudarnos a entrar en este mundo.

El supuesto básico en debate es nada menos que la naturaleza de la realidad física. La interpretación de Copenhague sobre la mecánica cuántica afirma que la materia se encuentra en un estado de indeterminación o de superposición⁴. Una partícula no solo

2 Walter Isaacson, *Einstein: His Life and Universe*, 1st edition (New York: Simon & Schuster, 2007).

3 Erwin Schrödinger, “Die Gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, *Die Naturwissenschaften* 23, núm. 48 (noviembre de 1935): 807 a 812, <https://doi.org/10.1007/BF01491891>.

4 Adrian Cho, “Reality Doesn’t Exist until You Measure It, Quantum Parlor Trick Confirms”, *Science*, el 20 de julio de 2022, <https://www.science.org/content/article/reality-doesn-t-exist-until-you-measure->

puede poseer todos los estados posibles (es decir, puede girar hacia un lado o el otro, estar aquí o allá) sino que de hecho los posee, con una cierta probabilidad pero no con una determinación como la que estamos acostumbrados a considerar en la realidad física: las cosas son algo y no todo a la vez; son esto o aquello, pero nunca son ambas cosas.

La interpretación de Copenhague señala que la materia indeterminada se determina cuando existe un observador consciente que la mide, la observa. Es en ese momento cuando la totalidad de las posibilidades realmente existentes en la materia “se colapsan” a un estado determinado y único, pero mientras no sea observado los contiene todos. Desconcertante, por completo contra-intuitivo y opuesto a la experiencia. Sin embargo, ya en ese tiempo este planteamiento aparentemente absurdo estaba produciendo resultados en el ámbito científico predictivo: esa teoría funciona.

Con esa base teórica, Erwin Schrödinger ofrece un experimento mental muy simpático (aunque no por eso fácil de comprender). Se introduce un gato vivo dentro de una caja. Además del gato, en esa caja se encierra una cápsula de material radioactivo que se descompone lentamente. El ejemplo apela a la comprensión de los lectores destinatarios, pues todos entienden de inmediato que esa elección supone una fuente de acción probabilística: en cualquier momento existe un 50% de probabilidad de que un átomo se desintegre. Junto a esa cápsula hay un aparato que, al detectar la desintegración de un átomo, libera un veneno mortal que terminará con la vida del gato.

La cuestión es que los átomos —realidad cuántica, microscópica— que han de desencadenar la liberación del veneno, según la interpretación de Copenhague, se encuentran descompuestos y no-descompuestos al mismo tiempo, mientras no haya un

it-quantum-parlor-trick-confirms. Este artículo de divulgación explica de un modo sencillo —en la medida que el tema lo permite— esta realidad de la mecánica cuántica en un experimento reciente. El título es impreciso: la realidad existe siempre, pero se encuentra indeterminada.

observador que los mida. Por tanto, el gato —realidad macroscópica— se encuentra vinculado al estado de la realidad microscópica y, en consecuencia, vivo y muerto al mismo tiempo. Es decir, y usando el lenguaje de la mecánica cuántica, ante la superposición de los estados de las partículas radioactivas debía darse una simultánea superposición de los estados de vida y muerte del gato, lo cual es absurdo según la experiencia común.

Este experimento mental contiene una colección de elementos que ilustran el objeto de estudio de esta investigación. Se trata de una narración perfectamente contextualizada tanto en su momento histórico como en su público pretendido. Es una descripción vivamente pintoresca pues hace al lector realmente imaginar lo que se está describiendo. Es reductiva, tanto en su planteamiento como en su descripción minimalista, sin faltar a la necesidad de una transmisión completa del caso que se está presentando al lector: dado el contexto adecuado, todo lector podrá completar el planteamiento con el conocimiento que tiene de la situación, pues cada elemento le dice consistentemente mucho más de lo que se está narrando.

Además, la descripción del instrumento, su situación y estado inicial, y las condiciones de su ejecución tienen un alto nivel de precisión y claridad. El lector, aun no teniendo especificada la duración del experimento —resulta un elemento no determinante en su desarrollo— se da perfecta cuenta de las consecuencias del paso del tiempo. Sabe cómo se comportan las variables que están en juego (la descomposición del material, la liberación del veneno y el efecto de este sobre el gato). Más aun, conoce las consecuencias de no abrir la caja y observar, y las que se desprenden de abrirla y observar, de acuerdo a la interpretación cuántica señalada antes. Y es justo en este absurdo que se concluye de esta interpretación —abrir y ver— cuando el lector se encuentra con la paradoja que le ofrece aceptar una base teórica que es a la vez funcional y predictiva, y también absurda y contra-intuitiva. La imaginación entra en perplejidad acerca del resultado. La

interpretación del resultado se torna polémica pero su aparentemente contradictoria conclusión parece innegable. Se intuye aquí que la experimentación tradicional, puramente física, se encuentra en una situación de insuficiencia para abordar una realidad también física.

No pretendo ahora resolver el dilema del gato (se trató de un experimento mental, todo indica que ningún animal fue lastimado en el proceso) sino introducir la riqueza del recurso al experimento mental.

Tiempos de cambio para la ciencia experimental

El inicio del siglo XX encuentra a las ciencias naturales en un momento de cambios notables. Particularmente con la relatividad y la mecánica cuántica se abre la puerta a un territorio oscuro y desconcertante, una nueva ruta de la que se pueden entender sus efectos, que resulta predictiva y, pragmáticamente hablando, útil. Es una explicación no intuitiva de la naturaleza: la simple observación difícilmente llevaría a la descripción de sus cualidades y la razón, aun a la luz de sus resultados, se rebela y no los acepta pacíficamente. Estamos ante la imposibilidad del experimento físico y el rechazo por el aparente absurdo intelectual.

En momentos como este —quizá algo muy cercano a los momentos de revolución que Thomas Kuhn refiere en su hipótesis sobre la evolución de la ciencia y de los que hablaremos más adelante— la mente ansía escapar de los cauces tradicionales: la lógica estricta, el silogismo riguroso podrían resultar insuficientes y es necesario soltar las riendas de la creatividad y la imaginación. Es, al parecer, terreno fértil para ensayar la ciencia experimental carente de la experiencia física, una invitación a nuevas posibilidades no sujetas a la realidad material.

El soñador, el que construye castillos en el aire, el poeta de utopías sociales o tecnológicas, todos experimentan en la mente. Hasta el respetable comerciante tanto como el

dedicado inventor o investigador hace lo mismo. Cada uno de ellos concibe circunstancias y las asocia con ellas la idea, expectativa o suposición de ciertos resultados; crean experiencia del pensamiento⁵.

Así describe Ernst Mach de modo literario y no carente de ironía, el uso del experimento mental.

Todo avance del conocimiento implica —hasta sobra decirlo— trabajo de la mente. También los descubrimientos y constataciones más materiales exigen una inteligencia que las prepare, procese e interprete. El trabajo de la mente es un elemento explícitamente humano del que resulta imposible desprenderse; así, podemos afirmar que en toda experimentación, de la naturaleza que sea, se implica el hombre con sus potencias intelectuales. Todo trabajo experimental se adscribe en un trabajo mental y sin embargo no a todo trabajo experimental se le denomina experimento mental por contar con una dimensión física. De esta manera el experimento mental, presente en todos los momentos de la historia con distintos nombres y rasgos, nos invita a estudiarlo con mayor profundidad.

Enfoque de este trabajo

En el acervo de instrumentos disponible a las ciencias experimentales, el experimento mental juega un papel que ocasiona fuertes proponentes y acérrimos detractores. La evidencia de los últimos siglos aporta elementos de interés para enriquecer el juicio. Particularmente el advenimiento de los métodos informáticos que suponen elaboraciones intelectuales no-materiales invitan a cuestionarse en qué categoría habrían de incluirse, tanto el experimento mental en general como la ampliación de sus posibilidades mediante la técnica informática en particular.

5 Ernst Mach y Erwin Hiebert, "On Thought Experiments", en *Knowledge and Error: Sketches on the Psychology of Enquiry*, Vienna Circle Collection (Dordrecht: Springer Netherlands, 1897), 451, https://doi.org/10.1007/978-94-010-1428-1_11.

Esta investigación parte de los fundamentos generales sobre el experimento físico más tradicional, los rasgos que podemos destilar a la luz de una selección de experimentos, tanto físicos como mentales y, con esa base, profundiza en el valor y la situación epistemológica de la ampliación tecnológica en el ámbito de las ciencias experimentales.

En las conclusiones habré de decantarme por una postura respecto a las posibilidades experimentales no materiales, tanto puramente mentales como operadas informáticamente, como herramienta válida y en ocasiones irremplazable —es parte de la hipótesis— en el avance del conocimiento.

A la vista del material seleccionado, podría enfocar el estudio desde dos perspectivas:

- a) Mediante una recopilación de estilo monográfico que presente lo que distintos pensadores —filósofos, científicos, psicólogos, etc. — han afirmado acerca de esta modalidad.
- b) O también a través del acercamiento a la realidad de dichos experimentos, seleccionando aquellos que presenten rasgos significativos o elocuentes de sus cualidades y fundamentándome en los juicios que los actores de dichos desarrollos han hecho respecto de ellos.

Mi intención es, sin despegarme del primero sino más bien apoyándome en él como base sólida, recorrer el segundo camino.

Al estudiar los rasgos del experimento mental, me apoyaré en la realidad histórica de la aplicación y consecuencias obtenidas por este camino; simultáneamente, pero de modo eminente, buscaré desentrañar de la literatura disponible la identificación de características, partes, componentes de un experimento que los filósofos de la ciencia y los científicos han ofrecido como constitutivos. Así, pretendo llegar por ambos lados para ser más completo: desde los pensadores que detallan características, que ilustraré con experimentos; y desde los experimentos hacia esas

características aunque no las haya localizado en pensadores o científicos.

De esta manera, a través de un itinerario con base histórica de pensadores y científicos, mediante un selecto estudio de experimentos físicos y mentales con el objeto de comprender mejor la naturaleza de los experimentos mentales y simulaciones informáticas, busco responder en último término al cuestionamiento sobre su contribución y pertenencia en el elenco metodológico al alcance de las ciencias experimentales a pesar de su naturaleza no-física y, por tanto, separada de la concepción más tradicional de un experimento. Este objetivo conforma la línea rectora del presente trabajo y para ello, detallo a continuación el itinerario argumental que pienso seguir y los objetivos de cada capítulo.

Indagar las leyes de funcionamiento de la naturaleza para controlarla y predecir el comportamiento es el papel propio de los científicos. No es su cometido propio entrar al análisis filosófico de estas leyes y sin embargo, es “particularmente en periodos de crisis manifiesta como los científicos se entregan al análisis filosófico como instrumento para desbloquear los enigmas de su campo. En general los científicos ni precisan ni desean ser filósofos”⁶, y al menos inicialmente daría la impresión que sus incursiones en el ámbito filosófico con frecuencia dejan que desear lo que evidencia la importancia de elevar la potencia del pensamiento más allá de las realidades materiales propias del experimentador. La afirmación de Kuhn clama por una capacidad de pensamiento que quizá no resulta la más habitual en el ámbito científico y esto va en detrimento del mismo desarrollo científico.

En cambio, sin confundir los ámbitos, objetivos y métodos, cuando un científico aplica su método a la especulación intelectual mediante un experimento mental, el resultado parece mantenerse

6 Thomas S. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*, 4a ed. (México: Fondo de Cultura Económica, 2013), <https://www.fondodeculturaeconomica.com/Ficha/9786071608253/F>.

en lo que se espera del proceso normal de la ciencia. Así, Kuhn completa la idea precedente cuando afirma que “la ciencia normal tiende a mantener a la filosofía creadora a buena distancia, y probablemente por buenas razones”⁷ y me parece razonable añadir que al científico no debería bastarle con analizar sus conclusiones y resultados, sino volver también sobre el mismo proceso de pensamiento que le llevó a tales conclusiones: de manera un tanto libre podría afirmar que un buen científico requiere ser filósofo si desea mejorar no solo sus resultados experimentales sino también sus razonamientos e intuiciones intelectuales

Objetivos de cada capítulo

A pesar de la riqueza de material disponible tanto en la historia como en la filosofía de la ciencia, ha supuesto un reto interesante decidir el modo de acometer el tema pues existe amplitud de disparidad en opiniones y enfoques. Para llegar al resultado que ahora presento he procurado atender a fuentes históricas, científicas, filosóficas y psicológicas, principalmente.

En el caso de las científicas y filosóficas (no siempre separadas entre sí, sobre todo por los científicos que hacen filosofía) he alimentado la investigación con posturas tanto convergentes como encontradas. Pretendo obtener mi propia valoración y hacer una propuesta que, o bien se inclina a un lado concreto, o discrepa de las posturas dominantes en algunos puntos y propongo una visión diversa.

Así pues, la estructura como presento esta investigación abarca las siguientes etapas:

El Capítulo 1 supone un planteamiento de contexto que abarca un amplio período de la historia para exponer los componentes de la experiencia del hombre. La observación, la experiencia, la experimentación y los elementos que dan razón de cada uno de ellos son el objeto de este capítulo.

7 *Ibid.*

Esta necesaria introducción a la vida empírica va seguida de ejemplos concretos. He seleccionado un corto elenco de experimentos que resaltan una porción importante de los rasgos de interés de cara al desarrollo que vendrá en los Capítulos 2 y 3. De ellos desprendo algunos caracteres y condiciones que se recogen a la luz del método experimental y facilitarán dar el paso a la experimentación sin elementos físicos y a la simulación informática. Concluyo este capítulo ofreciendo una síntesis en la que pongo de manifiesto la aportación de cada experimento presentado y, por tanto, su justificación en este estudio.

El paso del experimento físico a aquel que se encuentra carente de una realidad material es el tema del Capítulo 2. Al adentrarme en el laboratorio de la mente —expresión que explicaré en ese texto— transitaremos desde la experiencia material, empírica, por la que el hombre adquiere conocimiento sobre el mundo, hasta la posibilidad de llevar a cabo esa inquisición en la realidad desde el instrumento experimental omnipresente y supremo, que es la mente humana.

Al igual que en el Capítulo 1, ofreceré una reducida selección de experimentos mentales que construyan sobre los anteriores y dispongan la argumentación de cara al discurso sobre la ampliación tecnológica. También, del mismo modo, presentaré una recopilación de componentes de un experimento, en términos generales, aplicables tanto a los físicos como a los mentales, detallando el papel que desempeña cada una en las distintas regiones metodológicas de la ciencia experimental.

Termino el Capítulo 2 con una explícita reflexión acerca del papel de la razón como elemento cohesivo y unificador en la metodología experimental y cierro nuevamente con una presentación tabular de los experimentos utilizados que sintetiza su aportación al estudio.

Así como las máquinas extienden el poder del cuerpo y los sentidos, la informática amplía la capacidad de la inteligencia y

esto es el tema del Capítulo 3, que señalo expresamente como el principal de la tesis.

Para enfocar esta materia tan técnica con una visión filosófica ha sido oportuno recorrer un camino que ofrece antecedentes de valor: las matemáticas, los modelos y la simulación para finalmente ensayar una valoración epistemológica del experimento mental ampliado por la aplicación informática en el ámbito de la ciencia experimental.

El tema central de las conclusiones es la presentación de un mapa metodológico que busca sintetizar las ideas que he desarrollado a lo largo de la investigación. Van precedidas —como recomiendan algunos de los principales autores que he estudiado— de una taxonomía que sirve de antecedente y contraste a la oferta del mapa metodológico.

Finalizo el estudio con algunas reflexiones terminales que abren nuevas perspectivas de estudio, específicamente en los albores de una nueva era tecnológica. Hago un brevísimo comentario de la simulación del simulador, es decir hablando acerca de la inteligencia artificial, lo que supone un empeño por simular informáticamente al generador seminal de toda simulación.

A pesar de un esmerado e iterativo esfuerzo de delimitación en el alcance que persigo con esta tesis, veo plenamente aplicable la afirmación —ciertamente irónica— de que “el número resultante de preguntas que pueden surgir de un estudio acerca del experimento mental es, probablemente, ilimitado”⁸. La verdad de esta afirmación me lleva a reiterar mi agradecimiento a la Dra. Karen González quien ha dirigido esta investigación: su instrucción ha sido crucial en la determinación y delimitación de los temas abarcados, por sí mismos muy amplios e interdisciplinarios.

8 James Robert Brown, *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*, 2nd ed, Philosophical Issues in Science (New York: Routledge, 2011).

Cap. 1: La interacción con la naturaleza

Para enfrentar con aprovechamiento una comprensión clara del lugar del experimento mental y la simulación informática —como adelanté en la introducción— empezaré con una exploración de la historia de la interacción del hombre con la naturaleza, a la que he denominado “vida empírica”. Recogeré los modos como el hombre conoce la naturaleza tanto en un modo de observación pasiva⁹, como en la experimentación más activa y explicaré someramente la evolución de la inquietud del hombre respecto a su naturaleza y entorno como sitio del surgimiento de la ciencia experimental.

En seguida pasaré de las consideraciones más conceptuales a la exposición de cuatro experimentos concretos e ilustrativos. Los he seleccionado de distintas naturalezas, épocas y disciplinas. El objeto es mostrar como este proceso lleva al hombre a la exploración deliberada y dirigida de la naturaleza, interactuando tanto de modo físico y sensible, como desde la mente sin acción externa aparente.

Por último, con la evidencia e información aportada por el itinerario histórico y el trasiego empírico, hago una recopilación de las condiciones que se educen de lo anterior, para llevar a cabo un experimento. Este último apartado, más que establecer la ruta experimental válida o más aceptada —postura que evitaré, como expondré más adelante— busca pavimentar el camino para la caracterización del experimento mental y el papel que puede atribuirse al poder de cómputo en este ámbito, objeto de los siguientes dos capítulos, respectivamente.

⁹ Como explicaré más adelante, el hombre nunca observa de modo pasivo. Uso aquí esta expresión de modo coloquial para señalar la ausencia de un plan, objetivo o deliberación previa en la observación y sobre todo referido a la experiencia cotidiana en que la persona capta su entorno por la vía sensible.

1.1. *La vida empírica*

Adquirir percepciones y conocimientos mediante la vivencia y yendo más allá de la simple aprehensión, es un proceso equívoco y ambivalente. Existen variadas definiciones de la palabra “empírico”: la RAE usa una sumamente simple al especificarla como “perteneciente o relativo a la experiencia”¹⁰, mientras que otros diccionarios son un poco más amplios o menos cuidadosos para eliminar redundancias, y la expresan como “que sigue un procedimiento basado en la observación y la experiencia”¹¹ o fórmulas similares. En ambos casos se evidencia que el conocimiento empírico parte de la captación de los sentidos u observación en sentido amplio, y que es vivido o experimentado por el sujeto. Para iniciar este desarrollo parece conveniente distinguir aunque sea superficialmente estos términos que expanden y parecen sinónimos del concepto de “empírico”.

1.1.1. Observación, experiencia y experimento

La observación¹² es el arranque. Con acierto señalaba Sto. Tomás de Aquino, “*nihil est in intellectu quod non sit prius est in sensu*”¹³ (nada hay en el intelecto que no haya estado antes en los sentidos). Esto se toma en sentido amplio mediante la captación a través de todos los sentidos externos de que disponemos, guiados por el intelecto: desde la observación espontánea, casual y curiosa, que ofrece al hombre las primeras informaciones acerca del entorno, hasta el “estudio de observación” donde el hombre establece su planteamiento de adquisición de datos, elige su universo, determina sus instrumentos y variable. Mas en este no

10 Asociación de Academias de la Lengua Española, “Diccionario de la lengua española”, «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario, consultado el 21 de agosto de 2021, <https://dle.rae.es>. Voz: experiencia.

11 “empírico”, TheFreeDictionary.com, consultado el 1 de diciembre de 2022, <https://es.thefreedictionary.com/emp%C3%ADrico>.

12 Asociación de Academias de la Lengua Española, “ASALE-RAE Diccionario”. Voz: observar.

13 Tomás de Aquino, “*Quaestiones disputatae de veritate*, q. 2-4”, 1274, <https://www.corpusthomicum.org/qdv02.html>.

pretende influir en el mundo exterior a él: solo observar y aprender, pues desde la persona común hasta el científico más sobresaliente, el naturalista del detalle o el niño que descubre el mundo, siempre que se observa existe un objetivo. La profundidad y deliberación, el método y la concatenación de observaciones dependerá del desarrollo de la mente y de aquello que se persigue, pero la observación está siempre alejada de lo que en instrumentación física se llama “detección”, que es la transformación de un tipo de señal en otra que sea manipulable, pero sin interpretación o comprensión alguna.

Este modo de adquisición resalta la distinción esencial respecto al experimento¹⁴, en donde el investigador busca intervenir en el objetivo de la observación, selecciona la variable a modificar y aquellas que habrán de permanecer inalteradas, y ejecuta una observación con deliberada influencia en el objetivo. Busca transformar la realidad para medir el resultado de su acción.

Intermedia —si pudiera decirse así— entre la observación y el experimento, quedaría la experiencia¹⁵, en donde un hombre singular siente, conoce y observa: vive y por eso mismo, interactúa con la naturaleza para responderse a la simple y cotidiana pregunta de “¿qué pasaría si...?” que compone la cotidianidad del hombre curioso. La experiencia va más allá de la observación. Dicho burdamente, un termómetro, con base en la ley cero de la termodinámica¹⁶ —realidad física universal— mide (detecta) la temperatura y mientras que una gran porción de los vivientes percibe ese gradiente de energía, solo un hombre transforma esa sensación en la experiencia de frío o calor.

14 Asociación de Academias de la Lengua Española, “ASALE-RAE Diccionario”.
Voz: experimento.

15 Asociación de Academias de la Lengua Española, “ASALE-RAE Diccionario”.
Voz: experiencia.

16 “Thermodynamics | Laws, Definition, & Equations | Britannica”, el 15 de mayo de 2023, <https://www.britannica.com/science/thermodynamics>.

1.1.1.1. Curiosidad espontánea y perpetua

La mente humana¹⁷ es un instrumento siempre activo, siempre conectado a los sentidos, que se encuentra en perpetua situación de captar la realidad que le rodea. Aun así, la mente puede adoptar distintas maneras de aprehender su entorno.

En un estado exploratorio, nuestras mentes están abiertas a información nueva —viviendo y observando el momento, dispuesta a sobrellevar alguna incertidumbre por el beneficio de aprender—, nuestra creatividad está avivada y nos encontramos en un estado de ánimo relativamente optimista. Si nuestras mentes están divagando, lo harán de un modo libre, placentero.

Por otro lado, en el estado explotador¹⁸ estamos enfocados para extraer de nuestras experiencias pretéritas, apoyándonos en métodos bien probados para interpretar la situación o resolver problemas, con preferencia de la certidumbre de lo familiar sobre la emoción de lo nuevo y nuestro estado de ánimo se verá relativamente atenuado¹⁹.

Con un enfoque desde la psicología y la neurociencia, Bar expone a lo largo de su libro las posibles situaciones en que la mente puede encontrarse durante la observación o incluso cuando no se encuentra enfocada, no por ello desconectada o inactiva: “el cerebro ordinariamente no entrega información por iniciativa propia, pero las respuestas están ahí, esperando a que nosotros lleguemos a ellas”²⁰. Habrá oportunidad de aprovechar sus intuiciones en otros momentos: un estudio como este se puede

17 Me refiero a la mente sana, en buen estado, sin patologías. Las afirmaciones siguientes lógicamente solo aplican para las personas en una situación intelectual y física “ordinaria”, que no quiere decir perfecta, sino libre de limitaciones relevantes.

18 *Exploitative*. No encuentro mejor traducción.

19 Moshe Bar, *Mindwandering: how your constant mental drift can improve your mood and boost your creativity*, First edition (New York: Hachette Go, 2022), 13.

20 Bar, 23.

beneficiar también con un recorrido de carácter reflexivo en donde el hombre piensa acerca de su mismo proceso intelectual.

Me adhiero a una afirmación de Benedicto XVI cuando dice: “La razón científica moderna ha de aceptar simplemente la estructura racional de la materia y la correspondencia entre nuestro espíritu y las estructuras racionales que actúan en la naturaleza como un dato de hecho, en el cual se basa su método”²¹. Esta idea fácilmente trae a la memoria una de las más conocidas e intrigantes afirmaciones de Stephen Hawking sobre la correspondencia —cuando menos— entre la capacidad de la razón para conocer la naturaleza y la naturaleza misma para comunicarla: “¿que es ello que insufla fuego en las ecuaciones y hace un universo para ser descrito por ellas?”²²

Resulta vivamente llamativo —como resaltan las precedentes citas de Benedicto XVI y Stephen Hawking— que la inteligencia esté calibrada, como un buen instrumento, al modo como la naturaleza quiere comunicarnos la verdad así como el oído está calibrado al rango de frecuencias que produce la voz y el ojo a los colores de la luz del sol que nuestra atmósfera admite sin atenuar.

La observación —el inicio del conocimiento— aunada a la natural curiosidad del hombre, con una inteligencia perpetuamente activa y en sintonía para la aprehensión de un universo inteligible, son el motor que impulsa la ciencia experimental. Curiosos parecen todos los seres animados²³; especulativo, solo el hombre. Un animal observa, calibra, estima la conveniencia de una situación respecto a su propia naturaleza. Incluso interactúa con ella y la modifica en servicio de su propia naturaleza. Un caso muy elocuente: la construcción de una represa por parte de un castor.

21 Papa Benedicto XVI, “Discurso al mundo de la cultura”, consultado el 22 de mayo de 2022,

https://www.vatican.va/content/benedict-xvi/es/speeches/2006/september/documents/hf_ben-xvi_spe_20060912_university-regensburg.html.

22 Stephen Hawking, *A Brief History of Time*, 10th Anniversary edition (New York: Bantam, 1998). P. 97.

23 Cuando menos los superiores.

El animal no se pregunta por qué lo hace y tampoco mejora su diseño pues a lo largo de milenios, desde que el castor es castor, su embalse es el mismo.

No sucede así con el hombre: cada hombre es distinto, cada generación construye sobre las aportaciones de la anterior, cada respuesta origina nuevas preguntas. Y las preguntas han de ser respondidas: es un destino que el hombre no puede ni quiere evitar. Resulta consecuencia natural que el hombre no solo se haga preguntas y las responda, sino que también se hace preguntas sobre por qué se hace preguntas, se responda buscando reflexivamente la manera como se responde, y se haga preguntas sobre cómo sucede todo. El hombre reflexiona, proyecta su curiosidad en el tiempo y en el espacio. Las respuestas que genera también atraviesan —mucho más que sus observaciones— todas las fronteras dimensionales.

Por eso resulta enriquecedor estudiar el pensamiento del hombre en el pasado: cada generación ha pensado, y ha pensado sobre su pensamiento. El conocimiento evoluciona y la capacidad de conocer también lo hace.

1.1.1.2. Conocer a la naturaleza

Para la cultura occidental encontramos raíces claras en el pensamiento griego, donde se buscaba el “saber pensar” de modo más enfático que los conocimientos particulares. Grandes beneficios nos ha producido este modo de proceder pues el equipamiento intelectual que habría de ser la herramienta esencial para adquirir conocimiento certero se desarrolla y perfecciona desde los tiempos más antiguos.

Esta actitud llevó, en algunos casos, a dar primacía a la razón por encima de la experiencia; así, por ejemplo encontramos una postura de Parménides, expresada en su Poema²⁴, que hoy puede

²⁴ Parménides, El poema doctrinal de Parménides, trad. Miguel Zubiría, Universidad de Cuyo (Mendoza, Argentina, 2016), 17, https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/7654/elpoemadoctrinalparmenides.pdf. Cabe señalar que me apoyo, para esta afirmación, en la opinión de Barrio

resultar incluso pintoresca. El pensador de Elea considera que el camino de la experiencia conduce al error, solo la razón conduce al sabio al corazón de la verdad²⁵; cabe aclarar que a Parménides no le abandona la razón al hacer una afirmación como esta: estamos en los primeros vagidos del pensamiento griego cuando ya es un desarrollo notable afirmar que nada viene de la nada y lo que existe sigue existiendo. Es su pensamiento sobre el que Empédocles elabora para afirmar que todo fluye y, por tanto, la experiencia puede pretender asentarse sobre realidades cambiantes y no fiables.

A pesar de la lucidez y profunda intuición que encontramos en Aristóteles²⁶, cuando realiza sus observaciones y descripciones acerca de los cuerpos en caída con los conceptos de su época pero termina haciendo afirmaciones que, con su porción de verdad y aplicación en la realidad, resultan insostenibles ante una observación un poco más esmerada. Quizá no hubiera sido demasiado difícil constatar si efectivamente un objeto pesado llegaba a tierra antes que uno más ligero y sin embargo algunas de sus afirmaciones —que hoy cualquiera puede refutar con facilidad— permanecieron incontestadas y dominaron el pensamiento durante siglos.

Señalo este ejemplo no como una descalificación al Estagirita —se trata, a juicio de más de uno que comparto plenamente— de una de las inteligencias más poderosas de la historia, sino por un doble motivo: manifiesta el modo de pensar partiendo de los principios últimos de las cosas y descendiendo de ahí a los particulares que debían adoptar esa concepción de verdad última; y Galileo en su momento ofrecerá brillantes experimentos mentales partiendo de las afirmaciones aristotélicas.

Añado de pasada que resulta casi un lugar común enfrentar a Aristóteles con Galileo por este tipo de asuntos: me parece que es

Marín y en la traducción y análisis que estoy citando, específicamente en la Fr. 8 del Poema doctrinal.

25 Barrio Marín, "Experiencia en la ciencia". P. 6.

26 Aristóteles, *Física*, S. IV aC.

no penetrar el fondo del debate en el que encontramos un hábil observador de la naturaleza dotado de una poderosa mente especulativa, por un lado, y una brillante inteligencia experimental por el otro. Se puede resaltar aquí también —lo veremos más adelante— la importancia del contexto histórico y el entramado teórico en el que se desarrolla una inquisición sobre la naturaleza, lleve o no a la experimentación.

1.1.1.3. Cuestionar a la naturaleza

En contraste —sería desacertado cortar a toda una época con el mismo patrón— Arquímedes se distingue por los descubrimientos que provienen de una observación más crítica de la naturaleza que se aproxima a la experimentación. No al estilo plenamente científico que busca influir en el resultado, sino más bien el de aquel que pretende una comprobación de la teoría o una explicación de las causas. Su célebre descubrimiento para identificar la mezcla en la corona de oro (¡Eureka!) y el tratado sobre la palanca que recoge Papo de Alejandría²⁷, son dos ejemplos claros en donde no se detuvo en la consideración de principios naturales generales sino que descendió a la interacción específica con la naturaleza para desentrañar un principio general.

De este modo, con premisas intelectuales, se procuró durante largo tiempo y en variados ámbitos, pasar del proceso mental al conocimiento de la naturaleza. A pesar de ello, y habría que decir también que gracias a ello, la inquietud del hombre por conocer las causas se desarrolló favorablemente en una combinación de respuestas insatisfactorias y rigor intelectual capaz de acometerlas con fruto. Faltaba descubrir el valor de la experiencia en el conocimiento de la naturaleza, descubrimiento que gradualmente hizo su aparición en pensadores que lo pondrían en ejercicio y de este modo nacería la ciencia experimental con una forma más parecida a la que conocemos hoy.

27 Pappi Alexandrini, *Mathematicae collectionis*, trad. Federico Commandino, 1308.

Para la Baja Edad Media y más aun durante el Renacimiento, la lógica y el razonamiento discursivo se encontraban ampliamente maduros. La filosofía especulativa y la metafísica ofrecían el sustrato seguro y sólido para construir con cimientos y columnas que facultaban al hombre para una evolución del proceso intelectual que rápidamente establecería su dominio como el recurso por excelencia²⁸ para conocer las causas del funcionamiento de la naturaleza.

1.1.1.4. Reflexionar sobre el pensamiento

Perovic y Franklin señalan, en el lúcido y amplio artículo que publican en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, que

observación es un término filosóficamente cargado, y sin embargo el estatus epistémico de la observación científica ha evolucionado gradualmente con el avance de las técnicas científicas de indagación y las comunidades científicas que las siguen²⁹.

Citando a L. Daston, el mismo artículo continúa señalando que

característico del género epistémico de la observación fue, primeramente, el énfasis en los eventos singulares testificados en primera persona (autopsia) por un autor específico (en contraste con la acumulación de datos anónimos a lo largo de los siglos, descrito por Cicerón y Plinio como típico de las observaciones); segundo, un esfuerzo deliberado por separar observación y conjetura (en contraste con la conexión Escolástica medieval entre la observación y las ciencias conjeturales, como la astrología); y tercero, la creación de comunidades virtuales de observadores dispersas en el tiempo y el espacio, que comunicaban y acumulaban sus observaciones en cartas y

28 Hago esta afirmación con reservas, simplemente reporto cómo se le ha considerado desde la Baja Edad Media hasta la fecha.

29 Slobodan Perovic y Allan Franklin, "Experiments in Physics", ed. Edward N. Zalta, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, el 27 de febrero de 2015, <https://plato.stanford.edu/entries/physics-experiment/>. P. 37 y ss.

publicaciones (en contraste con la transmisión de padre a hijo o de maestro a discípulo, como raros y preciosos tesoros)³⁰.

El crecimiento en abundancia, organización y difusión de las observaciones supone un campo fértil para una mayor intervención del intelecto, para una participación del hombre que vaya más allá de ser testigo, amen de un ilustrado espectador capaz de seleccionar, discriminar, registrar, organizar y transmitir sus percepciones. La participación activa llevará al hombre no solo a percibir sino a producir: esta es la distinción esencial entre observar y experimentar. La observación es capaz de una descripción, tan amplia y detallada como se desee, de una realidad. Pero es en el experimento donde el hombre busca demostrar causalidad y no solo correlación; es en el control de las variables y los sucesos donde se obliga a la naturaleza —valga la expresión— a descubrir sus ocultos secretos, que celosamente guarda y, en expresión de numerosos hombres de ciencia, no revela pacíficamente³¹.

“La observación gradualmente se yuxtapone con otros modos de inquisición³², más complejos, como el experimento”³³. Y en el mismo texto que ya he citado recoge nuevamente una idea muy sugerente de Daston, quien afirma que se pasa de un sentido del experimento como una especie de receta, prueba o simplemente experiencia, a la manipulación deliberadamente artificial, con frecuencia mediante el uso de instrumentos especialmente diseñados para explorar las causas ocultas.

Mientras que en el siglo XVII, observación y experimentación casi se identificaban, para el siglo XIX migran a una comprensión

30 Perovic y Franklin. *Ibid.*

31 Kuhn, *Estructura de las revoluciones*, 277.

32 Considero que la expresión en el original, “*modes of inquiry*”, resulta muy atinada para englobar una variedad interesante de mecanismos, más o menos graduales, entre los que ahora estoy incluyendo la observación, la experiencia y la experimentación.

33 Perovic y Franklin, “*Experiments in Physics*”. *Ibid.*

esencialmente de opuestos, en donde el observador es concebido como pasivo y, por tanto, epistemológicamente inferior al experimentador. Como ya señalé antes (pg. 19) un ser humano que observa *nunca* es pasivo, como si fuera un mero detector electrónico: siempre reflexiona sobre lo percibido; pero eso no resta fuerza al argumento pues la experimentación deliberada es superior a la reflexión cuasi-automática o sin deliberación, por la implicación cognitiva que la segunda requiere.

Siguiendo a Daston, en Perovic y Franklin, el paso de la observación a la experimentación resulta lógico y trazable, lo cual deja fuera una explicación sobre la simple experiencia, que considero de interés. Francis Bacon decía que la simple experiencia

cuando se ofrece a sí misma, se le llama casualidad, y si se le busca, experimento. Pero este tipo de experiencia es una astilla suelta; e ir a tientas por la oscuridad (...) Al contrario, el verdadero orden de la experiencia es el que primero enciende la luz [hipótesis] y entonces, por medio de esa luz encendida muestra el camino [organiza y delimita el experimento]; empezando como hace por la experiencia debidamente ordenada y asimilada, no torpe o errática, y de ella deducir los axiomas [teorías], y de estos axiomas otra vez nuevos experimentos: pues ni siquiera la Palabra Divina procedió a actuar sobre la masa general de las cosas sin el orden debido³⁴.

En este texto Bacon hace explícito el papel de la inducción, que resulta relevante señalar pues —como apunta Barrio Marín siguiendo la definición tradicional del término—, “inducción es dar el paso de lo particular a lo general. De las observaciones individuales a las conclusiones generales o universales”³⁵, o

34 Francis Bacon, *Novum Organum; Or, True Suggestions for the Interpretation of Nature* (Project Gutenberg), consultado el 22 de mayo de 2022, <http://www.gutenberg.org/ebooks/45988>, i. 82.

35 Barrio Marín, “Experiencia en la ciencia”. P. 8.

siguiendo con el texto de Bacon, de la experiencia ordenada deduce axiomas o teorías.

Otra inquietud es que mientras que Davidson distingue entre interpretación (aplicada a 'eventos mentales') y explicación (aplicada a 'sistemas físicos'), y mientras que está atento al modo como la comprensión reflexiva de un agente sobre las causas de su mismo estado corpóreo puede introducir nuevas consideraciones hacia el pensamiento y acción futuros, no considera cómo las técnicas aplicadas a ese cuerpo alteran el pensamiento y el sentimiento³⁶.

Sobre esta idea, siguiendo a Sorensen quien afirma que “la divergencia en trasfondo cultural es una fuente de inconsistencia”³⁷ volveré más adelante al hablar de las condiciones y cualidades de un experimento, pero resalto aquí la afirmación de Connolly cuando hace explícito el efecto inmanente de la acción intelectual: la mente, tras un proceso reflexivo, queda alterada — podría decir, más perfeccionada — para ulteriores consideraciones. Lo señalo ahora sin profundizar más, esta idea será de utilidad conforme entre con mayor incisividad en el papel de la mente en el proceso experimental.

Resulta posible —sobra decirlo— profundizar con mayor riqueza en los matices y diferencias que los estudiosos han determinado entre observación y experiencia o experimento. Me detengo aquí acudiendo a la idea que expresa Malik cuando afirma que “aunque de interés, quizá resulta poco sorprendente a la luz de lo expuesto hasta ahora, que muy pocos usen la nomenclatura de [Ian] Hacking de observación/experimento” y a continuación, citando el desarrollo de Chang y Gooding, señala que “la mayoría cree que la experimentación científica debe ser considerada como un proceso continuo, más que uno que implica partes discretas”³⁸.

36 William E. Connolly, “Experience & Experiment”, *Daedalus* 135, núm. 3 (julio de 2006): 69, <https://doi.org/10.1162/daed.2006.135.3.67>.

37 Roy A. Sorensen, *Thought Experiments*, vol. 17 (Oxford University Press, 1992), 27, <http://course.sdu.edu.cn/G2S/eWebEditor/uploadfile/20121224164821178.pdf>.

Esta idea de que el método experimental es un proceso continuo alimentará la reflexión de esta tesis y volveré reiteradamente sobre ella, desde ángulos variados. Será útil conforme ensamble los elementos de la hipótesis que presentaré en conclusiones tanto acerca del mapa metodológico de la ciencia experimental como de la importancia de una visión de matices, no dicotómica o de fronteras determinadas o determinables, al estudiar este mapa.

Las consideraciones precedentes llevan a algunas conclusiones: en adelante la distinción que haré será solamente entre observación y experimento. Identificaré el segundo con la experiencia o, cuando menos, recurriré más a la distinción entre mera observación e incluso observación planeada, y experimento, con la composición física o mental que pueda existir en su elaboración y ejecución pero ante todo con la intención de intervenir con la naturaleza para producir un resultado o desentrañar un conocimiento antes ignorado.

Aun falta ofrecer alguna definición de experimento y cierro este epígrafe copiando la que ofrece Buzzoni cuando cita a Duhem relativo a los experimentos en la física, que considero aplicable en general:

...un experimento en la física es la observación precisa de fenómenos acompañada por una interpretación de estos fenómenos; dicha interpretación sustituye los datos concretos realmente recopilados por la observación, por representaciones abstractas y simbólicas que les corresponden en virtud de las teorías admitidas por el observador. (Duhem 1914, 237; 1914/1954, 147)³⁹.

38 Saira Malik, "Observation Versus Experiment: An Adequate Framework for Analysing Scientific Experimentation?", *Journal for General Philosophy of Science* 48, núm. 1 (el 1 de marzo de 2017): 71–95, <https://doi.org/10.1007/s10838-016-9335-y>. P. 88.

39 Marco Buzzoni, "Pierre Duhem and Ernst Mach on Thought Experiments", *HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science* 8, núm. 1 (el 1 de marzo de 2018): 17, <https://doi.org/10.1086/695720>.

Es una definición que recoge y concentra una muy buena cantidad de los postulados aquí presentados y que puede además completarse y matizarse con la exposición que detalla Parker:

un experimento puede caracterizarse como una actividad de investigación que involucra la intervención sobre un sistema para ver cómo cambian —si acaso— algunas propiedades de interés de ese sistema, a la luz de esa intervención. Una intervención es, burdamente, la acción que busca colocar un sistema en un estado determinado y que de hecho pone al sistema en un estado determinado, aunque quizá no sea el que se pretendía⁴⁰.

1.1.2. La actividad de la inteligencia

Esta somera categorización evolutiva de la búsqueda empírica del conocimiento queda incompleta si no se considera el papel de la razón de un modo más explícito. La presente investigación se enfoca en una actividad de naturaleza empírica, y cabe señalar que cualquier empresa humana es tal precisamente porque requiere del intelecto: al abordar el experimento en cualquiera de sus posibilidades necesariamente pasamos con mayor fuerza al ámbito del pensamiento, del conocimiento que podría calificarse como más especulativo. Pretendo reflexionar sobre el itinerario intelectual del experimento físico, por llamarle de algún modo⁴¹, a experimentos que podrían tener representación o correspondencia física, pero que no son realizados materialmente sino solo en la mente.

1.1.2.1. El crecimiento de las dicotomías

A lo largo de los siglos se ha desarrollado un aparente antagonismo entre especulación filosófica y conocimiento

40 Wendy S. Parker, "Does Matter Really Matter? Computer Simulations, Experiments, and Materiality", *Synthese (Dordrecht)* 169, núm. 3 (2009): 487, <https://doi.org/10.1007/s11229-008-9434-3>.

41 Distinto a decir "experimento en la física": es una diferencia entre método y objeto de estudio.

experimental, que ha producido extremismos en la historia del conocimiento. Quizá en el empirismo y el positivismo podemos contemplar algunas expresiones más señaladas de esta polémica⁴²: desde una radical desconfianza a la interacción con la naturaleza, centrando la razón como única fuente válida de conocimiento, hasta el rechazo de todo pensamiento que no pueda tener una comprobación empírica. Lo condensa Brown cuando afirma que

aquellos que gustan de la física *a priori* se regocijan al encontrar en Einstein a un racionalista de la vieja usanza, que sostiene que ‘el pensamiento puro puede aprehender la realidad’ (1933, 274). Pero los empiristas incondicionales tampoco se descorazonan puesto que también dice que ‘el pensamiento puramente lógico es incapaz de aportarnos conocimiento alguno del mundo empírico; todo conocimiento de la realidad empieza en la experiencia y termina en ella’ (1933, 271)⁴³.

No dejo de contrastar la citada afirmación de Einstein con la amonestación de Bohr que puse al inicio de este trabajo: implica la clara diferencia entre un desarrollo meramente lógico —que también puede realizar una computadora con la adecuada programación de reglas y comandos— y el pensamiento humano, enormemente más complejo y rico. Resulta patente la complementariedad necesaria entre ambos enfoques y supone uno de sus puntos de unión en la misma experimentación científica, sea con elementos físicos o carente de ellos.

1.1.2.2. La inteligencia en todo el proceso experimental

Quizá parezca innecesario mencionar que sin recurso a la razón humana no hay experimento que pueda suceder. Sin embargo, esa afirmación tan evidente puede ya no estar suficientemente apoyada en la realidad actual por el advenimiento de las tecnologías que involucran inteligencia artificial, tema acerca del cual solo rozaré la superficie en distintos momentos. Puedo

42 Perovic y Franklin, “Experiments in Physics”, 9.

43 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 152.

afirmar, de modo más acotado, que sin recurso a la razón humana *en el origen*, no hay experimento que pueda suceder.

Este es un punto de partida que ya nos habla de cierta continuidad entre un trabajo de la mente y la experiencia física de interacción con la naturaleza: todo experimento empieza en la mente y una parte muy importante —sin duda la más relevante— sucede en la mente. Aun con etapas claramente detectables en cuanto al papel de la inteligencia, no son esos pasos discretos que Malik critica y, al contrario, presentan un aspecto de continuidad en donde la mente solo accidental y momentáneamente deja de jugar un papel decisivo en el experimento. En consecuencia, quiero señalar tres momentos de la intervención de la mente en *todo* experimento.

1) Desde el inicio, cuando el hombre se pregunta algún aspecto de la realidad que desea indagar; su recurso a las ideas conocidas al respecto, fruto de experiencias pasadas e imaginaciones del futuro; la estructuración de las teorías (“axiomas” en el lenguaje científico de Bacon) que ya son mayormente conocidas y tomadas como puntos de partida ciertos; los paradigmas dominantes en ese ámbito del conocimiento; las intenciones del investigador; el contexto económico, social, cultural, político, tantas veces sin una proyección en la realidad física. Todos estos aspectos se trabajan en la mente del investigador mucho antes de que la porción física de un experimento pueda llegar a suceder.

2) Después, en el desarrollo de cualquier experimento, por autónomo que este pueda ser una vez que se ha detonado, está siempre una inteligencia observando —en el sentido amplio del término— ya sea para captar los resultados intermedios, las reacciones inesperadas, las desviaciones desconcertantes o las incipientes ratificaciones o comprobaciones que puedan estarse llevando a cabo. Aunque la recopilación de datos suceda a través de un instrumento, la razón está detrás del instrumento: su diseño, calibración, sensibilidad, orden de acumulación, etc. son fruto, al menos en su origen cuando no también expresamente en el desarrollo, de la inteligencia humana.

3) Como última etapa, en esta basta descomposición, una vez que el experimento ha llegado a su término o cruza los hitos definidos en el diseño, nuevamente el papel de la inteligencia entra en juego de modo decisivo: es el momento de interpretar los resultados. Un experimento recibe datos y arroja nuevos datos, resultados, pero el paso de ese resultado a una nueva verdad antes desconocida o a una mayor claridad sobre el punto en investigación —a un mayor conocimiento del mundo— aunque pueda resultar muy inmediato o evidente, no sucede sin el concurso de la inteligencia que lo interpreta y formula. Aun cuando el resultado de un experimento no exija, en apariencia, interpretación alguna (el evento previsto sucede o no), la interpretación es ineludible pues en semejante situación esa interpretación ya estaría dada como alternativa desde el diseño (si sucede A, se comprueba X). Es decir, la interpretación aportada por el intelecto se da, aunque no sea cronológicamente el último estadio del experimento.

Un experimento no produce verdades —más allá de la trascendente verdad del ser—, sino que partiendo de los nuevos datos aportados por el experimento, la razón concluye nuevas formulaciones, relaciones, intuiciones, teorías, axiomas.

1.1.3. Vida cotidiana y hábitos intelectuales

Quedaría incompleta esta explicación que busca soportar la continuidad en el modo de conocer si omitiera otros modos que son los más habituales. No todo sucede mediante una deliberada observación o interacción con la naturaleza. A la luz de la historia y de la vida diaria podemos identificar otras formas que propician el crecimiento del acervo científico.

La evidencia⁴⁴ presenta datos al observador aunque uno no lo pretenda (primeros principios, el agua moja, el fuego quema), que inciden en el conocimiento tanto por ser inevitables como porque no requieren o admiten ulterior comprobación de causas (axiomas).

44 Perovic y Franklin, "Experiments in Physics", 20.

La experiencia de todos los días no es igual para todos. Puede actuar sobre una mente incapaz de percibir algo distinto en lo que muchos han visto y la experiencia no les dice nada (p. ej. “frotar dos objetos hace que se calienten” no va más allá del hecho mismo y su resultado). También puede, por otro lado, actuar sobre una mente dispuesta en la solución de un problema cuya salida no encuentra, que se cuestiona sobre el fenómeno (p. ej. “¿por qué al frotar dos objetos estos se calientan?”) y puede penetrar en cualquier luz que provenga de fuentes variadas y que abone a ese problema específico (p. ej. “el calor que proviene de dos objetos en fricción cambia según la velocidad de frotamiento, la presión que se ejerce y los materiales en interacción”).

Las disposiciones y los hábitos intelectuales juegan un papel primordial en la capacidad de una persona para descubrir ahí donde otros no hacen más que sentir. A esto me refiero con el descubrimiento cotidiano; podría llamarlo también conclusión segunda: no es el dato evidente en si mismo sino una consecuencia que el observador atento es capaz de concluir.

Podemos añadir otros modos de conocer que solo mencionaré pues, aunque revisten interés, abordarlos desviaría del objeto del estudio. Tales modos de conocer comprenden el hallazgo fortuito⁴⁵, la reflexión intencionada, la intuición, la discusión y el diálogo, la conclusión matemática, la hipótesis no negada, los resultados de la calibración de un instrumento, la negación y la falsación⁴⁶, los resultados no concluyentes y seguramente podrían añadirse algunos otros, sutil o mayormente distintos a los anteriores.

Este ha sido tan solo un salpicado recorrido por el proceso general de pensamiento con el que ahora es posible introducirse, con un paso más seguro, en la ciencia experimental como medio de

45 Wikipedia, “Scientific Method”, en *Wikipedia*, el 21 de agosto de 2021, 22, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Scientific_method&oldid=1039922404.

46 En sentido popperiano. Lo aclaro pues más adelante —siguiendo a Winsberg— usaré una re-significación de este término.

crecimiento en el conocimiento de la naturaleza. Hasta ahora hemos tocado solo las generalidades que permiten situarse en el lugar que más nos conviene para profundizar en las modalidades que ofrece el método de la ciencia experimental.

1.2. El conocimiento en la ciencia experimental

Kuhn hace una distinción entre ciencias clásicas o matemáticas y ciencias baconianas o experimentales. Entre las primeras señala aquellas que ya en el siglo XVIII tenían una larga tradición en su trato por especialistas, como astronomía, estática, óptica, armonía y matemática; e incluye entre las segundas más bien a un cúmulo de experimentos que aspiran a organizarse en una ciencia⁴⁷.

Brown apunta que “solo los incultos dirían que la ciencia empezó en el siglo XVII, pero este momento histórico sí marcó una diferencia respecto a cómo se hacían las cosas... la investigación de la naturaleza se volvió mucho más experimental, la observación cuidadosa se volvió la norma”⁴⁸. Barrio Marín refiere que Kuhn afirmaba el servicio que la experimentación presta a las teorías, pero con el experimentalismo baconiano nace una nueva forma de experimentar: ya no se trata de comprobar o refutar, ya no es la teoría el punto de partida sino la curiosidad en una forma más elocuente⁴⁹.

Escudriñar el desarrollo intelectual y el funcionamiento de la metodología experimental se verá mucho más clarificado al presentar un elenco seleccionado de experimentos que ilustren características útiles para el siguiente paso de la presente argumentación.

47 Barrio Marín, “Experiencia en la ciencia”. P. 9.

48 James Robert Brown, “Thought Experiments Since the Scientific Revolution”, *International Studies in the Philosophy of Science* 1, núm. 1 (septiembre de 1986): 1 a 15, <https://doi.org/10.1080/02698598608573279>. C. 1,1.

49 Barrio Marín, “Experiencia en la ciencia”. P. 11.

1.2.1. Selección de experimentos emblemáticos

Son muchos los que podemos citar como pensadores —filósofos y científicos— que han forjado la metodología experimental actual. Abundantes fuentes señalan a Francis Bacon como el padre de la ciencia moderna. Con su *Novum organum*⁵⁰ abre la puerta a una metodología claramente determinada que sustenta el moderno y perfeccionado método de las ciencias experimentales.

Apoyado en el ejercicio de sus ideas, los siguientes experimentos ilustran el nuevo modo de proceder del hombre para adquirir conocimientos sobre la naturaleza. Dos son las cualidades que busco en estas exposiciones:

- 1) Los experimentos presentados tienen una componente física evidente y esencial; parten de datos empíricos, recopilados en seguimiento de una hipótesis que pudo ser comprobada más tarde experimentalmente.
- 2) Cada uno debe ilustrar puntos que interesa resaltar en relación con el método de las ciencias experimentales y en cuanto a la profundización sobre la ampliación que puede ofrecer el uso de la tecnología. No es, por tanto, una selección exhaustiva acerca de las cualidades de los experimentos, que sería por demás extensa.

1.2.1.1. Brahe y el *Uraniborg*; Kepler con las leyes de la gravedad

Tycho Brahe⁵¹ (1546-1601) fue el observador astronómico más relevante del siglo XVI, reconocido también como uno de los más pintorescos. Dotado de una curiosidad insaciable, indudablemente buena vista, paciencia y método, además de capacidad de allegarse recursos materiales, estableció el observatorio astronómico más importante de su época en la isla danesa de Hveen, al que dio el nombre de *Uraniborg* o Castillo de Urania (en sueco). Anterior al uso astronómico del telescopio y mediante ingeniosos instrumentos diseñados y creados por él mismo, Brahe realizó las mediciones astronómicas más precisas hasta su época.

⁵⁰ Bacon, *Novum Organum; Or, True Suggestions for the Interpretation of Nature*.

⁵¹ Robert S. Ball, *Great Astronomers*, Versión Kindle, 1895.



Fig. 1. *Uraniborg*, rénder en 3D⁵². El edificio ya no existe, se reproduce de planos.

Sin embargo, aun dotado de excelentes cualidades, al parecer Brahe no poseía ni la base teórica ni la inteligencia matemática necesarias para pasar de la observación detallada a la creación de una teoría; a esto se añade una cuestión de disposición intelectual que abordaré más adelante (p. 67) y que confluyeron en su incapacidad para llegar a un resultado que fuera más allá de sus detalladas observaciones.

Por un camino un tanto accidentado —y según dicen algunas versiones, en contra de la voluntad de Brahe—, Johannes Kepler⁵³ (1571-1630) logró hacerse con las tablas sobre la observación de Marte recopiladas por el sueco. Kepler no realizó observaciones sino que se apoyó en las mediciones de Brahe y con estos datos ensayó distintos modelos que pudieran explicar el movimiento celestial del planeta rojo. Tras un arduo trabajo no carente de sinsabores, en 1608, 1609 y 1619 publicó la formulación

⁵² Samant, “Uraniborg - 3D Render”, consultado el 6 de febrero de 2023, <https://www.renderosity.com/gallery/items/2097189/uraniborg>.

⁵³ Ball, *Great Astronomers*.

matemática que describe las órbitas de los planetas y conforman las tres leyes de Kepler sobre el movimiento planetario, completando así lo que faltaba a Copérnico y le restaba credibilidad⁵⁴.

Brahe no era capaz de deducir consecuencias de su vasta observación y Kepler no realizó observación alguna. Más aun, ninguno de los dos entró en contacto ni pudo intervenir en manera alguna con su objetivo (limitémoslo a Marte, para este comentario). Sin embargo el resultado del trabajo de Brahe y Kepler constituye uno de los más innegables éxitos del método de la ciencia experimental.

1.2.1.2. Herschel: la luz infrarroja

El mejor fabricante de telescopios astronómicos de su época, William Herschel⁵⁵ (1738-1822), realizó importantes desarrollos en la capacidad de observación y, con ello, numerosos descubrimientos que ampliaron nuestro conocimiento del cielo. Es muy reducido el número de científicos que se atribuye un logro semejante al de Herschel que descubrió un planeta de nuestro sistema solar: se conocían por observación directa desde Mercurio hasta Saturno y Herschel añade a Urano a esa muy corta lista en la que (hasta el conocimiento actual) solo le faltaría Neptuno, descubierto 65 años más tarde.

Durante sus observaciones, Herschel se valió de prismas para descomponer la luz en los colores del arcoíris y fue entonces cuando, aunado a la potencia y calidad de sus telescopios, notó que existía una emisión invisible al lado de la luz roja. Al colocar un termómetro en esa franja invisible descubrió que la temperatura se elevaba por lo que adscribió a esa luz invisible la cualidad de transmitir calor, descubriendo así la luz infrarroja.

54 Copérnico afirmaba el movimiento circular de los cuerpos celestes en su sistema heliocéntrico. Kepler detalla y con ello alcanza una precisión que Copérnico no lograba, estableciendo el movimiento elíptico de las órbitas.

55 Ball, *Great Astronomers*.

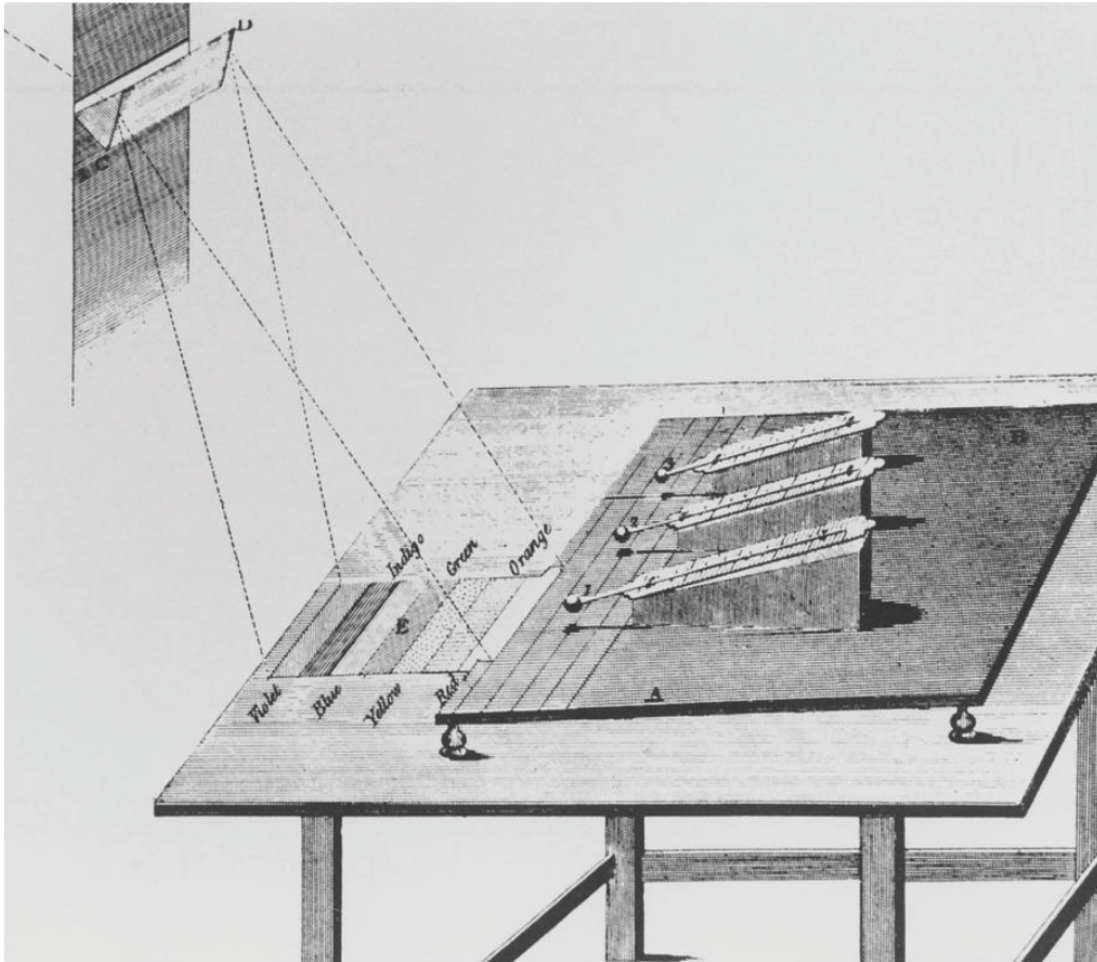


Fig. 2. Experimento de luz infrarroja de W. Herschel⁵⁶.

Sir William no estaba buscando una luz invisible ni una fuente de calor. Gracias a su mente despierta, hábito intelectual de gran utilidad en la inquisición sobre la naturaleza, y a pesar de una total carencia de fundamento teórico para la existencia de algo como la emisión infrarroja, fue capaz de intuir una novedad en el comportamiento del mundo, registrarla, y posteriormente investigarla con profundidad.

⁵⁶ "Herschel Infrared Light Experiments by Science Photo Library", Fine Art America, consultado el 27 de mayo de 2023, <https://fineartamerica.com/featured/herschel-infrared-light-experiments-science-photo-library.html>.

1.2.1.3. Pasteur: la rabia

Louis Pasteur⁵⁷ (1822-1895) fue elegido a la Academia de Medicina de Francia en 1873 por su teoría —apenas empezaba a ganar aceptación— del origen microbiano de la enfermedad.

Tras importantes desarrollos con el ántrax y otras patologías, apoyado en los descubrimientos de Edward Jenner con la vacuna de la viruela, Pasteur desarrolla numerosos experimentos de manipulación directa resecaando partes de conejos infectados de rabia para procurar el equivalente a la vacuna de Jenner. El resultado fue no una vacuna sino un tratamiento para curar la rabia que, al aplicarse a un niño de nueve años mordido por un perro rabioso, resultó tan exitoso que lo proyectó a la fama de modo sonoro.

Resulta llamativo como el sujeto de estudio de Pasteur —el virus de la rabia— no resulta perceptible a simple vista ni tampoco con los microscopios de la época. Al tratarse de una patología de origen viral, fue necesario el advenimiento del microscopio electrónico, casi 40 años después de la muerte del investigador francés. Esto no fue obstáculo para que Pasteur estableciera la causa de las enfermedades provocadas por organismos invisibles pero existentes: la carencia de detección directa de la causa, percibida con los sentidos o con un detector que los ampliara, no fue óbice para que la mente alcanzara conclusiones certeras. Por un lado, los efectos resultaban más que suficientes para una conclusión válida, y por otro la extrapolación respecto a lo que ya se conocía en otros microorganismos sí observables (las bacterias) fue suficiente para una conclusión innegablemente verdadera.

El descubrimiento del tratamiento contra la rabia es un ejemplo patente de experimentación en el sentido más tradicional del término: fundamento teórico incompleto pero suficiente, una hipótesis y viva motivación, selección de variables, modificación

57 "Louis Pasteur - Vaccine Development | Britannica", el 13 de diciembre de 2022, <https://www.britannica.com/biography/Louis-Pasteur/Vaccine-development>.

de parámetros, iteración, contexto histórico adecuado, hábitos intelectuales, etc.

1.2.1.4. *Event horizon telescope* (EHT)

Las ecuaciones de la relatividad general de Albert Einstein arrojan un fenómeno astrofísico desconcertante: la existencia de entidades infinitamente densas y de dimensión infinitamente pequeña, resultado del colapso de una estrella de gran tamaño. El hoyo negro, como se le llamó rápidamente, es un cuerpo con una fuerza gravitacional tan grande que la misma luz se ve atrapada y eso produce la carencia total de emisión de este objeto, dándole el nombre por el que hoy se le conoce.

En el punto concreto donde la fuerza de gravedad es tal que la luz ya no puede librarse de su atracción se encuentra el “horizonte de evento”. Después de ese sitio todo es negro, hasta llegar a él coexisten la luz y la materia que con gran probabilidad habrán de cruzarlo para desaparecer de la vista pero, mientras tanto, resultan visibles y ordinariamente muy luminosos.

Fotografiar un hoyo negro no es tarea sencilla. Por diversas razones científicas y técnicas —la frecuencia en que emite luz cerca del horizonte de evento, la distancia de los hoyos negros conocidos, la dificultad de interpretación de los datos, la extremada amplitud de base necesaria en el observatorio, el hecho de que son negros, etc.— durante décadas se les ha identificado por sus efectos, pero nunca por observación directa.

El proyecto empieza en 2009 después de muchos años de construcción de la base teórica. El Telescopio de Horizonte de Evento⁵⁸ (*EHT* por sus siglas en inglés) ensayó la fotografía de dos hoyos negros en 2017. En 2019 el equipo de investigación publicó la primera fotografía de un hoyo negro⁵⁹ en toda la historia.

58 Event Horizon Telescope Consortium, “Event Horizon Telescope”, consultado el 28 de enero de 2023, <https://eventhorizontelescope.org/>.

59 El hoyo negro no puede fotografiarse justamente por carecer de emisión luminosa. Pero está rodeado de material incandescente que permite distinguir claramente el horizonte de evento. Este era el objetivo del telescopio. Aunque no



Fig. 3. El hoyo negro en el centro de la galaxia M 87⁶⁰.

Como resulta evidente, no se trata de un experimento físico en el sentido más literal y tradicional de la expresión puesto que no existe intervención sobre el objetivo de estudio. Sin embargo este experimento pone de manifiesto una cantidad enorme de cualidades de un experimento que nadie en su sano juicio pensaría llamarle “mental”, a pesar de que el objetivo se encuentra a unos 55 millones de años luz de distancia.

Este experimento contempla una base teórica enormemente compleja y rica, grandes equipos de colaboración intelectual (cerca de 200 investigadores en más de 20 países), la generación de modelos que buscan representar un objetivo nunca antes visto, el diseño de metodologías matemáticas e informáticas capaces de reducir las enormes cantidades de observaciones hasta concluir en una imagen, la invención de sistemas de colaboración que aseguraran la complementariedad de los resultados provenientes de perfiles humanos muy distintos, e incluso la aparentemente

puede fotografiarse, para evitar la engorrosa expresión “fotografiar el horizonte de evento de un hoyo negro”, me refiero a ello simplemente como fotografiar un hoyo negro.

⁶⁰ Event Horizon Telescope Consortium, “Press Release (April 10, 2019): Astronomers Capture First Image of a Black Hole”, consultado el 6 de febrero de 2023, <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>.

sencilla tarea de transferir las observaciones al centro de supercómputo que realizaría la manipulación informática de las observaciones.

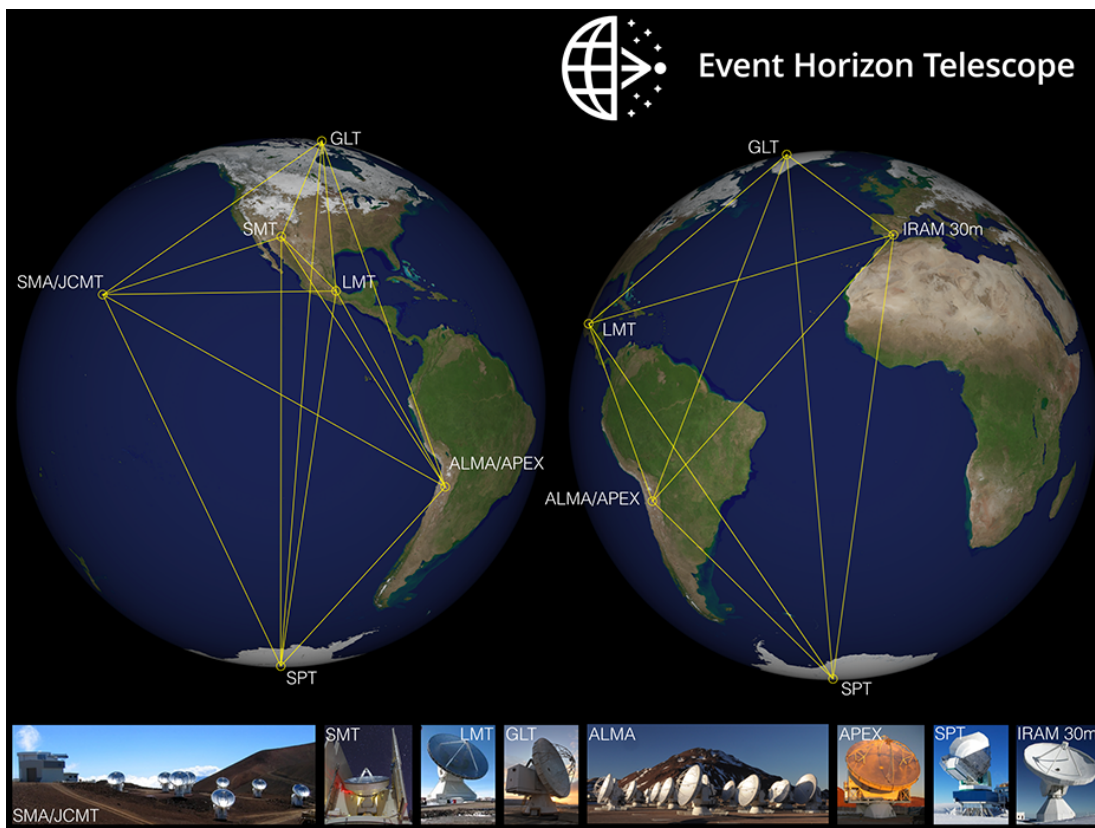


Fig. 4: *Event Horizon Telescope*, en el mundo⁶¹.

Este último punto se ilustra con una sencilla anécdota: el *EHT* se conforma con una red de 11 radiotelescopios situados en distintas partes del mundo, integrando así un gran telescopio con una base del tamaño de la Tierra. Cada telescopio “tomó una foto” (realizó observación sobre un único objetivo) durante siete días y luego envió esa información a *MIT* y al Instituto Max Planck para su correlación, en computadoras con más de 800 procesadores interconectados. El total de la información recibida fue de 5 petabytes, o 5,000 terabytes, o 5 millones de gigabytes: el equivalente a más de 78 mil memorias USB de 64 GB. Esta cantidad simplemente no puede enviarse por correo electrónico, y

⁶¹ “Event Horizon Telescope array on world map”, consultado el 27 de mayo de 2023,

http://bhpire.uawebhost.arizona.edu/wp-content/uploads/2018/07/resizeEHTarra_y_Marrone-copy.png.

mucho menos cuando proviene de un lugar remoto como la Antártida, donde se encontraba uno de los telescopios. Cada observatorio remitió —por mensajería o por transporte privado— media tonelada de discos duros con su propia “fotografía”.

Estos brevísimos datos muestran la capacidad de la tecnología moderna en la resolución de un enigma experimental. Hace evidente que sin las posibilidades computacionales actuales, este experimento resulta de todo punto y desde diversos ángulos, imposible. No se trata de un experimento físico en cuanto que no se trabajó con el objetivo de estudio sino solo con los instrumentos de detección y cómputo.

1.2.2. Aprender de los experimentos

La precedente selección experimental —que indudablemente podría ampliarse, pero la considero suficiente con el objeto de no extender más el estudio— cubre el arco de interés para esta investigación. Desde la novedosa manera de observar y con ello interpretar; llegar al descubrimiento fortuito resultado de un método más depurado y una mente dispuesta; y expandiendo las capacidades físicas e intelectuales más allá de los límites naturales del científico. Se elabora así un experimento en toda regla para concluir en una aportación renuente de la naturaleza extraída con una (en ocasiones en extremo) atenta observación e interpretación que en algunos casos requiere del poder de cómputo tanto como de la balanza o el termómetro.

He explicitado, con estos cuatro ejemplos, algunas condiciones y cualidades de un experimento partiendo de una superficial pero iluminadora consideración de su planteamiento y ejecución. Es el momento de sintetizar —de la historia y la experiencia, con la aportación de científicos y pensadores— cómo se puede describir el repertorio de rasgos que caracterizan un experimento.

1.3. Caracteres y condiciones del experimento

Brown explica que

los experimentadores hacen muchas cosas. Preparan su equipo; lo dejan correr y observan el desenlace; miden; calculan; interpretan; y sacan conclusiones que publican. No es fácil dibujar las fronteras de un experimento, es decir, determinar en dónde termina el experimento y dónde empieza el cálculo o la interpretación o la obtención de conclusiones. La distinción entre teoría y observación, por ejemplo, es difusa en el mejor de los casos y se ha argumentado sólidamente que las observaciones siempre están cargadas de teoría⁶².

La precedente consideración de Brown me parece útil para ilustrar una de las aristas en el problema de la metodología de experimentación. Aunque se establezcan protocolos y se cuiden los pasos a seguir, no es fácil determinar la frontera entre la metodología estricta y los procesos mentales libres, abiertos y siempre activos: esta realidad confiere enormes grados de libertad a la categorización del mecanismo experimental.

Este es un reto adicional a cualquier intento de extraer las características comunes de los experimentos que pretendo ahora como base para comprender mejor su naturaleza: es posible — como desarrollo en este trabajo— una reflexión sobre el experimento que obtenga cualidades y rasgos característicos de cada tipo. Pero el intento de una clasificación más estricta se encuentra con la dificultad de las fronteras más difuminadas tanto entre un experimento estrictamente físico y uno que también se considera así a pesar de no interactuar con su objeto, y uno mental en donde el trabajo intelectual es componente esencial de todo el proceso.

1.3.1. Etapas en la realización de un experimento

Con los elementos que se dilucidan en las páginas anteriores y apoyado en la literatura más tradicional sobre la ciencia experimental presento una síntesis de las cualidades que es

62 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 50.

posible educir con relativa claridad del mecanismo de adquisición de conocimiento partiendo de los sentidos, que en términos muy condensados llamamos experimento.

Muchas dimensiones presenta un concepto tan extenso. Puede abarcar desde la pregunta que provoca una inquietud hasta el resultado final del proceso. Para una exposición más paulatina he dividido (como ya señalé en la p. 32) el proceso experimental en las partes o etapas más tradicionales: diseño, ejecución e interpretación, a las que he antepuesto una sección adicional que toma en cuenta aspectos cuyo momento no es tan claro como las otras tres etapas.

1.3.1.1. Consideraciones previas y concomitantes al diseño

Todo investigador que desea acometer el esclarecimiento de una verdad, la resolución de una hipótesis mediante el método de las ciencias experimentales, ha de considerar las generalidades que se muestran ante él. En algún momento habrá de detenerse para decidir qué camino seguirá de acuerdo a la situación que su pregunta ofrece. En ocasiones, incluso antes del planteamiento de la hipótesis es necesario saber el terreno que se pisa.

He optado por colocar las siguientes consideraciones antes de la etapa del diseño del experimento en aras de una mayor claridad, sin embargo es debatible si su lugar más propio sería dentro de la sección siguiente que trata sobre el diseño del experimento.

Por eso las he titulado consideraciones previas y concomitantes: a veces suceden antes del diseño, casi siempre acompañan al diseño. En cualquier caso se trata de materias que deben tomarse en cuenta antes de dar inicio a la ejecución.

1.3.1.1.1. Limitación instrumental

Cuando Einstein, a consecuencia de la teoría de la relatividad general, habló de las ondas gravitacionales, él mismo señaló que sería imposible llegar a medirlas. El nivel de precisión requerido resultaba previsiblemente imposible de alcanzar. Un siglo después

se alcanza. Por esta razón, el motivador acerca de la limitación instrumental suele estar sujeto al período de tiempo en que se quieren los resultados: un experimento puede ser infactible a un costo objetivo en un horizonte temporal determinado. Eso no significa que sea infactible en modo absoluto: es infactible hoy.

Desde hace décadas se intenta reproducir la fusión atómica que sucede en el interior de una estrella, pero la realidad de que para lograrlo se requiere elevar el material fusionable a presiones y temperaturas que ningún contenedor puede soportar llevó a pensar en su imposibilidad. Hoy existen varias líneas de investigación basadas en el mismo concepto de contención de plasma por medio de campos magnéticos⁶³ que empiezan a arrojar resultados preliminares positivos. Durante las pasadas décadas el desarrollo en los principios de la fusión nuclear se limitaron a simulaciones, modelos matemáticos, experimentos mentales y eso no supuso una limitación al avance del conocimiento, que ahora está desembocando en los prolegómenos de una aplicación tecnológicamente viable.

1.3.1.1.2. Requerimiento de cómputo

El tamaño del universo a observar, la enormidad de los cálculos matemáticos necesarios, la excesiva complejidad del planteamiento o la amplitud de las variables relevantes pueden inclinar al uso de la mente, en muchos sentidos capaz de grandes procesamientos de manera muy rápida.

Esto, lógicamente, también encuentra su salida en los procesamientos informáticos que trataré en el siguiente capítulo, pero si se piensa simplemente en la observación de rasgos psicológicos de una sociedad, resulta infactible pretender obtener —mediante observaciones tradicionales— la información necesaria del número suficiente de individuos para poder llegar a

⁶³ El instrumento recibe el nombre genérico de tokamak, acrónimo ruso que significa “cámara toroidal con bobinas magnéticas”. Quizá el experimento de mayor alcance en este momento es el *Iter*, coinversión de numerosos países, con sede en Francia.

una conclusión válida. En cambio, la observación por personas expertas que clínicamente son capaces de procesar infinidad de rasgos de una persona, manifestados en comportamientos conocidos y relacionados mediante la experiencia y la intuición puede volver en factible un planteamiento que instrumentalmente (aparato físico) sería imposible, al menos en el momento actual.

Al igual que la consideración de la limitación tecnológica, quizá este aspecto no sea absoluto, sino que se encuentra sujeto a la viabilidad “en este momento, con esta cantidad de recursos”.

1.3.1.1.3. Entramado teórico vigente

El estado de la teoría presente puede suponer óbice para el experimento físico. Un ejemplo actual es el de la llamada “materia oscura”. Una materia que constituye el 80% del universo material, podemos ver sus efectos, predecir su comportamiento, usarla para otras experimentaciones, explicar realidades a través de ella, pero no sabemos qué es.

La inadecuación teórica para explicar su naturaleza ocasiona que no sea posible construir un aparato capaz de detectarla directamente. El ejercicio de la mente y, nuevamente, de simulaciones y modelos, han permitido entenderla mejor pero estamos todavía a la espera de un fundamento teórico que nos abra las puertas a la experimentación con la materia oscura y no solo a la medición de sus efectos.

Aplica aquí la aportación de Kuhn al afirmar que “nos acercamos si decimos que los experimentos mentales ayudan a los científicos a llegar a leyes y teorías diferentes a la que sostenían anteriormente”⁶⁴.

64 Thomas S. Kuhn, “A Function for Thought Experiments”, en *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change* (University of Chicago Press, 1978), 242, <https://doi.org/10.7208/9780226217239>.

1.3.1.1.4. Magnitudes de tiempo y distancia

Escudriñar la naturaleza para arrancarle sus —celosamente guardados— fundamentos y explicaciones, encuentra una barrera al parecer insalvable, al menos hasta ahora: el espacio y el tiempo.

Arnold y Kästner señalan algo por demás obvio pero que formulan con mucha claridad y sirve para ilustrar este punto:

Las escalas de tiempo relevantes en el medio interestelar [...] no pueden, ni remotamente, ser alcanzadas por experimentos. Por tanto, más cálida bienvenida le damos a la posibilidad de simular esta reacción en la computadora. Al mismo tiempo, dado que no puede darse un experimento directo de validación de una simulación, esto deriva en una mayor exigencia a la justificación de los ingredientes teóricos y técnicos de esta simulación⁶⁵.

Este ejemplo toca el problema de la distancia y abre al mismo tiempo un cuestionamiento que será necesario abordar más adelante respecto a la experimentación astronómica.

La limitación actual y previsible de desplazamiento del hombre no va más allá de nuestro sistema solar (menos de 5 horas de viaje a la velocidad de la luz), pero la estrella más cercana después del sol está a poco más de 4 ly (*light-year*) es decir que la luz tarda poco más de cuatro años en recorrer esa distancia. La magnitud de este paso es tan monumental que todas nuestras previsiones —salvo que se de un avance tecnológico, en este momento, no visible— inclinan a pensar que nunca podremos viajar a ese lugar que es tan solo el inicio: suele aceptarse que nuestra galaxia tiene un diámetro de unos 100,000 años-luz y contiene entre 100 y 400 mil millones de estrellas⁶⁶.

65 Eckhart Arnold y Johannes Kästner, “When Can a Computer Simulation Act as Substitute for an Experiment? A Case-Study from Chemistry”, Preprint, el 4 de julio de 2013, 15,
http://eckhartarnold.de/papers/2013_Simulations_as_Virtual_Experiments/Simulations_as_Virtual_Experiments.html.

66 Pat Brennan, “Our Milky Way Galaxy: How Big Is Space?”, Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System, consultado el 24 de mayo de 2023,

Esto, para hablar del espacio. Sin embargo cuando tocamos la extensión de las eras en la evolución cosmológica, la longitud de la vida del hombre —de la totalidad de la historia del hombre, que podemos generosamente situar en unos 100,000 años— resulta tan pequeña como para ser irrelevante. Las estrellas de vida más corta lucen unas decenas de millones de años; la evolución de las especies en la tierra se dio de manera más marcada a lo largo de unos 540 millones de años, desde la explosión del cámbrico⁶⁷; nuestro planeta tiene rastros de vida reconocible desde hace unos 3,700 millones de años⁶⁸. Y los ejemplos podrían multiplicarse. Incluso algo tan simple como observar dos veces el cometa Halley considerado —bajo cualquier parámetro— “de período corto”, requiere una longevidad de al menos 76 años⁶⁹.

Cuando la capacidad experimental física del hombre se limita a unos pocos miles de kilómetros y —si acaso— unos pocos años, la mayor parte del universo está fuera de nuestro alcance. Con una no-localidad tan radical respecto al objeto de experimentación como puede ser —para no dar ejemplos extremos o difíciles de imaginar— el sol, resulta imposible considerar que podremos tener una verdadera interacción con el objeto en observación: por limitación de tiempo (ha vivido cerca de 4,600 millones de años y le quedan otros 5,000 al menos), de distancia (150 millones de kilómetros pero con una relación tal con la tierra que acercarnos a él resulta sumamente difícil), tamaño (1.5 millones de kilómetros de diámetro, resulta difícil hasta tomar una fotografía), nivel energético (5,500°C en la superficie y varios millones en su

<https://exoplanets.nasa.gov/blog/1563/our-milky-way-galaxy-how-big-is-space>.

67 “Cambrian Explosion | Paleontology | Britannica”, el 12 de abril de 2023, <https://www.britannica.com/science/Cambrian-explosion>.

68 “The Origin of Life on Earth, Explained | University of Chicago News”, consultado el 24 de mayo de 2023, <https://news.uchicago.edu/explainer/origin-life-earth-explained>.

69 NASA, “In Depth | 1P/Halley”, NASA Solar System Exploration, consultado el 24 de mayo de 2023, <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/comets/1p-halley/in-depth>.

núcleo)⁷⁰, etc. ¿Por qué, entonces, la observación astronómica se considera verdadera experimentación si de todo punto estamos imposibilitados a influir sobre la naturaleza?

Nuestra experimentación sucede sobre el detector. No es sobre el instrumento de experimentación sino sobre el observador: el termómetro, el barómetro, el telescopio, la antena, etc. Esto abre una puerta nueva sobre el tema del experimento; una nueva porción metodológica: el experimento cuenta con la acción imprescindible de la mente, por un lado, y con la extensión sensorial e instrumental necesarias por la limitación humana, por el otro. Para el caso de la astronomía la limitación sensorial es notable, pero además su limitación temporal y espacial se añaden a la anterior y por eso la experimentación astronómica requiere de una mayor variedad de extensiones.

1.3.1.1.5. Restricciones éticas

Existen experimentos que, por las consecuencias sobre el objeto, no puedan ser llevados a cabo en la realidad física. Algunos podrán ser simulados en laboratorio, como sería contaminar un poco de agua en vez de un río entero, o radiar un animal en vez de instalar una antena que irradie a una ciudad, etc. Pero existen situaciones en las que pueda haber restricciones que no son físicas sino éticas, en sentido absoluto.

Hace unos años, Facebook realizó experimentación psicológica de campo con sus suscriptores⁷¹. Esto no es nuevo, ni para esa empresa ni en general en el mundo. Sin embargo la sensibilidad y la magnitud de las consecuencias han provocado reacciones que invitan a pensar mejor las consecuencias éticas de estos experimentos. Este tipo de consideraciones pueden llevar a acudir a experimentos mentales, modelos sociales y otros recursos en vez de aplicar un experimento real.

70 NASA, "In Depth | Sun", NASA Solar System Exploration, consultado el 24 de mayo de 2023, <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth>.

71 "Facebook Emotion Experiment Sparks Criticism", *BBC News*, el 30 de junio de 2014, sec. Technology, <https://www.bbc.com/news/technology-28051930>.

Aunque en campos variados —como la sociología y la bioética, entre otros— ya existen condiciones aceptadas para estos procedimientos que involucran experimentación con seres humanos (ordinariamente arrancan por el consentimiento informado de los sujetos y la garantía de reversibilidad en cualquier efecto negativo) esto no significa que estamos ante un acuerdo universal y maduro: el debate para la determinación de principios éticos en materias relacionadas con tecnologías nuevas, como la inteligencia artificial, evidencia que existe aun mucho terreno por recorrer. El territorio experimental en el ámbito puramente mental no pierde vigencia.

1.3.1.1.6. Sustitución no obligada

Finalmente podemos llegar al cuestionamiento de la validez de usar el experimento mental cuando existe posibilidad de realizarlo físico. Pienso que la misma pregunta establece ya una premisa que no comparto: el experimento mental es, por esencia, epistemológicamente inferior al físico y por tanto se debe preferir el físico siempre que sea posible.

El papel de la razón no solo es necesario para un experimento físico sino como fundamento del conocimiento del hombre. No considero sostenible, *a priori* y de modo general, admitir la superioridad epistémica del experimento físico sobre el mental, como argumentaré más adelante. Como todo diseño experimental legítimo, para un caso o género de casos se puede afirmar que este procedimiento, con este diseño, bajo estas circunstancias será más fiable que otro. Es decir, para circunstancias determinadas, suponiendo la posibilidad de usar experimento físico o mental, en algunas situaciones puede esperarse mejor resultado de uno o de otro tipo y no sería válido afirmar que bajo esa igualdad de posibilidad, siempre será deseable el físico.

1.3.1.1.7. Costo

Existen situaciones que requerirían una inversión de recursos de gran cuantía y que obligan a considerar el alcance del resultado

esperado en proporción con la inversión. Mientras que tenemos casos como LIGO⁷² (*Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory* u Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser, instrumento altamente sofisticado para la detección de las deformaciones espacio-temporales ocasionadas por la colisión de dos objetos gravitacionalmente poderosos, como dos hoyos negros o estrellas de neutrones), con inversiones en el orden de los miles de millones de dólares y resulta factible y proporcionado para el resultado esperado, existen también exploraciones más sencillas en las que unos cientos o miles de pesos supondrían igual desproporción.



Fig. 5. *LIGO* Hanford⁷³.

Es decir, la factibilidad por costo no es una medida absoluta sino —como suele suceder— una relación con el beneficio que se espera obtener.

72 “LIGO Lab | Caltech | MIT”, LIGO Lab | Caltech, consultado el 12 de marzo de 2023, <https://www.ligo.caltech.edu/>.

73 “LIGO Hanford”, consultado el 27 de mayo de 2023, https://www.ligo.caltech.edu/system/avm_image_sqls/binaries/52/jpg_original/HiResHanford_5.jpg?1465343234.

1.3.1.2. Diseño del experimento

La expresión “diseño de un experimento” tiene un significado muy variado y amplio en la literatura académica y científica. Me limitaré a usar la expresión en el sentido más evidente y general: el trabajo de planeación y diseño de una intervención, reflexión y observación deliberada y atenta sobre la naturaleza con vistas a conocer más sobre el objetivo de estudio.

Estrictamente hablando, el diseño abarcaría desde las preguntas que dan lugar a la hipótesis de origen hasta el planteamiento de interpretación de los resultados, sin embargo veo conveniente — aun reteniendo esta expresión y usándola de modo un tanto coloquial— limitarme a las etapas previas a la ejecución.

1.3.1.2.1. Hipótesis de origen

Inducir un resultado es como jugar con las leyes de la naturaleza: a veces se sabe qué sucederá, a veces puede tenerse una cierta idea, pero muchas otras es un misterio. Sin embargo, se tiene certeza —se trata de una certeza epistemológica fundamental— de que las leyes de la naturaleza se cumplen siempre y si en algún caso parece no suceder así, esto manifiesta con evidencia que la ley en cuestión no es del todo conocida.

Newton hace pasar luz por un prisma y después de largas observaciones es capaz de predecir efectos notables, influyendo en los resultados de acuerdo a sus predicciones. Aunque hoy parezca baladí afirmarlo, la certeza de que toda manipulación de la naturaleza juega siempre dentro de leyes inderogables e inmutables supone un paso relevante. Por eso el hombre puede hacerse preguntas con esperanza de que sean respondidas: de aquí nace la duda que origina un experimento y su consecuencia lógica que lleva a esperar una respuesta en algún sentido. Esta es

la hipótesis de origen que habrá de ponerse a prueba con el experimento.

En el año 2011, fiables estudios experimentales arrojaron el desconcertante resultado de partículas subatómicas que viajaban más rápido que la luz⁷⁴. Ante la evidencia cabían esencialmente dos opciones: acudir a la falsación de ese resultado y buscar el defecto de diseño que producía ese aparente resultado, o bien comprobarlo repetidas veces y en distintos entornos experimentales, lo cual hubiera echado por tierra una ley —la de la relatividad— ampliamente comprobada. El camino lógico fue el primero que finalmente resultó el acertado⁷⁵; otro camino hubiera presupuesto que leyes de la naturaleza sobre las que no existía ninguna duda razonable, no estuvieran siendo aplicadas.

1.3.1.2.2. Planeación de la observación

Cuando se identifica la burda precisión de los sentidos humanos, la conclusión es obvia: si se requiere detección precisa y esto ha de ocupar tiempo —recurso siempre limitado— es preciso planear cuidadosamente las observaciones. Ni se diga si la posibilidad de observar un determinado efecto no es algo previsible o frecuente, como el eclipse de 1919 observado por Eddington⁷⁶ que supuso la primera comprobación experimental de la teoría de la relatividad. Eddington se propuso fotografiar la variación de posición de una estrella visualmente cercana al Sol y, por ello, visible solo durante un eclipse total. En la observación de Brahe encontramos esta cualidad de modo eminente.

74 Geoff Brumfiel, “Particles Found to Travel Faster Than Speed of Light”, *Scientific American*, el 22 de septiembre de 2011,
<https://www.scientificamerican.com/article/particles-found-to-travel/>.

75 Geoff Brumfiel, “Neutrinos Not Faster than Light”, *Nature*, el 16 de marzo de 2012, <https://doi.org/10.1038/nature.2012.10249>.

76 “Biografía de Arthur Stanley Eddington”, consultado el 1 de diciembre de 2022, <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/e/eddingon.htm>.

1.3.1.2.3. Identificación de la complejidad de la empresa

La complejidad que algunos diseños experimentales plantean es tal que exigen un instrumento especializado ya sea por su precisión o su sofisticación (o ambos). El tamaño del equipo de investigación necesario para desarrollar instrumentos como el LHC⁷⁷ (*Large Hadron Collider* o Gran Colisionador de Hadrones, el acelerador de partículas más grande y de mayor energía en este momento) o LIGO es enorme. Por tanto, se puede afirmar que una característica de la ciencia experimental moderna es la colaboración coordinada, la adición de diversos saberes de muchos individuos, en donde —de modo más notorio en el S. XXI— el científico solitario es menos frecuente.



Fig. 6. Posición del *LHC* sobre foto aérea⁷⁸.

⁷⁷ "The Large Hadron Collider", CERN, el 21 de febrero de 2023, <https://www.home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.

⁷⁸ "LHC at CERN, depiction on photograph", consultado el 27 de mayo de 2023, https://mediastream.cern.ch/MediaArchive/Photo/Public/2008/0807031/0807031_01/0807031_01-A4-at-144-dpi.jpg.

1.3.1.2.4. Selección de variables y reducción

Cada diseño experimental, al buscar un dato del mundo, puede enriquecerse con la amplitud misma de la naturaleza y llegar así —en una búsqueda de mayor precisión— a sofisticaciones injustificadas. La selección de las variables a medir, aquellas que se han de variar, y particularmente las que han de asumirse como supuestos fijos o irrelevantes y que constituyen la reducción de la realidad para plasmar un experimento, es un factor de mucha importancia. Tanto por la existencia de realidades que no admiten experimentación, como por la profusión de aspectos que no aportan significativamente al resultado, un buen diseño debe reducir la realidad.

Galileo, en sus experimentos con planos inclinados, hubiera podido considerar —por señalar un ejemplo patentemente anacrónico— la variación en la atracción gravitacional entre la parte superior y la inferior del plano, la resistencia del aire, la adherencia electrostática entre plano y bola, la deformación de ambos elementos durante el recorrido, etc. Aunque esto podría haber aportado una mayor precisión, tanto la elaboración como el cómputo —la ingente cantidad de datos y cálculos numéricos— se hubieran tornado de una complejidad impracticable.

1.3.1.2.5. Creatividad en el diseño del instrumento

La creatividad para diseñar un experimento es un requerimiento en el avance de las ciencias. Desde los instrumentos con varillas, cuerdas y compases de Brahe hasta los kilométricos tubos al alto vacío de LIGO, se antoja aplicar una analogía impropia afirmando que a veces es necesario torturar a la naturaleza para extraerle la verdad. Un rasgo elocuente del progreso de la ciencia es el avance en el diseño de los artefactos usados para interactuar con ella. Cuando se contempla el mecanismo ultra-sofisticado y de múltiples etapas usado en el LHC para acelerar partículas a grandes energías⁷⁹, uno no puede menos de maravillarse al

79 Ofrezco una disculpa por la digresión. Parecería lógico que al “acelerar” una partícula se gana velocidad, como sucede en un vehículo. Cuando la partícula se

considerar la enorme creatividad y capacidad de resolución de problemas de quienes lo han diseñado y ejecutado.

1.3.1.3. Ejecución

Tras la etapa de diseño que involucra un intenso trabajo mental, viene la ejecución o realización del experimento mismo. Pueden existir experimentos altamente automatizados o autónomos en los que la intervención humana resulta innecesaria y, por ello, podría decirse que la inteligencia no juega un papel activo en esta etapa.

Siendo esto verdad, no cabe sin embargo olvidar que todo experimento es una expresión material de la inteligencia. Aunque el hombre no actúe en la realización, se encuentra de modo virtual en toda ejecución experimental, de las que ahora consideraremos algunas cualidades.

1.3.1.3.1. Estado inicial del experimento

Esta característica podría parecer un tanto evidente pero es de una relevancia muy grande. Cuando se habla de un experimento físico sin duda las condiciones iniciales son importantes, esenciales en el planteamiento del diseño. Mas cuando este experimento no sucede físicamente, la determinación del estado inicial juega un papel crucial no solo para la determinación de los puntos a investigar, sino en la calibración misma del instrumento que es la mente, o en la corrida de una simulación informática que exige precisión en los parámetros iniciales.

1.3.1.3.2. Influir en el resultado, predicción

Aspecto central del experimento es la influencia en el resultado buscado para medir el efecto producido por el control y el movimiento de las variables. Los planos inclinados de Galileo ofrecen un ejemplo sencillo y evidente: es posible variar los pesos

acerca a la velocidad de la luz su velocidad ya no puede crecer: aumenta su energía y con ello su masa. De este modo un acelerador como el LHC produce grandes partículas, altamente energéticas, que luego colisiona para registrar los efectos. Pero sus partículas no son más “veloces” que las de otros aceleradores: son más energéticas.

de los objetos que se dejan viajar por los planos, las longitudes de los planos, las inclinaciones, etc., buscando resultados específicos.

Las maneras de desarrollar vacunas de Pasteur pretendían obtener resultados diferenciales, acercándose a lo previsto en su hipótesis de origen. Cuando la teoría se desarrolla suficientemente, es posible incluso predecir el resultado de un experimento que nunca se ha realizado: se puede influir con certeza en el resultado porque la causa que lo ocasiona es conocida.

1.3.1.3.3. Precisión

El empeño deliberado por obtener mayor precisión en los datos obtenidos es casi una constante en la experimentación. Brahe y sus finos aparatos de observación fueron los que permitieron avances sin precedentes logrados por Kepler. No basta un fundamento teórico cercano, correcto diseño, motivación, etc., sino que cuando el diseño experimental requiere datos, resulta imprescindible que cuenten con el nivel de exactitud que permita percibir el efecto observado.

LIGO debía ser capaz de medir una distancia pequeñísima, de 10^{-24} cm, para detectar el objetivo de su estudio. Cuando se construyó la primera versión como prueba de tecnología, su capacidad sería de 10^{-17} cm y los investigadores sabían que, aun siendo el aparato más preciso construido por el hombre, no sería capaz de observar su objetivo. Con la mejora para llevarlo a la precisión requerida que se concluye en 2015, el resultado previsto de la observación no se hizo esperar.

1.3.1.3.4. Recopilación de observaciones y resultados: medición

El ejemplo de inicio acerca del gato de Schrödinger resulta un caso extremo de la importancia de este aspecto de un experimento. Si en ese caso el gato se encuentra vivo y muerto al momento de medir, dada la rareza cuántica⁸⁰ de la realidad, podemos percibir

80 No estoy usando una expresión gratuita: "*quantum weirdness*" es un modo habitual de referirse, con un dejo de humor, a las peculiaridades contra-intuitivas

que la empresa de la medición no resulta irrelevante. Aunque de manera ordinaria la medición se desarrolla al nivel macroscópico y por tanto no se sujeta a la rareza cuántica, puede darse el caso de que la sofisticación y complejidad requeridas para adquirir el resultado sea tanto o más relevante que el instrumento que la obtiene. Sirva de ejemplo el ya mencionado de las observaciones del EHT

Quiero acompañar con un ejemplo casi cómico pero común; si ocasionalmente consideramos que la conexión doméstica de internet, a 50 millones de bits por segundo (50 megabits), puede resultar lenta, pongámonos en el lugar de los investigadores de la NASA que reciben la información proveniente del *Voyager I*⁸¹ — una sonda espacial que ya abandonó el sistema solar— a aproximadamente 160 bits por segundo. A esa velocidad, descargar una fotografía ordinaria es una empresa de unas cinco horas. El modo de hacer acopio, manipulación y traslado de los datos provenientes del experimento resulta un tema sumamente importante y afecta fundamentalmente en el diseño y ejecución.

1.3.1.4. Interpretación y condición de éxito

¿Qué significa un resultado positivo? ¿uno negativo? ¿uno indeterminado? ¿una anomalía inesperada? Un experimento se diseña con una hipótesis que permita tener una expectativa respecto al desenlace y el mismo diseño debe considerar cómo se va a dar el paso de un resultado a una conclusión que acerque a la verdad.

Este trabajo involucra de modo particularmente intenso a la inteligencia pues aunque un instrumento —sea aparato de laboratorio o sistema informático— procese, organice y analice los resultados, la valoración final y conclusiones los dará siempre el ser humano.

y ausentes en la experiencia cotidiana, de la mecánica cuántica.

81 Misión espacial que lleva en funcionamiento desde 1977.

<https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/status/>

Cierto es que un sistema de cómputo puede llegar a “dar” las conclusiones siempre que se cumplan determinadas calificaciones en los resultados, pero esto es trasladar la cuestión: sea directamente por un ser humano o vicariamente al plasmar las reglas en una computadora, la inteligencia es siempre responsable y actor insustituible en la interpretación de los resultados y la elaboración de conclusiones.

Esta etapa suele implicar, a la vez que se tratan de elucidar nuevos conocimientos sobre la naturaleza, ulteriores preguntas respecto al mundo. Se suele decir que en las ciencias cada pregunta que se responde ocasiona a su vez cinco nuevas.

Seguiré abundando en las páginas siguientes sobre el rol de la razón en el proceso experimental por lo que en este momento no me extiendo más.

1.3.2. Circunstancias en torno a un experimento

El estudio del mecanismo experimental requiere considerar también el espacio en que este tiene lugar. Por espacio no me refiero a la extensión física que ocupa, sino al conjunto de condiciones próximas que tienen algún efecto sobre el experimento y que resulten de relevancia o diferenciales en el diseño, desarrollo e interpretación.

Usaré la división de condiciones más básica y evidente, considerando dos grandes campos: las condiciones —o más propiamente, condicionamientos— extrínsecas o ajenas al control del experimentador, y las condiciones intrínsecas al mismo diseño de un experimento.

1.3.2.1. Extrínsecas

Ordinariamente los factores exógenos son condicionamientos inalterables por el experimentador. En esta categoría se pueden señalar el momento histórico, la cultura nacional, la situación socio-económica, los motivadores políticos, las presiones profesionales, y otros en apariencia menos remotos como el

paradigma científico vigente en la propia disciplina y la teoría existente en el punto específico en exploración, etc. En particular, referido al marco teórico específico resulta de interés profundizar sobre la idea que varios autores manejan sobre la no completa independencia de un experimento mental al señalar que siempre su diseño estará inclinado por la teoría del momento.

Referido a los experimentos mentales, Bokulich y Frappier afirman que

una preocupación es que hay un cúmulo creciente de evidencia empírica acerca de la gran variación en las intuiciones de las personas dependiendo de su cultura, preparación, estatus socioeconómico, etc. (Stich y Bulkwater 2011; Weinbert et al. 2008; Reiss 2002; Stich y Tobías en libro citado). Por tanto bajo esta interpretación los experimentos mentales solo podrían ser replicables para miembros similares de un grupo social. Si, por otro lado, las intuiciones evocadas por un experimento mental no son esenciales a la identidad del experimento mental, entonces en el enfoque intuicionista⁸² los experimentos mentales pueden ser replicados por diferentes personas en diferentes momentos⁸³.

La primera postura que presentan es de numerosos autores, indicando que estas condiciones extrínsecas serían determinantes en el resultado final. Me parecería razonable suponer que se refieren solo al desarrollo e interpretación del experimento, puesto que la narrativa o planteamiento del experimento puede crearse de manera homogénea con una descripción adecuada. Sin embargo este mismo punto de partida, salvo el caso de una narrativa que resulte perfecta y completamente descrita, puede también dar lugar a variaciones de comprensión al plantear la situación a experimentar, sobre todo si sucede en la mente. La

82 *Intuitionist*.

83 Alisa Bokulich y Mélanie Frappier, "On the Identity of Thought Experiments: Thought Experiments Rethought", Published Article or Volume, The Routledge Companion to Thought Experiments (Routledge, 2017), 11, <http://philsci-archive.pitt.edu/14375/>.

inteligencia que comprende y la facultad de la imaginación, esenciales para el desarrollo completo de un experimento, resultarán diferentes en cada persona de acuerdo a los condicionamientos que vienen de fuera y previsiblemente son susceptibles de presentar desviaciones cuando las interpretaciones diversas resultan posibles.

Como muestra, un botón: en la introducción de su libro *Factfulness*, Hans Rosling señala un punto que sintetiza, referido a experimentos sociales con datos duros, la tesis extensa y profundamente desarrollada en el libro:

La gente, constante e intuitivamente se remite a su visión del mundo cuando piensa, adivina o aprende acerca del mundo. De manera que si tu visión del mundo está equivocada, entonces sistemáticamente harás estimaciones equivocadas. Pero esta visión sobre-dramatizada del mundo no es provocada simplemente por conocimientos desactualizados, como yo pensaba en otro tiempo. Incluso la gente con acceso a la información más reciente concibe el mundo equivocadamente⁸⁴.

Sin duda, estoy aquí mezclando los factores extrínsecos como la información relativa al estado del mundo en aspectos concretos, con intrínsecos al referirme a la percepción que la mente posee y se forma de esta concepción. En este momento quiero enfatizar solo el hecho de que la realidad externa es capaz de influir en el modo de procesar las ideas de una persona incluso hasta pasar por encima de sus conocimientos fácticos sobre el mundo.

Esta posibilidad es, en mi opinión, precisamente una de las realidades del experimento en general, y del mental en particular, como instrumento capaz de producir novedad de conocimiento sobre los mismos datos empíricos. No se trata de una simple re-interpretación sino de un auténtico re-trabajo de los datos con un

⁸⁴ Hans Rosling, Ola Rosling, y Anna Rosling Rönnlund, *Factfulness: ten reasons we're wrong about the world--and why things are better than you think*, First edition (New York: Flatiron Books, 2018), 13.

instrumento modificado, calibrado de modo distinto, sometido a distintas circunstancias. Es decir, con una variación de las circunstancias externas el sujeto experimentador puede alterar su visión de la realidad de maneras que le resultarían inaccesibles si no fuera por estas informaciones o circunstancias ajenas a él.

La abigarrada variedad de mentes, interpretaciones y conclusiones que la experiencia común manifiesta ante situaciones similares lleva a pensar en este sentido. Esto sería materia de un interesante estudio psicológico, por ahora me limito a la constatación de este hecho que parece suficientemente amplio y evidente como para considerarlo universal; la sabiduría popular lo ha resumido en la frase “cada cabeza es un mundo” y, sin perseguir más la materia, podemos señalar la teoría de las inteligencias múltiples de Howard Gardner⁸⁵, de amplia aplicación en el ámbito pedagógico.

Thomas Kuhn maneja la hipótesis fundamental de que cada período de la ciencia trabaja y construye sobre el paradigma vigente⁸⁶. Este paradigma indudablemente está determinado por el estado de avance de una ciencia determinada y como ya Kuhn ha argumentado sólidamente, tiene efecto sobre el crecimiento científico. Ahora bien, cuando se considera el decurso⁸⁷ de los experimentos científicos⁸⁸, se percibe algo por demás evidente: cada experimento sucede en un momento de la historia en el que existe una necesidad particular, o busca resolver una situación apremiante, o bien responde a una maduración del conocimiento que da fruto en una teoría nueva, etc. El país, la motivación del patrocinador (parece que experimentador y mecenas suelen ser individuos o instituciones frecuentemente distintos), incluso detalles aparentemente tan remotos como la meteorología

85 “Howard Gardner’s Theory of Multiple Intelligences | Center for Innovative Teaching and Learning”, *Northern Illinois University*, Instructional guide for university faculty and teaching assistants, consultado el 23 de julio de 2022, <https://www.niu.edu/citl/resources/guides/instructional-guide/gardners-theory-of-multiple-intelligences.shtml>.

86 Kuhn, *Estructura de las revoluciones*.

87 José Luis Comellas, *Historia sencilla de la ciencia* (Madrid: Rialp, 2009).

88 Isaac Asimov, *Momentos estelares de la ciencia* (Madrid: Alianza, 2008).

dominante o la geografía de la residencia del investigador marcan de maneras llamativas las concepciones experimentales de los científicos.

Einstein visionó su teoría de la relatividad trabajando en la oficina de patentes de Suiza, ambiente que podría parecer adverso a la profunda creatividad que desarrolló en sus años ahí. Sin embargo, a la vista constante de ideas que mostraban cuestiones de la vida real y “docenas de propuestas que presentaban nuevos métodos para sincronizar relojes y coordinar la hora mediante señales enviadas a la velocidad de la luz”⁸⁹ fue como se encontró en el campo de cultivo adecuado para explorar fructíferamente sus intuiciones y cristalizar sus teorías.

Arquímides en Siracusa, Leonardo en la Florencia renacentista, Von Braun en la Alemania de la Segunda Guerra o Frankl en el campo de concentración, son ejemplos de mentes generosamente creativas en situaciones bélicas. Lógicamente, cuando menos una porción de sus creaciones intelectuales estaban marcadas por la necesidad de solucionar o mejorar situaciones relacionadas con la guerra que ofrecieran la ventaja que requerían, tanto para la situación política-militar en el caso de Von Braun, como para la solución personal en el caso de Frankl que le llevó al desarrollo de la logoterapia.

Cualquier situación, por contraria que parezca a la maduración de nuevos conocimientos acerca de la naturaleza, más allá de ser una limitación —sin duda puede serlo y frecuentemente lo es— supone un cauce distinto a la generación intelectual, siempre que la mente esté dispuesta a no claudicar ante las contrariedades. Pareciera que la capacidad de exploración mental es, además de las características antes mencionadas, ininterrumpida. Y si el sujeto así lo busca, ininterrumpible. Pero esta aseveración requeriría un mayor estudio por lo que solo la anoto como una hipótesis insuficientemente fundamentada.

89 Walter Isaacson y Francisco Ramos, *Einstein: su vida y su universo* (Barcelona: Debolsillo, 2010), 107.

1.3.2.2. Intrínsecas

Las condiciones extrínsecas ejercen influencia sobre la mente del experimentador. El punto es que la incidencia de las condiciones extrínsecas no es igual sobre todas las personas: depende de la mente del sujeto la forma como este se ve afectado y, por tanto, el posterior efecto sobre su experimentación mental.

Sin buscar exhaustividad, señalo algunas de las condiciones intrínsecas más evidentes y relevantes, mayormente obtenidas de la literatura tanto al hablar de cuestiones epistemológicas como en el desarrollo o exposición de los mismos experimentos.

1.3.2.2.1. Hábitos intelectuales

Deliberadamente excluyo de este elenco la preparación académica del experimentador en la materia relativa al experimento pues esto más bien se refiere a los requisitos necesarios para acometer cualquier experimento.

En cambio, es importante la riqueza cultural del experimentador en materias aledañas e incluso remotas, relativas a su experimento, por la posibilidad de pensamiento sintópico⁹⁰ que esto permite; la interpretación, aceptación, modificación o en general intelección que el sujeto haga de cualquier teoría extrínseca, pues como dice Pieper, “siempre que haya *teoría pura* debe preceder un elemento de tipo considerativo y filosófico”⁹¹, es decir —con palabras de Tomás de Aquino— “todo lo que se contiene en algo, está contenido según el modo de ser del continente”⁹²; la capacidad de imaginación para representarse una situación que puede o no estar apoyada en un fenómeno real; la

90 Uso el neologismo acuñado por Mortimer Adler para significar el conocimiento que se genera de la lectura paralela de varios textos, para obtener como resultado ideas que no se encuentran en ninguno de ellos.

91 Josef Pieper, *El ocio y la vida intelectual*, 1a ed. (Madrid: Rialp, 1962), 215, https://www.academia.edu/6445088/JOSEF_PIEPER_El_ocio_y_la_vida_intelectual.

92 Tomás de Aquino, “Suma Teológica”, trad. Hernán J. González, Suma teológica, versión web, 1274, <https://hjjg.com.ar/sumat/>. 1a, q. 75, a. 5.

circunspección que le permitirá ampliar el radio de relaciones con otras causas o descubrir otras consecuencias.

Relevante es también la disciplina mental, estructura, orden y claridad internas pues, como dice Guitton, “El orden es un camino real que va de lo simple a lo complejo, de lo conocido a lo desconocido, de lo que es admitido por todos a lo que solo es admitido por las inteligencias más perspicaces”⁹³.

La afinidad intelectual con el objetivo predispone a la persona para inquirir con mayor profundidad, buscar mejor comprensión, mantenerse en el empeño con mayor asiduidad, sintonizar con los fenómenos de los que se parte. Las narraciones de Pierre y Marie Curie purificando toneladas de mineral para extraer unos gramos de radio y comprobar así la existencia de la radioactividad resultan ilustrativos, dramáticos y conmovedores, además de exitosos⁹⁴.

1.3.2.2. Disposiciones voluntarias

Me refiero a modalidades internas que el experimentador adopta de manera deliberada al acometer un experimento. Puede lograrlo con mayor o menor éxito pero al menos suponen una técnica que puede aplicarse para tratar de orientar el resultado.

Es posible, en estas, incluir el modo intelectual como se encuentra dispuesta la mente del experimentador. Siguiendo —no es la única clasificación, más bien la ofrezco aquí a manera de ilustración— la propuesta de Moshe Bar, podemos identificar cinco parámetros acerca de la disposición mental (que no es la capacidad intelectual), entre los que menciono solo dos: el talante divergente (propio de la exploración) o convergente (activo en la generación de conclusiones), y el pensamiento estrecho (apto para la profundización) o amplio (presente en los momentos de asociación de ideas), entre otros⁹⁵.

93 Jean Guitton, *El trabajo intelectual: consejos a los que estudian y los que escriben* (Madrid: Rialp, 2010), 69.

94 Barbara Goldsmith, *Marie Curie, genio obsesivo*, 2022.

95 Bar, *Mindwandering*.

1.3.2.2.3. Cualidades antropológicas: virtudes

También resultan de importancia las virtudes intelectuales y profesionales de que se encuentre revestido el sujeto como fruto de su esfuerzo consciente, como la persistencia, tolerancia a la frustración, resiliencia, paciencia, etc. Resalto la virtud de la persistencia por ser punto de partida habitual para la intuición y lo ilustro con un texto gráfico aunque poco académico: “Pero estos destellos de verdad nunca se encienden salvo en un cerebro sobreestimulado por el esfuerzo y la reflexión. Escudriñé la lista más de veinte veces, antes de que ese pequeño detalle tomara forma definida”⁹⁶. Acudiendo al ya citado Moshe Bar, “una revelación”⁹⁷ es nuestra mente subconsciente transmitiendo a la mente consciente el resultado final de un proceso de incubación”⁹⁸.

Un experimentador puede quizá intentar centrar su perfeccionamiento en aquellas cualidades que se relacionen de modo directo con su área. Pero quien experimenta es el hombre y la conexión existente entre las virtudes hacen que la mayor amplitud en alguna o deficiencia en otra modifique el trabajo virtuoso de la persona completa.

En este sentido, se vuelve significativo considerar la apertura a la verdad y la humildad. Reproduzco entresacando de un fragmento del diálogo entre Sócrates y Guitton escrito por este segundo como una fantasía de sus encuentros al poco de morir. Guitton encuentra a Sócrates en el purgatorio:

¡Sócrates! ¡Que sorpresa!...

¿me creía usted en el infierno?... desengañese, aun sigo en el purgatorio...

¿Y hasta cuándo se quedará usted ahí?...

96 Maurice Leblanc, *Eight Strokes of the Clock*. (Read Books Ltd., 2015), <http://www.myilibrary.com?id=811191>. C. VI.

97 *Insight*. La mejor traducción sería “intuición” pero quiero evitar confundirla con este proceso cognitivo, aunque claramente lo describe. Opté por usar “revelación”.

98 Bar, *Mindwandering*, 33.

Hasta el fin del mundo...

¿Pero cuáles son los pecados que pueden exigir una purificación tan larga?

Tres motivos: primero, orgullo intelectual; segundo...

¿Cuál es ese orgullo Sócrates?...

Creerse Dios... No como los locos, claro está, sino como los filósofos, que no es lo mismo...

Desarrólleme este concepto.

Imaginar que nuestra mente fabrica la verdad en lugar de ajustarse a la realidad. Imaginar que podemos decretar el bien y el mal. No querer pensar más que por uno mismo, no confiar nunca en nadie y no querer depender de nada⁹⁹.

La apertura a la verdad es una exigencia antropológica, pues la inteligencia es atraída por la verdad, y por eso mismo resulta un reclamo metodológico al buscar el sustento de una teoría que explique un aspecto del mundo, como afirma Pieper citando a Tomás de Aquino: “el fin del saber teórico es la verdad”¹⁰⁰.

La sensibilidad de la persona —incluso, lo que Goleman perspicazmente llama inteligencia emocional— son significativas en un investigador pues las emociones pueden dificultar o potenciar las capacidades cognoscitivas, como pensar, resolver problemas, proyectar, actuar de modo más persistente, etc.¹⁰¹ De hecho, como el mismo Goleman afirma, puede ser especialmente interesante una narrativa que contenga una sana dosis de *pathos*, puesto que “la mente emocional es mucho más rápida que la mente racional, y se pone en acción sin detenerse ni un instante a pensar en lo que está haciendo”¹⁰² por lo que puede ofrecer

99 Jean Guitton, *Mi testamento filosófico*, trad. Beatriz Gerez Kraemer (Madrid: Ediciones Encuentro, 1998), 114.

100 Pieper, *Ocio y vida intelectual*, 179.

101 Daniel Goleman, *La inteligencia emocional*, 2016, 114.

102 Goleman, 334.

ventajas (también obstáculos, requiere educarse) en el desarrollo de un experimento de cualquier tipo.

Sin haber llegado al final, sino como una síntesis de todas las anteriores, podemos hablar de la importante condición del autoconocimiento. Solo en la medida que el sujeto, como fruto de una madura reflexión sobre sus propias capacidades, ha identificado sus cualidades, desterrado los vicios intelectuales que pueden suponer un estorbo, afinado el estado mental adecuado, abierto su mente a nuevas opciones y allanado los obstáculos que produce la soberbia intelectual, se encontrará en condiciones de calibrar de modo más preciso (me refiero específicamente al proceso antropológico de desarrollo de virtudes) el instrumento del experimento mental.

1.3.2.2.4. El conjunto de la psique

No son ni pocas ni triviales las condiciones intrínsecas que inciden sobre la realización de un experimento. Siendo todas estas relevantes para los experimentos con elementos materiales, resultan doblemente importantes para aquellos en donde estas condiciones afectan de modo directo el instrumento de trabajo.

Jacques Philippe, reconocido autor de numerosos tratados sobre la interioridad espiritual del hombre, habla del

psiquismo humano, ese mundo tan complejo de emociones y representaciones que cada uno lleva dentro de sí, y que tiene una función indispensable, sus valores y sus recursos... Nuestro acceso a toda la verdad y la riqueza de lo real puede quedar impedido por las limitaciones, y a veces, por las disfunciones de este complejo de emociones y representaciones. Entre la representación psíquica que hacemos de la realidad, y lo que esta realidad es en su verdad y en su belleza profunda, puede haber una importante distorsión¹⁰³.

103 Jacques Philippe, *Llamados a la vida* (Madrid: Rialp, 2008). C. 1.

No habla Philippe de un escepticismo que duda de la verdad o de lo que le presentan los sentidos, sino que penetra en la realidad de que la mente humana —a la que me he referido como “el instrumento” en el ejercicio de la ciencia experimental— es mucho más que un complejo de sinapsis e impulsos y es capaz tanto de ver donde no hay, como de cegarse ante lo evidente.

1.4. La amplitud metodológica

1.4.1. El progreso en el conocimiento

La ciencia es dinámica y constructiva, elabora un conocimiento sobre otro, produce razonamientos, instrumentos y teorías que encaran retos metodológicos de importancia. Pareciera que es ya una realidad del pasado aquella estimulante época del investigador solitario con el apoyo de un mecenas, o simplemente impelido por su creatividad y a merced de sus recursos, que realizaba sus propios diseños experimentales y obtenía resultados fundamentales y transformantes de nuestra comprensión del mundo. Los Galileo, Kepler, Newton, Boyle, Millikan, Darwin e incluso Einstein ya en el siglo XX pertenecen a una época de desarrollo científico aun joven que tiene visos de ser irremisiblemente pretérita.

Las bases están sentadas y aunque hay mucho por descubrir, lo que ignoramos podría decirse que es aun más. Ingenuo sería repetir, de una u otra forma, la célebre afirmación atribuida a William Thomson Kelvin, quien a la vuelta del siglo XX auguró el final de la física: señalaba que ya no quedaba nada por descubrir y en adelante a la física solo le quedaba crecer en la precisión de sus mediciones (en solo unos años se descubrió la relatividad y se incoó la mecánica cuántica, violentamente disruptivas acerca de nuestra comprensión del cosmos). Personalmente me sorprende que, con argumentos distintos, esa idea vuelve a la palestra a finales del siglo XX a través de la pluma de John Horgan¹⁰⁴.

104 John Horgan, *The End of Science: Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*, Helix Books (Reading, Mass.: Addison-Wesley

Hoy en día las investigaciones suelen requerir capitales más cuantiosos, instrumentos más especializados y complejos, colaboración de equipos interdisciplinarios y variados. A la vez se ofrecen al hombre de ciencia nuevas posibilidades como la dispersión geográfica de las personas y conocimientos, la potencia de la informática, una abundancia de información accesible fácilmente, la riqueza de una ciencia que ha desarrollado mecanismos que le permiten dar pasos más grandes en territorios más complejos, impensables hace un siglo.

1.4.2. La disrupción en el avance científico

En las primeras etapas del método científico, cuando la persona enfrenta la posibilidad de acometer un experimento, puede encontrar motivos que supongan obstáculos insalvables para una realización física: distancia, tiempo, nivel de energía, imposibilidad mecánica, y numerosos aspectos adicionales. Resulta ilustrativo, por ejemplo, el cuestionamiento original de Einstein cuando se pregunta, siendo aun adolescente, si viajara sobre un rayo de luz y volteara a ver otro haz que corre en paralelo, ¿qué vería?

Ya establecimos algunos rasgos esenciales del método experimental y la importancia que juega el trabajo del intelecto, en mayor o menor grado, en cada una de las partes de un experimento. A pesar del enorme poder de la mente y la innegable eficacia de los experimentos, llegan etapas en que las comprobadas maneras de progresar en el conocimiento de la naturaleza se ven impedidas, o cuando menos dificultadas, por la debilidad metodológica.

Si bien las posturas de Lord Kelvin y John Horgan no parecen sostenibles, siguiendo a Kuhn existen claramente momentos no solo de amplitud histórica, sino en el microcosmos de un experimentador en los que requiere de herramientas

experimentales distintas: los paradigmas vigentes claman por una disrupción, el contexto histórico quizá manifiesta un *deadlock* de conocimiento, el hombre se halla inmerso en un nudo gordiano y se enfrenta con su incapacidad de obtener nuevos conocimientos de los datos —quizá ya sobreabundantes— con que se cuenta.

Estas son algunas de las razones que promueven el recurso al experimento mental y a otras modalidades experimentales carentes de representación física. Como describe Hacking, no carente de dramatismo, en su introducción al emblemático libro de Kuhn,

1) La teoría no describe ciertas cantidades y fenómenos a fondo, nos da una idea solo cualitativamente; la medición y otros procedimientos determinan los hechos con más precisión. 2) Las observaciones no concuerdan con la teoría, ¿qué sucede? ¿Reacomodar la teoría o probar que los datos recabados serán incorrectos? 3) Aunque la teoría puede tener bases matemáticas sólidas aún no nos es posible comprender sus consecuencias¹⁰⁵.

Lo cual enlaza con la idea general de Kuhn cuando señala que

cuando fallan estos intentos de articulación [con los paradigmas existentes], se topan los científicos con ... las anomalías reconocidas, cuyo rasgo característico es su obstinada negativa a dejarse asimilar por el paradigma existente. Solo este último tipo da lugar a nuevas teorías¹⁰⁶.

Dentro de la ciencia experimental es necesario abordar la razonable oposición a aceptar la capacidad del experimento no efectuado en la realidad física para aportar nuevos informes — nuevo conocimiento sobre la naturaleza— cuando no parte de nuevos datos sino solo de nuevos procesos mentales, entramados teóricos o procesos informáticos. En mi opinión —y no es solo mía — este cuestionamiento que se hacen varios autores carece no solo

105 Kuhn, *Estructura de las revoluciones*, 21.

106 Kuhn, 237.

de fundamento suficiente sino también de sensatez pues supone asumir que un experimento agota todo lo que un conjunto de datos puede aportarle, desde la primera pasada. De esta actitud se sigue que la interpretación intelectual recorre siempre un patrón lógico, rígido y absoluto, incapaz de la intuición e innovación en el mismo proceso mental, razonamiento que cae por su propio peso.

1.4.3. Reformular, replantear, reinterpretar, relacionar, reflexionar

Ulteriores retornos a la misma información —como se ha comprobado numerosas veces en el pasado— incluso sin cambios excesivos en metodologías sino solo con nuevos enfoques, han sido fuente de auténticas revoluciones científicas.

Uno de los primeros grandes triunfos de la física del siglo XX fue el reconocimiento de que la información podría ser cuestionada, y tuvo como consecuencia el replanteamiento acerca de velocidad, espacio y tiempo. Más aun, en esta reconceptualización, los experimentos mentales de nuevo jugaron un papel vital¹⁰⁷.

Resulta poético el modo como Dava Sobel expresa el retorno de los científicos, una y otra vez, a las placas fotográficas tomadas en el Observatorio de Harvard a finales del siglo XIX e inicios del XX, al que se refiere como “el universo de cristal”¹⁰⁸. Hoy día, con nuestros grandes avances en observación astronómica y preservación de datos, sigue siendo de enorme utilidad regresar —una y otra vez— a ese universo que no agota su capacidad de entregar, aunque de modo renuente, las verdades que contiene.

Más moderno es el caso del catálogo estelar llevado a cabo por Gaia¹⁰⁹, un satélite cuya misión es clasificar los datos astrométricos de 1,700 millones de estrellas (aprox. el 0.5% del total) en nuestra

107 Kuhn, “Essential Tension, Cap 10”, 260.

108 Dava Sobel, *The glass universe: how the ladies of the Harvard Observatory took the measure of the stars* (New York, New York: Viking, 2016).

109 Herbert J. Kramer, “GAIA”, *Catalog, Satellite Missions*, el 2 de diciembre de 2013, <https://www.eoportal.org/satellite-missions/gaia>.

galaxia. Semejante volumen de datos será estudiado y re-estudiado a lo largo de décadas.

Sea por re-lectura e interpretación, por necesidad de salir del paradigma vigente que se muestra insuficiente, o por cualquier otro motivo semejante que evidencia alguna limitación, el trabajo de la mente sobre la información existente y trabajando sobre fundamentos teóricos conocidos, abre las puertas a nuevas posibilidades que podrán dar paso a nuevas conclusiones o cuando menos a planteamientos diversos para otros experimentos físicos.

Esta relación cíclica entre experimento físico y mental rotura el surco de una línea de pensamiento —no universalmente¹¹⁰ aceptada¹¹¹— que procuraré seguir explorando: la continuidad que existe entre el experimento físico y el mental¹¹², la distinción de grado, no de género, que existe entre ellos; la expansión de posibilidades que supone exceder la capacidad del hombre en lo instrumental de cara a la detección, y en lo intelectual observando el cómputo.

1.4.4. Reducción, paso hacia el experimento en la mente

Quizá un primer paso de esta continuidad viene facilitado por el recurso ordinario de la ciencia experimental a la reducción, como resultó patente en el anteriormente mencionado caso de Galileo y los planos inclinados (pg. 57). Ordinariamente no es posible incluir toda la realidad en un experimento físico, así que se dejan fuera aspectos que se consideran menos relevantes, o cuya influencia en el resultado es conocida. La reducción de factores muchas veces implica la delimitación del objeto físico que se usará en un experimento.

Esta simplificación material va acompañada de suposiciones de irrelevancia para la comprobación de una hipótesis, de búsqueda

110 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 118.

111 Bokulich y Frappier, “On the Identity of Thought Experiments”, 10, 20, 23.

112 Gonzalo Vera Zorrilla, “El experimento mental del cubo de Sir Isaac Newton” (Cd. de México, Universidad Panamericana, 2021), 14.

de mayor factibilidad en el experimento o de otras variadas razones: lo interesante es que esta reducción puede llegar a hacer innecesaria o inviable la representación material y entonces todo sucede en la mente; o puede apoyarse en una base teórica tan conocida que soporta un modelo informático confiable como equipo experimental.

Entonces la reducción, elemento constitutivo del método experimental, puede llegar a extremos que no son solo teóricos sino también materiales.

En este capítulo he procurado un recorrido desde los conceptos esenciales de la vida empírica, pasando por una selección de experimentos más representativos. He terminado con la extracción de cualidades que de ellos —y otros que he incluido de manera muy breve en los párrafos subsecuentes— es posible resaltar de modo explícito. Todo esto busca subir el primer escalón de esta investigación: la metodología de las ciencias experimentales se apoya esencialmente en el experimento ordinariamente reconocido como físico, sin embargo incluso en su modalidad más característicamente física, esta no es exclusiva ni estricta o limitativamente física.

El método de la ciencia experimental exige, en las etapas reseñadas en la sección 1.3, del ejercicio de actividad intelectual ineludible. En ocasiones, lo principal del experimento no resulta lo físico sino el trabajo intelectual. Cabe entonces preguntarse, siguiendo con la orientación general ofrecida en la introducción, si acaso la distinción entre un experimento ordinariamente considerado como físico y uno mental no merece una cercanía metodológica mayor de la que numerosos autores quieren atribuirle, hiper-clasificando —en mi opinión— y con ello ocasionando un conflicto entre maneras de acceder al saber que resultan complementarias y no disyuntivas.

En el siguiente capítulo daré el paso, siguiendo aproximadamente el mismo itinerario, al territorio del experimento mental. Así como al hablar del físico he considerado de modo imprescindible la

extensión corporal que supone la instrumentación de detección e interacción, en el mental exploraré la extensión que supone a la inteligencia el recurso a la tecnología informática. Este último punto solo aparece incoado, en preparación de la profundización que realizaré en el capítulo 3.

Para cerrar este capítulo, presento una recapitulación tabular de los experimentos mencionados —tanto los que he recogido de manera más extensa como los solo mencionados brevemente— señalando las cualidades más sobresalientes que nos aportan al conocimiento del método experimental que sucede en la realidad física.

Experimento	Elementos relevantes
Uraniborg y Leyes de Kepler	<ul style="list-style-type: none"> *Observación deliberada. *Recopilación disciplinada. *Instrumentación de detección. *Colaboración (aun no intencionada). *Complemento intelectual de habilidades y saberes. *Dispersión geográfica. *No intervención con el sujeto estudiado. *No localidad con el sujeto. *Generación reiterada de modelos de Kepler, hasta dar con el que se apega a la realidad. *Precisión en la detección.
Herschel: luz infrarroja	<ul style="list-style-type: none"> *Mejora del instrumento de detección. *Atención a efectos no esperados, ausentes en el entramado teórico y en el diseño del experimento. *Hábito intelectual desarrollado, mente inquisitiva, modo de exploración.
Pasteur: la rabia	<ul style="list-style-type: none"> *Hipótesis y diseño de experimentación. *Fundamento teórico inicial deficiente: desarrolla uno nuevo (el origen microbiano de la enfermedad) y lo comprueba. *Imposibilidad de detección directa del sujeto. *Extrapolación válida de resultados.
EHT	<ul style="list-style-type: none"> *Sujeto de estudio inaccesible en cualquier dimensión. *Entramado teórico en desarrollo. *Complejidad instrumental extrema. *Diseño del experimento que exige cualidades sin precedente de colaboración, acopio de datos, dispersión geográfica, etc.
Observación de rasgos psicológicos de una	<ul style="list-style-type: none"> *A pesar de la reducción de la muestra respecto al universo, la capacidad natural de cómputo puede resultar

sociedad	inviabile: exigencia de una extensión.
Materia oscura	*Conocimiento claro de sus efectos y capacidad predictiva pero ignorancia acerca de su naturaleza y composición: no es obstáculo para la experimentación, pero no se cuenta con instrumentación física fiable.
Experimentación solar	*Limitación espacial, temporal, energética.
Estudio de un cometa como el Halley	*Limitada longevidad humana, incluso ante un objeto tan breve, astronómicamente hablando.
Facebook y su estudio de rasgos psicológicos	*Implicaciones éticas.
LIGO (Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory)	*Complejidad teórica y tecnológica. *Exigencia de colaboración interdisciplinar. *Requisito de dispersión geográfica. *Costo. *Precisión en la detección.
Partículas más rápidas que la luz	*Proceso de falsación del resultado sobre el supuesto de que las leyes de la naturaleza (razonablemente comprobadas) se cumplen siempre.
Eclipse solar de 1919 observado por A. Eddington	*Cuidadosa planeación de la observación en eventos naturales más infrecuentes.
LHC (Large Hadron Collider)	*Complejidad instrumental. *Radical incapacidad de detección por los sentidos humanos, tanto por limitación dimensional (partículas subatómicas) como por la enormidad energética requerida y la rapidez del evento relevante (fracciones de segundo imposibles para la capacidad humana). *Grupos interdisciplinarios de científicos y técnicos. *Complejidad global. *Creatividad en la resolución de problemas complejos.
Galileo y los planos inclinados	*Selección de variables. *Reducción del diseño experimental, discriminación de lo irrelevante. *Influencia en el resultado mediante la alteración de las variables.
Descarga de las observaciones del Voyager I	*Diseño de recopilación de las observaciones y los resultados experimentales.
Relatividad de Einstein	*Factor externo: el trabajo en la oficina de patentes y el problema de las propuestas de sincronización de relojes distantes.
Arquímedes, Leonardo, Von Braun, Frankl en entornos bélicos aunque situaciones diversas	*Condicionamiento y dirección de los descubrimientos por la situación histórico-política en la que el pensador se encuentra.

Marie y Pierre Curie en el descubrimiento de la radioactividad	*Hábitos intelectuales y afinidad con el objeto de estudio.
Gaia, observatorio automático de astrometría para la Vía Láctea	*Acumulación de datos sobre los que los investigadores regresarán una y otra vez, con distintos entramados teóricos, simulaciones, enfoques y objetivos, para conocer nuevos aspectos de la naturaleza

Cap. 2: El laboratorio de la mente

Robert Brown acuña esta feliz expresión en el título de su libro acerca del experimento mental. Adopto la frase puesto que, desde mi punto de vista, expresa de modo atinado la operación intelectual en las ciencias experimentales y no me limitaría con esto tan solo al experimento mental.

En este capítulo ampliaré la exploración acerca del papel del experimento mental dentro del método de la ciencia experimental: primeramente haré un rápido recorrido histórico sobre esta modalidad; presentaré a continuación algunas consideraciones que permitan enfocar un estudio sobre algunos ejemplos elegidos por su representatividad en el ámbito experimental no-físico; finalmente extraeré de ellos los elementos que aportan a una resolución de la pregunta base de esta investigación.

El último apartado del capítulo lo dedico a sintetizar —tanto del capítulo precedente como del actual— los elementos que constituyen un experimento usando una clasificación que no he encontrado en otros autores pero que resulta evocada por la ruta argumental que habré desarrollado en estos dos capítulos. El objetivo es terminar de sustentar la argumentación que desarrollaré en el último capítulo sobre el papel de la mente y su extensión tecnológica en el método de la ciencia experimental.

La mente es el instrumento —con lo impropio que puede resultar llamarle así— más sofisticado del que tenemos conocimiento, en sentido absoluto. Ésta muy genérica consideración tiene la intención de enfatizar que cualquier intento de encasillarla en un modo específico de funcionar o una delimitación sobre sus operaciones y capacidades, si bien puede aportar al conocimiento del proceso cognitivo, siempre se quedará corta. Yo intentaré no hacerlo y adelanto que en general la opinión de otros autores en este sentido restrictivo, desde mi punto de vista, correrá el peligro de suponer una reducción que limita más que aportar. No obstante, escudriñar con detalle en una de sus cualidades o

maneras de operación resulta un camino propicio para aproximarnos a nuestro objeto de estudio: ese sitio donde, con o sin expresión física externa, sucede el avance de conocimiento que se obtiene por el método experimental.

2.1. Prolegómenos históricos

Tras varias decenas de páginas aproximándonos al experimento mental, parece obligado en algún momento recordar el cuño que da origen a este término. Copio, del texto de Aguilar y Romero, una breve explicación al respecto:

En el año de 1811, en un ensayo Hans Christian Ørsted, es el primero en utilizar el término *Gedankenexperiment* (experimentos conducidos en los pensamientos) para referirse a una fuente especial de conocimiento (cf. Ørsted, 1811), y fue también el primero en emplear el equivalente alemán *Gedankenversuch* en 1820. Años más tarde Ernst Mach empleó el término *Gedankenexperiment* de forma diferente para denotar exclusivamente la conducción imaginaria de un experimento físico real y de allí el contraste entre la experimentación física y el experimento mental. Al respecto se puede decir que fue Ernst Mach quien acuñó este término en la discusión filosófica (Mach, 1897). Este término es utilizado por Mach (1948) en un sentido amplio. Según él, fuera de la experimentación física (empírica), el hombre que llega a un desarrollo intelectual avanzado, recurre a menudo a la experimentación mental¹¹³.

En el mismo texto, Aguilar y Romero realizan una afirmación que ilustra el modo de pensar de un no reducido número de filósofos de la ciencia al respecto:

113 Yirsén Aguilar M. y Ángel E. Romero, "A propósito de los experimentos mentales: una tentativa para la construcción de explicaciones en ciencias", *Revista científica* 1, núm. 13 (el 19 de agosto de 2011): 171, <https://doi.org/10.14483/23448350.613>.

En el siglo XVII se destacan experimentadores mentales, como los de Galileo, Descartes, Newton y Leibniz (Brown, 1986; Koyré, 1968; Kuhn, 1964, 246-252). En los tiempos actuales, la creación de la mecánica cuántica (Kühne, 2005, pp 280-317; Popper, 1959) y la relatividad (Brown, 1987; Norton, 1991 y 1993) son casi impensables sin la función fundamental de los experimentos mentales¹¹⁴.

Es la postura de numerosos filósofos de la ciencia que, aun atribuyendo al experimento mental formas distintas y valores epistemológicos diferentes, difícilmente minusvaloran su aportación a las ciencias experimentales y a otras variadas ramas del saber. Al estudiar algunos procesos psicológicos del pensamiento que se reflejan en los experimentos mentales encontramos aportaciones al conocimiento que no se pueden obtener de modo tan sencillo o evidente en los físicos.

2.2. Comprender el trabajo experimental de la mente

Norton señala que

para responder al problema epistemológico de los experimentos mentales, uno debe decidir si los consideramos como epistémicamente ordinarios o como epistémicamente extraordinarios. Yo me inclino por el primero. Deriva de la filosofía de la ciencia conservadora, empiricista, de acuerdo a la cual todo conocimiento de nuestro mundo deriva de la experiencia. Es decir, mantiene que el conocimiento científico es experiencia adecuadamente organizada y generalizada. (...) Los experimentos mentales no involucran nuevos datos experimentales. Por tanto solo pueden reorganizar o generalizar lo que ya sabemos acerca del mundo físico para hacerlo explícito. (...) los experimentos mentales son instrumentos que reorganizan o

114 Aguilar M. y Romero, 169.

generalizan estas suposiciones para arrojar el resultado del experimento mental¹¹⁵.

Cabe preguntarse sobre la validez o sustento de esta afirmación de Norton: el experimento mental, por no involucrar nuevos datos empíricos, ¿es incapaz de aportar conocimiento nuevo sobre el mundo físico? Aunque me siento inmediatamente inclinado a cuestionar la primer afirmación (no involucran nuevos datos empíricos), de momento quiero enfocar la taxativa conclusión acerca de su incapacidad de aportar nuevo conocimiento sobre el mundo físico.

2.2.1. Nuevo conocimiento sin nuevos datos

A manera de acercamiento tomo un ejemplo de observación ordenada, ampliando un caso que ya mencioné antes (p. 74) extraído de la narración de Dava Sobel. A fines del siglo XIX e inicios del XX, las mujeres del observatorio astronómico de Harvard, bajo la dirección de Pickering, produjeron cientos de placas fotográficas, con calidad científica (calibradas y registradas) de miles de estrellas. Los estudiaron, catalogaron, construyeron con ellas, etc. Tiempo después Henrietta Swan Leavitt, pensando en lo que había estado haciendo, volvió sobre los datos y concluyó el comportamiento de las estrellas variables dando pie a lo que hoy (un siglo después) establece la ley que lleva su nombre referida a las estrellas cefeidas, paso imprescindible en el conocimiento de las dimensiones del universo. Todavía décadas después, y de manera repetida, los científicos han vuelto sobre las mismas placas del observatorio en busca de nuevas intelecciones sobre el mundo contenidas en esos datos.

Quizá pueda parecer un ejemplo un tanto remoto, sin embargo guardo la convicción de que estamos ante un ejemplo de humildad (vid. pg. 68), sumamente relevante en la ciencia experimental: pretender que los datos obtenidos de la naturaleza

115 John D Norton, "Are Thought Experiments Just What You Thought?", *Canadian Journal of Philosophy* 26, núm. 3 (1996): 335, <https://doi.org/10.1080/00455091.1996.10717457>.

han de entregar al científico toda su riqueza en el transcurso de su ejecución experimental, y que ya ha quedado agotado todo lo que pueden entregar, es —cuando menos— una simpleza.

Volver sobre los mismos datos, “jugando” con ellos de modos distintos, re-estructurar el análisis, situarse ante un contexto histórico o cultural distinto, disponer de más tiempo, tener un instrumento mejor calibrado —una mente más desarrollada y perfeccionada— son modos de pensamiento que indudablemente han desentrañado nuevo conocimiento sobre el mundo físico sin contar con nuevos datos empíricos. Resulta impensable el planteamiento de construir un experimento en la mente sin datos tomados de la experiencia, como ya se dijo, por tanto *toda* elaboración mental parte de la información que se ha obtenido de los sentidos ya sea por observación inmediata o diferida.

“Muchos historiadores han enfatizado correctamente la importancia de la reconceptualización en la historia de la ciencia y han hecho notar que este proceso es algo diferente a la observación de nuevos datos”¹¹⁶. Además, la acumulación de datos, quizá agotados en su estudio, a lo largo del tiempo tienen el potencial de ofrecer información antes oculta o incluso inexistente cuando se trabaja un re-análisis de la información pero en plan acumulado, como explica Parker en su estudio de 2016¹¹⁷.

Incluso el recurso al poder informático ante la acumulación de datos ya “usados” puede ofrecer luces completamente nuevas respecto al mundo. En el año 2016 la NASA publicó un mapa de la superficie de Marte¹¹⁸ de un muy alto nivel de detalle. Lo singular es que no proviene de instrumentos diseñados para la obtención de imágenes sino de un mecanismo tangencial que habría sido infactible sin el uso de la informática: durante 16 años, tres

116 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 125.

117 Wendy S. Parker, “Reanalyses and Observations”, *Bulletin of the American Meteorological Society* 97, núm. 9 (2016): 1565–72, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00226.1>.

118 Bill Steigerwald, “New Mars Gravity Map”, Text, NASA, el 16 de marzo de 2016, <http://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/mars-gravity-map>.

satélites en torno al planeta rojo registraron las pequeñísimas alteraciones en su ruta provocadas por la variación en la gravedad del punto sobre el que transitaban.

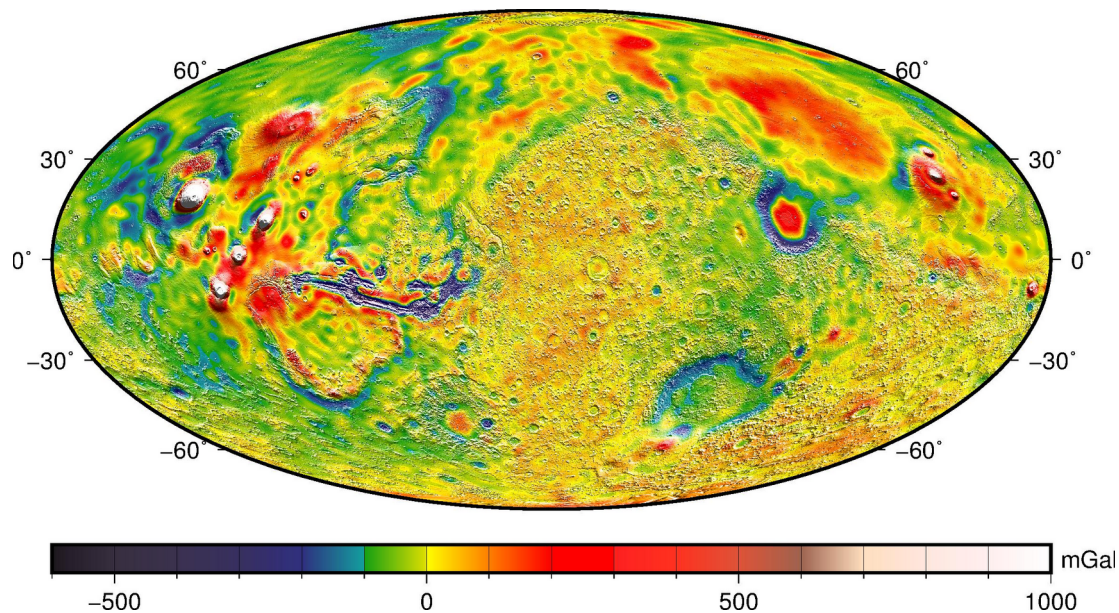


Fig. 7. Mapa de anomalías gravitacionales de Marte¹¹⁹.

Esta información procesada de manera innovadora y con un objetivo no planeado originalmente arrojó —con datos que se presumían mayormente inútiles para este fin— una inesperada nueva claridad sobre aspectos cruciales de la composición de Marte, y con ello un mapa completamente nuevo de nuestro vecino. ¿Se trató de un experimento físico? ¿uno meramente mental? Se apoyó en datos antiguos, utilizó un modelo nuevo y aprovechó la capacidad que la informática ofrece a la mente para llevarla a sitios donde por sí sola no puede llegar.

Un aspecto que resalta el poder de alcanzar nuevo conocimiento a través de la experimentación mental y, sobre todo, de la simulación informática, sin nuevos datos empíricos, proviene de la posibilidad de estudiar las cualidades emergentes de la materia: características que no resultan ni evidentes, ni a todas luces presentes, en los datos provenientes de una observación sino hasta que han alcanzado un cúmulo tal o una profundización de

¹¹⁹ NASA, “PGDA - Mars Gravity Field: GMM-3”, consultado el 28 de mayo de 2023, <https://pgda.gsfc.nasa.gov/products/57>.

observación, que permite la emergencia de estas cualidades. No profundizaré sobre el tema pues abre un universo que me resulta imposible abarcar con justicia y me desvía de la argumentación presente, por lo que solo he querido señalarlo pasajeramente. Lo mencionaré de nuevo, brevemente, en las conclusiones.

Antes de acometer una última línea de reflexión en este apartado, considero un complemento esencial señalar que, si bien he defendido la postura de que ante la simulación que no aporta datos nuevos de la naturaleza, es posible alcanzar nuevos conocimientos, existe una importante limitación: las observaciones, en algunos casos, pueden quedar obsoletas, dejar de ser vigentes o relevantes y, por ello, no solo faltar a una legítima aportación de conocimiento sino incluso reportar un resultado que se aleja de la verdad en el objetivo estudiado.

¿Es posible determinar, aunque sea mínimamente, algún supuesto que marque esta distinción entre datos precederos y observaciones perennes? Solo ofrezco una reflexión que se colige de los casos y argumentos presentados hasta ahora: un proceso discursivo legítimo, que busque la obtención de conocimiento partiendo de observaciones, estará en posibilidad de conclusiones válidas siempre que el contexto y entramado teórico aplicado, entre el momento para el que se emiten y el de las observaciones, coincidan. Pienso que esto quedará más claro cuando, más adelante (pg. 171), hable de la similitud formal entre modelo y objetivo.

Por ahora, ilustro con un ejemplo. Cuando las observaciones se refieren a realidades de la naturaleza no mutables con el paso del tiempo —como las observaciones estelares de Harvard— entonces su vigencia difícilmente fenece. En cambio, cuando las observaciones incluyen elementos variables, no basados en leyes estrictas e inmutables, o dicho de modo corto y explícito para un caso más patente, cuando implican la libertad humana y la evolución del pensamiento o costumbre de las sociedades,

entonces las conclusiones a las que se llegue podrán ser aplicables para el momento al que pertenecen.

La pretensión de utilizar datos empíricos del pasado para obtener conclusiones humanas o sociales válidas del presente, sin tomar en consideración la realidad del cambio en el objetivo estudiado, puede dar pie a sesgos por anacronismo que invaliden las conclusiones. Tal sería el caso de Facebook mencionado en la pg. 51 en el que, de modo evidente, la sociedad y su respuesta a los estímulos en medios digitales varía con el tiempo: las conclusiones del estudio son válidas —sin mayores ajustes históricos— para el tiempo en que se obtuvieron las observaciones.

Concluyo el razonamiento precedente señalando que los datos son válidos, sin importar su antigüedad (evidentemente, considerando siempre su precisión dentro del rango deseado), cuando el entramado teórico y contextual no ha cambiado de modo relevante entre la observación y la reinterpretación.

Ahora bien, el contexto puede cambiar y existe además la posibilidad de mutar el entramado teórico. Y esta adaptabilidad confiere al experimento mental un potencial que lo eleva por encima —en ciertos aspectos— del experimento material y evidencia su enorme versatilidad: siempre existe un fundamento teórico, de otro modo la hipótesis, el objetivo y la interpretación no serían plausibles. La modalidad mental supone una libertad y flexibilidad mayor en cuanto al planteamiento experimental de que dispone un investigador.

Resulta ahora posible añadir también que

tenemos aquí una transición de una teoría a otra que es bastante notable. No ha habido nueva evidencia empírica. La teoría antigua era aceptada razonablemente antes del experimento mental, pero se ha mostrado absurda por el mismo. El experimento mental ha establecido la creencia razonable en la teoría nueva¹²⁰.

120 Brown, "Thought Experiments since SR", 10.

En resumidas cuentas, enfrentando las posiciones de Kuhn y Gendler con las suyas propias, Brown señala que

la gran diferencia entre nosotros es esta: Kuhn y Gendler piensan que aprendemos acerca de nuestro esquema conceptual y solo de manera derivada sobre el mundo, mientras que yo pienso que aprendemos sobre el mundo, y solo secundariamente sobre el esquema conceptual¹²¹.

Me resulta más asequible la postura de Brown pero definitivamente considero que no es despreciable la que refiere de Kuhn y Gendler: nuevamente nos encontramos ante un planteamiento un tanto dicotómico que nos arrastra a la disyuntiva metodológica polarizada en vez de la construcción complementaria.

Sobre esta misma idea volveré en el apartado 3.5 cuando hable del poder epistémico de la simulación. En esta sección he abordado la idea de la posibilidad de obtención de nuevos datos sobre la naturaleza sin contar con nueva evidencia empírica, mientras que en esa porción de la tesis me centraré específicamente en la capacidad de la simulación informática de enriquecer el conocimiento del mundo desde un punto de vista que sería prácticamente inviable sin el uso de esa tecnología y, por tanto, el potencial de acercamiento a la verdad en la ciencia experimental sin contar con un experimento físico nuevo.

Es relevante adelantar que existen situaciones en donde hay imposibilidad fáctica de obtención de nuevos datos, y en ese tipo de circunstancias se evidenciará con más fuerza la capacidad de aportación que ofrece la simulación informática: cuando el único modo de avanzar en una investigación es mediante el uso de la tecnología, toda otra consideración de experimentación física, instrumental, se vuelve hipotética por la imposibilidad real de llevarla a cabo.

121 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 113.

2.2.2. La elaboración intelectual de todos los días

Si abordamos el aspecto psicológico y cognitivo, la disposición mental, la capacidad de asociación de ideas, el recurso a la divagación¹²² dirigida, el debate y la discusión y otras posibilidades de la realidad natural del hombre, pueden —y de hecho lo hacen, como atestigua la experiencia ordinaria— abrir nuevos espacios al conocimiento de la verdad sobre el mundo material, sin datos empíricos nuevos.

Cabe también secundar la opinión de Norton en el sentido de establecer si el experimento mental es un recurso epistémico ordinario o extraordinario. Norton se adhiere a lo primero y yo coincido. Sin embargo cabría preguntarse, ¿qué sería un recurso epistémico extraordinario? ¿se refiere a su menor frecuencia? ¿a su recurso no ordinario en la ciencia experimental? ¿quizá a que puede plantearse como sucedáneo del experimento físico o solo sería legítimo acudir a él cuando el físico es imposible? Es mi opinión, a la luz de la realidad, que el hombre está constantemente experimentando, con mayor o menor método: siempre genera modelos, simula situaciones presentes y futuras, realiza experimentos en la mente tratando de prever el desenlace de tal o cual actuación o curso de acción.

Cognitivamente, experimentar en la mente es un recurso de todos los días y de todos los tiempos. Si quisiéramos encuadrar un tipo específico de experimento mental, con una metodología estricta o una definición rigurosa —cosa que, como hemos visto, no resulta demasiado factible— quizá ese podría caer entonces en la categoría de recurso extraordinario. Considero, más bien, que se trataría de insertar un tipo de experimento mental, con unas características o condiciones específicas, como extraordinarios, y no el amplio concepto de experimento mental.

Dando un paso más, la generación de estudiosos y científicos que están ahora llenando los ámbitos de la investigación ven ya la ampliación tecnológica no como una herramienta extraordinaria

¹²² *Mindwandering*.

sino como componente cotidiano del trabajo intelectual. Desde usos tan simples como enriquecer la memoria y la capacidad de localización de datos, hasta la resolución de problemas cotidianos más sofisticados como la predicción del estado del tiempo, pasando por la consecuencia social de intercambio de conocimiento sin importar la dispersión geográfica. Ni se diga cuando se usa con herramientas especializadas en las ciencias naturales para la simulación de estructuras químicas complejas, modelos termodinámicos, meteorología, dinámica de fluidos, predicción de resultados o su misma interpretación en la física de alta energía. Se trata de experimentos cuya índole natural sería inviable de no considerar como parte constitutiva —ordinaria— el poder de la informática.

2.3. Elementos e ilustraciones sobre el experimento mental.

Brown recoge una idea de Nersessian quien con su característica claridad señala que

La experimentación mental es uno de los medios principales por el cual los científicos cambian sus estructuras conceptuales. Propongo que la experimentación mental es una forma de ‘razonamiento simulativo basado en modelos’. Esto es, los experimentadores mentales razonan mediante la manipulación de modelos mentales de la situación descrita en la narrativa del experimento mental (Nersessian 1993, 292)¹²³.

Esta consideración puede servirnos para afrontar desde un inicio la disparidad de interpretaciones que se pueden dar al experimento mental y para ver uno de los puntos básicos de todo experimento: la narrativa.

2.3.1. La narrativa en la base de la experimentación mental

El punto de partida para llevar a cabo un experimento es su descripción, apoyado en imágenes, aproximaciones matemáticas,

123 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 114.

formulaciones, representaciones esquemáticas, etc. Todo ello ha de estar trabado por una descripción ordinariamente verbal, que dé unidad a los conceptos que expresa cada parte de la narrativa. Así, en cualquier planteamiento inicial podemos tener una ilustración, con descripciones puntuales que precisen las aplicaciones, con algunas ecuaciones que ofrezcan el comportamiento esperado, aunado a una hipótesis expresada de diversas maneras posibles, pero todo ello vendrá cohesionado por la narrativa.

La narrativa sin embargo, no es el primer momento de un experimento mental, como resulta lógico: para proferir una palabra, primero hay que tener una idea, algo que decir. En este caso, concretamente, para tener algo que responder es necesario primero preguntar.

Continuando con la misma referencia anterior, pero ahora en palabras de Brown,

los modelos mentales, podría parecer, explican dos cosas importantes que son relevantes para los experimentos mentales. Primero, cómo es posible aprender acerca del mundo con el solo pensamiento, y segundo, la facilidad y rapidez de la inferencia. Brevemente, mi hipótesis es que aquello que distingue los experimentos mentales de los argumentos lógicos y otras formas de razonamiento proposicional, es que razonar por medio de un experimento mental involucra la construcción y elaboración de inferencias desde una simulación mental. Esto es lo que hace a un experimento mental tanto 'mental' como 'experimento'¹²⁴.

Nersessian señala que "la función de modelación no puede ser suplantada por un argumento... el argumento no resulta evidente sino hasta después de que el experimento mental ha sido construido y ejecutado"¹²⁵. Por tanto, desde su visión —que

124 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 114.

125 Nancy J. Nersessian, "In the Theoretician's Laboratory: Thought Experimenting as Mental Modeling", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the*

comparto— un experimento mental no es el resultado de un argumento, sino que frecuentemente el resultado del experimento mental es el argumento.

Brown concluye esta idea nuevamente citando a Nersessian:

el experimento mental original es la construcción de un modelo dinámico en la mente del científico que imagina una secuencia de eventos y procesos e infiere desenlaces. Construye entonces una narrativa para describir el estado inicial y la secuencia, para comunicar el experimento a otros, p. ej., para lograr que lo construyan y ejecuten la simulación correspondiente y, presumiblemente, obtengan los mismos resultados. (Nersessian 1993, 292)¹²⁶.

De este modo una descripción suficiente, acertada, clara es fundamento necesario para la construcción mental de la situación que habrá de experimentarse, como podremos apreciar en la sección siguiente, donde ofrezco algunos casos especialmente pintorescos y reconocidamente ejemplares.

2.3.2. Selección de experimentos mentales representativos

Evitaré, al ilustrar el experimento mental mediante ejemplos, la idea de Brown que señala

la necesidad de una multitud de casos puesto que no tengo una definición de experimento mental para trabajar; necesitamos una variedad de instancias paradigmáticas. Pero esta no es la única razón para describir varios especímenes. Son también tan placenteros a la contemplación que se trata de una oportunidad que no he de perderme¹²⁷.

El impulso sugerido por la motivación estética de Brown habrá de atemperarse ante la profusión de ejemplos que pueden aducirse para ilustrar la realidad objetivamente confusa del experimento

Philosophy of Science Association 1992 (1992): 297.

¹²⁶ Brown, *The Laboratory of the Mind*, 114.

¹²⁷ Brown, *The Laboratory of the Mind*. Prefacio.

mental: presentaré a continuación una muy breve selección que busca —como hice con los experimentos físicos en el Cap. 1— resaltar algún rasgo específico que oriente tanto a la mejor comprensión del experimento mental como a la exploración de su extensión mediante el uso de la tecnología.

No me resisto a seguir nuevamente a Brown cuando afirma que “con la excepción de Einstein, Galileo no tiene igual como experimentador de la mente”¹²⁸: ambos resultan fuentes insustituibles tanto para obtener ejemplos de experimentos mentales como para deshebrar rasgos de los mismos aplicables a otros. Al mismo tiempo, como el mismo Brown señala, “la filosofía está atiborrada de experimentos mentales”¹²⁹: puesto que mi orientación se dirige eminentemente a las ciencias experimentales, será sobre esta rama donde enfoque los casos concretos.

2.3.2.1. Brown y el cubo de Newton

Casi al final del Escolio en la introducción de sus *Principia*, Newton expone el experimento mental de un cubo lleno de agua, colgado de un hilo, que se tuerce para ponerlo a girar y apreciar el efecto de la fuerza centrífuga que provoca la elevación del agua por las paredes del cubo.

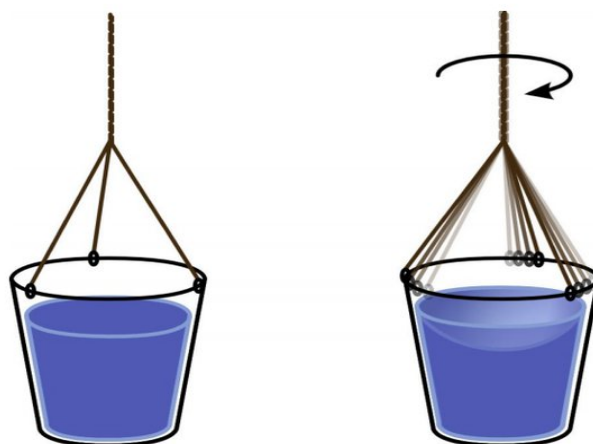


Fig. 8. El cubo de Newton¹³⁰.

¹²⁸ Brown, 2.

¹²⁹ Brown, 27.

Al hablar de este experimento, Brown asume —como muchos otros— que el objetivo del inglés es demostrar la existencia del espacio absoluto. Al margen de esa suposición (con la que ni Brown¹³¹ ni yo estamos de acuerdo¹³²) ofrece algunas consideraciones que resultan de interés en este estudio:

la reivindicación de que cierto fenómeno existe (esto es, existe en la situación del experimento mental). Dado este fenómeno, podemos acordar que Newton ha establecido de manera concluyente la existencia del espacio absoluto en la segunda parte de su argumento general¹³³.

De aquí podemos destilar tres cualidades de un experimento mental:

- 1) El experimento mental busca un objetivo determinado y eso configura el planteamiento, el desarrollo y la interpretación de sus resultados. En este caso Brown asume que el objetivo de Newton es demostrar la existencia del espacio absoluto y con ese punto de partida califica la calidad de su argumentación y el resultado.
- 2) Al igual que un experimento físico que ha de partir de datos empíricos válidos y de la mayor precisión posible según requiera el objeto buscado, así el experimento mental debe partir de fenómenos reales, existentes. Sin embargo, resulta inherente al experimento mental la tergiversación calculada de la realidad que adopta —como veremos— matices peculiares como la reducción, la idealización y la falsificación.
- 3) La diferencia entre conclusión del experimentador (mental) y la interpretación o ulterior conclusión del estudioso que lo lee. Brown ofrece como “acuerdo” (con el lector) que Newton ha

130 “Imagen Tomada de: What Is the Best, Modern Explanation for the Results of Newton’s Bucket Experiment?”, Quora, consultado el 28 de mayo de 2023, <https://www.quora.com/What-is-the-best-modern-explanation-for-the-results-of-Newtons-bucket-experiment>.

131 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 39.

132 Vera Zorrilla, “El cubo de Newton”, 76.

133 Brown, “Thought Experiments since SR”, 8.

demostrado algo que Newton nunca afirmó. Esto lleva a cuestionar la validez de las conclusiones que se pueden obtener de un experimento mental por una mente distinta a la que lo realizó y pone en jaque la replicabilidad. Sin duda que pueden seguirse de él nuevos conocimientos pero parece cuestionable pretenderlo sin considerar el objetivo original de dicho experimento. La replicabilidad, entonces, aparece como un reto que va de la mano con la adecuada narrativa.

2.3.2.2. Galileo y los cuerpos en caída

Thomas Kuhn señala que “ningún experimento mental singular puede, por supuesto, llenar el espacio de todos aquellos que han sido históricamente significativos. La categoría de ‘experimento mental’ es, en cualquier caso, demasiado amplia y vaga para servir de epítome”¹³⁴.

Aunque la coincidencia con el pensamiento de Kuhn en este sentido resulta más que evidente, quiero ofrecer un experimento mental que resulta en muchos sentidos paradigmático, no solo por el trabajo mismo sino sobre todo por el actor. Se trata del experimento de las bolas de distinto tamaño atadas entre sí con el que Galileo reduce al absurdo el planteamiento aristotélico sobre el comportamiento de los cuerpos en caída libre¹³⁵. Lo logra, por así decir, sin mover un dedo: es absolutamente mental y contundente.

134 Kuhn, “Essential Tension, Cap 10”, 241.

135 Brown, “Thought Experiments since SR”, 9.

El experimento galileano¹³⁶ es de planteamiento sencillo: Aristóteles afirma que los cuerpos ligeros caen más despacio que los pesados. Galileo propone —experimento mental, no consta que lo hiciera o tuviera intención de realizarlo— atar una bola ligera y una bola pesada y presenta el dilema, ¿cuál será la velocidad de caída puesto que ahora son un solo cuerpo, más pesado que los dos anteriores? ¿la bola ligera detendrá a la rápida, la rápida acelerará a la lenta, el conjunto más pesado tomará una velocidad superior a los anteriores o la velocidad final será el promedio de ambos cuerpos antes de unirlos? Todas las preguntas encuentran rápidamente una debilidad de respuesta que reduce la premisa aristotélica al absurdo.

En este experimento podemos contrastar el cuestionamiento 2) que presenté arriba, de Brown: el fenómeno sobre el que se apoya el planteamiento del experimento mental, ¿es real? Es decir, ¿realmente los objetos ligeros caen más despacio que los pesados? Esta sola confrontación parecería descalificar la calidad epistemológica de cualquier desarrollo posterior.

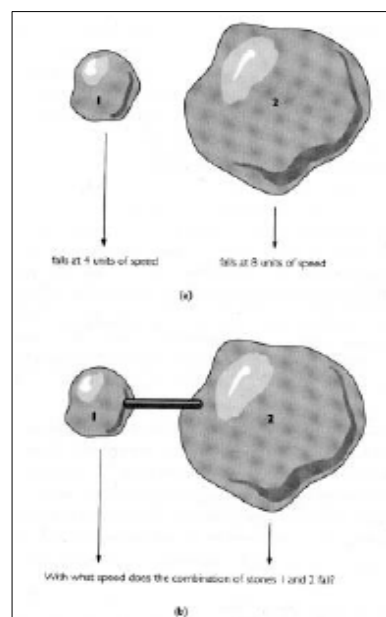


Fig. 9. Experimento mental de Galileo¹³⁷.

Sin embargo, cuidando no desviarme del caso de Galileo, existen situaciones en las que se parte de un fenómeno que no es real, una premisa falsa, que produce un resultado válido. Un caso ejemplar es el de Ptolomeo y su sistema del cosmos plasmado en el

136 Galileo Galilei, "De Motu" (1687),

<https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/library/61DNE4D2/index.meta>.

137 "Galileo's Thought Experiment (Quoted from Miller, 2000).", ResearchGate, consultado el 28 de mayo de 2023, https://www.researchgate.net/figure/Galileos-thought-experiment-quoted-from-Miller-2000_fig2_273520874.

Almagesto¹³⁸. Su punto de partida es la posición estática y central de la Tierra, desarrollando de ahí una mecánica celeste. Cabría distinguir entre una premisa falsa con resultados útiles y la misma situación inicial con resultados inútiles: ¿se puede decir que un experimento es válido solo a la luz de sus resultados? Mi postura es que definitivamente no, pues la producción de resultados válidos puede darse fortuitamente con premisas falsas. Distinto caso resulta cuando —como argumentaré más adelante— se acude a la introducción deliberada de una premisa falsa precisamente para producir el resultado deseado.

Regresando a Galileo, conviene resaltar dos rasgos que ya Brown ha mencionado: un experimento mental puede tener distintos desenlaces:

- 1) Puede ser constructivo, es decir, que aporta un conocimiento nuevo que antes solo se intuía o se ignoraba.
- 2) Puede ser destructivo al establecer la falsedad de las premisas o suposiciones.

En el caso del experimento mental de los cuerpos en caída, Galileo obtiene el doble resultado¹³⁹: destruye la argumentación aristotélica al respecto y construye una nueva explicación que sustituye satisfactoriamente mediante una explicación de la realidad apegada al fenómeno observable.

2.3.2.3. El plano inclinado de Stevin

Norton hace un comentario respecto al experimento mental del plano de Stevin que resulta provocativo: “Bajo cualquier medida, este es un experimento mental extremadamente fuerte. Su éxito fue tan impresionante que se inscribió como epitafio en la lápida

138 Claudius Ptolemaeus, *Almagest* (Alejandría, 150d. C.),

<https://bertie.ccsu.edu/naturesci/Cosmology/Ptolemy.html>.

139 Rawad El-Skaf, “The Function and Limit of Galileo’s Falling Bodies Thought Experiment: Absolute Weight, Specific Weight and the Medium’s Resistance”, Preprint, mayo de 2018, 1, https://www.pdcnet.org/pdc/bvdb.nsf/purchase?openform&fp=croatjphil&id=croatjphil_2018_0018_0001_0037_0058.

de Stevin y todavía hoy es alabado por los físicos”¹⁴⁰. Aunque esta aseveración se mueve en el planteamiento de Norton acerca de la naturaleza meramente argumentativa del experimento mental, lo que quiero rescatar es su afirmación sobre la fuerza del experimento de Simon Stevin: ¿en dónde estriba esa fuerza?

El experimento del plano inclinado de Stevin¹⁴¹ tiene un planteamiento sencillo:

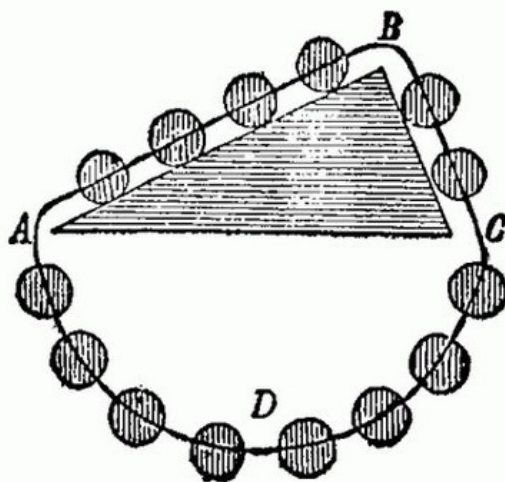


Fig. 10. El experimento mental del plano de Stevin.

El aparato representado tiene un desequilibrio (cuatro bolas a la izquierda A-B contra dos a la derecha B-C) en la parte del plano, mientras que la catenaria D en la porción inferior se encuentra equilibrada. Esto debería provocar que la cadena completa girara en contra de las manecillas del reloj de modo perpetuo, lo cual es imposible.

La elocuencia de un experimento tan simple de imaginar resalta un elemento esencial. Mientras que un experimento como el del gato de Schrödinger requiere una mente más avezada y conocedora para entender el motivo del planteamiento, no así el plano de Stevin que resulta ilustrable para todos y de muy fácil representación gráfica. No queda igual de claro por qué no

¹⁴⁰ Norton, “Are Thought Experiments Just What You Thought?”, 351.

¹⁴¹ Simon Stevin, *Mathematicorum hypomnematum de statica*, vol. Tomus Quartus (Lugodini Batavorum, 1605), 34.

funciona (es una premisa de la física la imposibilidad del movimiento perpetuo, que se seguiría de este planteamiento si fuera correcto), aunque es de fácil solución con un pequeño estudio de mecánica.

No es el caso por ahora resolver la paradoja, sino simplemente ilustrar la capacidad para explicar con facilidad lo más evidente y superficial, dando elementos para explorar con más profundidad, pero no haciendo evidente —ni mucho menos— la teoría subyacente que explicaría la solución.

2.3.2.4. Einstein y el principio de equivalencia

Posiblemente el experimento mental más representativo de la historia reciente resida en el principio de equivalencia de Albert Einstein. La teoría de la relatividad nace de experimentos mentales, crece y se desarrolla al abrigo de experimentos mentales que aportan las intuiciones teóricas (en consonancia con lo que señalé sobre Nersessian en la pg. 92) que posteriormente serán desarrolladas matemáticamente y solo años después —un siglo en el caso de las ondas gravitacionales, con LIGO— serán comprobados mediante experimento físico.

Plantea Einstein (previo a la era de los cohetes) que si una persona se encuentra en un ascensor en el espacio, o lo que sería lo mismo, en una caja cerrada sin ventanas, y este ascensor acelera de manera constante, el pasajero no podrá distinguir entre la aceleración en el interior de la cabina y la sensación que percibe al estar parado sobre la Tierra. Es decir, el marco de referencia constantemente acelerado es indistinto de la gravedad y realiza una aseveración contundente y firme: no hay experimento que pueda determinar si el observador (o el detector, no requiere ser una persona) se encuentra sometido a la gravedad o a un estado de aceleración constante. Por tanto, un marco de referencia constantemente acelerado es equivalente a la gravedad.

Una de las muchas consecuencias que se derivan, tomando como base que la luz tiene una velocidad finita, lleva a la construcción

de un nuevo experimento: si en una pared lateral del elevador hay una perforación por la que se deja entrar la luz desde una fuente estática y la cabina está en movimiento acelerado, la luz seguirá una trayectoria rectilínea pero para el observador en la cabina en movimiento, la luz describirá una curva hasta proyectarse en la pared opuesta más no directamente frente a la perforación de acceso.

Al establecer que gravedad y marco de referencia acelerado son equivalentes, se sigue que la luz, en presencia de la gravedad, se desvía y pierde su apariencia rectilínea igual que sucede en la cabina del ascensor acelerado. Este desconcertante resultado —la luz siempre se había concebido como rectilínea— fue comprobado por Sir Arthur Eddington en 1919 mediante la medición de la posición de algunas estrellas durante un eclipse solar¹⁴².

El experimento de Einstein muestra una magistral simplificación para la exposición de una teoría en la que, como dice Brown, “no podemos olvidar (...) que tiene numerosos rasgos no-observables; por ejemplo, postula una clase infinita de marcos inerciales, algo muy alejado de la experiencia”¹⁴³.

Así, Einstein ha logrado explicar una realidad contra-intuitiva, contra-cultural, de comprensión muy difícil y sin embargo de comprobada veracidad, de una manera sumamente sencilla y al alcance de cualquiera.

¿Su intención es meramente explicar una realidad cuya teoría está ampliamente desarrollada, o más bien se trata del punto de partida para el desarrollo de dicha teoría? Por lo que parece, se trata de ambas cosas pero su origen es el segundo. Einstein,

142 Es ya ampliamente aceptado que el experimento de Eddington no resultaba concluyente por el error en sus observaciones, sin embargo sirvió para dar relieve a la teoría de Einstein y no fue sino bastante tiempo después, a la luz de nuevos experimentos, que se reforzó experimentalmente la predicción de Einstein. El planteamiento experimental era acertado y su metodología se ha repetido con éxito muchas veces hasta el día de hoy, gracias a la precisión de los instrumentos actuales.

143 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 154.

hombre de viva y disciplinada imaginación, construía en la mente los entramados experimentales que posteriormente desarrollaba con rigor científico-matemático. Su punto de partida, como es bien sabido, fue la pregunta sobre los haces de luz.

Son varios los rasgos que cabría resaltar de los experimentos mentales de Einstein: por un lado, la brillante representación gráfica de la situación, la captación inmediata e inequívoca de una realidad nueva (la curvatura de la luz) por la exposición a una situación nueva. Todo son experiencias ordinarias pero el modo de acomodarlas produce como resultado una conclusión fácil y del todo novedosa.

Sin ocultar, sino más bien apoyándose necesariamente en un dato de muy difícil observación (la velocidad finita de la luz), hace comprender al observador las consecuencias de esa verdad (la pendiente ante el movimiento) y ligándola con el principio de equivalencia, la curvatura ante la gravedad. Parte de una teoría aceptada y probada (velocidad finita de la luz), concluye un efecto nuevo (curvatura de la luz), lo combina con su planteamiento teórico nuevo (equivalencia) y así ofrece un resultado mensurable, comprobable, que resulta en un nuevo conocimiento sobre el mundo. Todo esto, sin experimentación. Las primeras comprobaciones llegaron años después, mediante la solución del movimiento de precesión de Mercurio¹⁴⁴ y la ya señalada observación de Eddington.

2.3.3. El esfuerzo por categorizar el experimento mental

Supone un reto, incluso después de considerar algunos ejemplos específicos, tratar de responder la aparentemente sencilla

¹⁴⁴ La órbita de Mercurio no se encontraba en la ruta determinada por las leyes de Kepler y de Newton. Cuando la teoría de Einstein expone una de sus consecuencias —la equivalencia entre masa y energía ($E=mc^2$)— queda resuelto favorablemente el enigma al calcular que la enorme energía del Sol suponía un incremento en la masa y al usar ese nuevo valor en las leyes del movimiento de los cuerpos celestes, la observación finalmente tuvo una explicación válida en la teoría.

pregunta de ¿qué es un experimento mental? Como resume el artículo de Bokulich y Frappier,

Uno de los retos al tratar de responder tales preguntas es que no hay un consenso acerca de qué son exactamente los experimentos mentales. Los experimentos mentales ¿son experimentos¹⁴⁵?, ¿argumentos¹⁴⁶?, ¿modelos cognitivos¹⁴⁷?, ¿simples impulsores de la intuición¹⁴⁸?, ¿prótesis para la imaginación¹⁴⁹?, ¿o algo más¹⁵⁰?

Me resultaría infactible participar en esta discusión, por interesante que resulte, y aprovecharé más bien lo que algunos de estos autores presentan como cualidades de un experimento mental en el intento de ver su modo de operación y el sitio que ocupa en la ciencia experimental.

2.4. Componentes del experimento.

Con base en la selección precedente y los comentarios de distintos pensadores, procedo a ensayar una recopilación de los elementos que caracterizan un experimento, identificando lo que es esencial y lo accidental, lo que aparece como constitutivo en un experimento físico o en uno mental y lo que tienen en común. No se trata de una enumeración exhaustiva —Sorensen¹⁵¹, por ejemplo, entra a mucho más detalle— sino a la selección de puntos que resultan de utilidad para comprender mejor el trabajo del laboratorio de la mente y enfrentar la implicación de la tecnología informática como componente o suplemento de un experimento mental.

145 Ofrece varios autores como sustento de cada postura que, para facilidad de lectura, los presento al calce: Mach, [1926] 1976; Brown [1991] 2011; Sorensen, 1992a; Rowbottom, 2014.

146 Norton, 1996, 2004a,b; Brendel en el mismo volumen.

147 Nersessian, 1993, 2008.

148 Dennett, 1984, 1995.

149 Meynell, 2014; o Becker en el mismo volumen.

150 Bokulich y Frappier, "On the Identity of Thought Experiments", 1.

151 Sorensen, *Thought Experiments*.

Si bien, como señalan Bokulich y Frappier en la cita con que cerré el apartado anterior, no resulta fácil definir qué es un experimento mental, la siguiente recopilación busca acercarnos a esa determinación no por la vía de la reflexión especulativa sino de una observación atenta de cada característica sobre los casos y opiniones antes presentados.

Recoger las cualidades de los experimentos, con una visión omniabarcante que incluya los mentales y los informáticos, da lugar a una lista larga donde resulta difícil discriminar y seleccionar. Por esta razón he procurado incluir en esta enumeración todo lo que considero relevante a la vez que ofrezco una estructura que permita construir estas cualidades en la mente; la estructura que he elegido es un tanto arbitraria, propia, y puede optarse por otras distintas con los mismos méritos y validez que esta. Mi opción por el orden utilizado sigue un criterio —muy opinable— que busca la coherencia con explicaciones posteriores: agruparé las cualidades según inhieren de modo dominante en el sujeto que ejecuta o sobre el objeto de estudio, para terminar con algunas consideraciones respecto al papel de la razón como componente imprescindible en todo experimento.

2.4.1. Con incidencia dominante en el sujeto

El diseño, ejecución o interpretación del experimento afecta la mente del sujeto que desarrolla el experimento. Este apartado engloba las cualidades que afectarán de modo principal a quien lo ejecuta. La relevancia de esta primera clasificación proviene del argumento —ya mencionado y que seguiré desarrollando— de que todo experimento, del tipo que sea, implica la mente del sujeto y esta no supone un instrumento estático e invariable: resulta conveniente identificar la manera como la mente se ve afectada por un desarrollo experimental.

2.4.1.1. Objetivo o hipótesis de trabajo

Todo experimento tiene un objetivo aunque este puede revestir muchas formas: demostrar, explicar, ilustrar, negar, etc. Incluso

experimentar de manera presuntamente libre, “a ver qué pasa”, es tener un objetivo claro (justamente: a ver qué pasa). El objetivo pretendido configura el diseño, ejecución e interpretación del experimento.

Especialmente interesante resulta un concepto muy conocido en la investigación científica: el sesgo de la confirmación¹⁵² que se presenta de modo natural en el experimentador, que tenderá a ver con mayor presteza y precisión los resultados que confirman su hipótesis. De ahí que las condiciones intrínsecas para un experimento sean tan relevantes pues también ayudan a la calidad de la hipótesis y a la imparcialidad que introduce el sesgo.

2.4.1.2. Reducción, aislamiento e idealización

La ciencia experimental recurre ordinariamente a la reducción de variables, características o cualidades descriptivas de una situación que se propone someter a un experimento. Esta reducción puede adoptar distintas formas, como suposiciones de invariabilidad (p. ej. STP o presión y temperatura estándar¹⁵³) o de exclusión por conocerse sus efectos (como la omisión de fricción), por poner dos ejemplos del ámbito físico; pero también podemos señalar algunos más orientados al campo mental, como el aislamiento (p. ej. eliminamos la influencia de personas circundantes en un caso determinado), la simplificación (todo el universo material desaparece y solo quedan las esferas de Newton), etc.

Este es un recurso antiquísimo, como relata Brown referido al caso Galileo:

152 Kenneth Ian Manktelow, *Thinking and Reasoning: An Introduction to the Psychology of Reason, Judgment and Decision Making*, 1. publ (London: Psychology Press, 2012), 176, <https://ebookcentral.up.elogim.com/lib/updf-ebooks/detail.action?docID=958354>.

153 *Standard temperature and pressure*, un acrónimo estandarizado internacionalmente, utilizado tanto en la física como en la química para simplificar las descripciones. Significa que el objetivo de estudio está a 0°C y 1 bar o una atmósfera de presión.

... en un diálogo socrático, Salviati extrae de Simplicio la conclusión de que, en ausencia de resistencia o más aún, de cualquier fuerza externa, no hay necesidad de que un objeto cambie su estado de movimiento. En su experimento mental, Galileo usa un método paso a paso para progresivamente eliminar todas las influencias que el ambiente podría tener de modo realista sobre la bola. (...) gracias a la sagaz manipulación de Galileo sobre las variables dinámicas sobre la bola, no podemos evitar inferir que [su planteamiento] es verdadero¹⁵⁴.

Importante notar la afirmación de que Galileo gradualmente elimina todas las influencias del ambiente que podrían afectar el resultado. Esto permite apreciar una analogía con la reducción en los experimentos físicos: el experimento mental también está limitado por la capacidad del instrumento. Mientras que en el físico será un artefacto, en el mental es el intelecto. En este punto cabe adelantar la ampliación de capacidades que puede suponer el uso de la tecnología para abarcar más aspectos de un planteamiento experimental.

Ahora bien, como señala Mäki, el aislamiento es al experimento mental lo que la reducción y limitación de variables supone para el físico:

en analogía con el procedimiento experimental, tales suposiciones idealizantes en muchos contextos sirven el ulterior propósito estratégico del aislamiento teórico. Al neutralizar otras causas y condiciones subsidiarias, ayudan a aislar una causa mayor y su manera característica de operación¹⁵⁵.

Y más aun, sale al paso de la réplica con la continuación de su argumento de un modo elocuente y contundente:

154 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 149.

155 Uskali Mäki, "Models and the locus of their truth", *Synthese* 180, núm. 1 (mayo de 2011): 51, <https://doi.org/10.1007/s11229-009-9566-0>.

[acerca de las suposiciones] son falsedades deliberadas que se movilizan y manipulan estratégicamente. Son instancias de suposiciones idealizantes utilizadas en la modelación, en donde la falsedad deliberada y estratégica es su rasgo característico. La pregunta a hacerse es: ¿para qué? ¿Qué función pueden servir? La respuesta es: la función de las falsedades es aislamiento por idealización (Mäki 1992, 1994). Las suposiciones idealizantes (...) tienen la función de neutralizar un número de factores causalmente relevantes al despojarlos de su eficacia¹⁵⁶.

Cuando entra en juego la simulación informática, si bien muchas veces la reducción es deseable o necesaria, existen también casos en que el nivel de precisión deseado es radicalmente realista y, por ello, lo que se busca es lo contrario: que el modelo contenga todas las variables y parámetros, todas las condiciones y reglas que sean posibles incluso muy por encima de lo que sería razonable utilizar para cualquier otra modalidad experimental. Precisamente el uso de la inteligencia artificial —acumulación inmensa de casos particulares manipulada por algoritmos complejos de mucha eficiencia— permite transitar en el sentido opuesto a la reducción.

2.4.1.3. Narrativa y audiencia objetivo

Puesto que ya adscribí la exposición de este rasgo tan fundamental en su epígrafe propio (pg. 91) me circunscribo ahora a una consideración posterior. Cuando un experimento no-físico se llevará a cabo informáticamente existe una posibilidad nueva y más amplia respecto al mental: la narrativa que describe un experimento mental ha de ser imaginable y, por tanto, susceptible de ser retenida en su totalidad en la memoria del experimentador. La reducción usada en su especificación debe simplificar a ese grado.

Precisamente una de las cualidades que se encuentran en el mundo de la simulación informática es la capacidad de manejar

156 Mäki, 51.

innumerables (no infinitas, pero sí tantas como para aparentarlo) variables y parámetros sin perder rastro de ellas: la necesidad de reducción está dada por el poder del equipo informático y el tiempo de ejecución disponible o esperado, pero con suficiente capacidad puede incluso llegarse a determinar una descripción informática sin reducción de parámetros conocidos. Si bien, la computadora —como todo instrumento material— es finito, limitado, la realidad es que la cantidad de variables, parámetros y relaciones que maneja resulta virtualmente imposible de seguir a la mente humana. El intelecto quizá entienda el planteamiento de lo que sucede (más adelante hablaré de la opacidad) pero esa comprensión general de la metodología no lo faculta para replicar sin ayuda tecnológica el mismo procedimiento.

Cuando se detalla un experimento para uno mismo, para una audiencia a ilustrar, o para ejecutar informáticamente, la narrativa debe estar adecuadamente construida. Viene al caso la clave que Mäki aporta cuando habla de los modelos. Desarrolla una simbología mediante la cual distingue agente, objeto, sistema, propósito y finalmente, audiencia. Quiero resaltar este último componente de su clave de representación. Señala en su exposición, que presento un poco modificada, que “el agente A usa el objeto M (modelo) como representativo del sistema objetivo R para un propósito P, dirigido a una audiencia E (...) [y considera] la idea de audiencia como parte pragmática de la representación”¹⁵⁷.

Cuando un agente diseña un experimento estableciendo el objetivo y el modo como pretende lograrlo entre otras cosas considera la audiencia y de manera más o menos deliberada inclina el experimento para que esta audiencia constate el objetivo buscado. Es muy distinta la exposición, en atención a las audiencias buscadas, de los experimentos del gato de Schrödinger —para un público especializado—, del plano de Stevin —de alcance universal— y de la detección del EHT —para audiencias

157 Mäki, 55.

muy diversas, desde la divulgación no especializada hasta el procesamiento informático de alto nivel— y cada una de ellas requiere los elementos que aseguren el mayor grado de valor epistémico en el experimento.

2.4.1.4. Facilidad para la comprensión

Es muy dispar entre experimentos la facilidad para llegar a nuevos conocimientos; pero sin duda, como dice Brown¹⁵⁸, en el experimento mental es más posible que esta comprensión sea fácil. Esto se exagera en sentido opuesto si consideramos la complejidad inherente a muchos experimentos físicos modernos, como los ya mencionados LIGO y EHT y más aun en el caso de las simulaciones complejas o que involucran inteligencia artificial en donde la opacidad —concepto que señala el desconocimiento a detalle del mecanismo de toma de decisión que sucede en la ejecución de los algoritmos informáticos— juega un papel epistemológico relevante y cada vez¹⁵⁹ más¹⁶⁰ considerado¹⁶¹.

2.4.1.5. Imaginabilidad y capacidad de asombrar

Todo experimento precisa de una narrativa que lo describa. Esta adopta una forma protocolaria cuando se trata de un experimento físico y algorítmica estricta (programación) cuando se dirige a la simulación informática. Pero si lo que se busca es experimentar una hipótesis determinada en el laboratorio de la mente, para que esta pueda llevar a cabo su tarea de instrumento experimental ha de ser capaz de representarse la situación. En este tipo de ejercicio,

158 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 114.

159 Paul Humphreys, *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method* (Oxford, New York: Oxford University Press, 2007).

160 Wendy S. Parker, “Evidence and Knowledge from Computer Simulation”, *Erkenntnis* 87, núm. 4 (2022): 1535, <https://doi.org/10.1007/s10670-020-00260-1>.

161 Johannes Lenhard, “Thought Experiments and Simulation Experiments: Exploring Hypothetical Worlds”, 2016, 18, <http://philsci-archive.pitt.edu/12350/>.

“una característica primordial de todos los experimentos mentales es su imaginabilidad¹⁶² ”¹⁶³.

Se entiende que, así como existen instrumentos materiales más finos que otros, capaces de operaciones más sofisticadas, igualmente existen intelectos más hábiles y entrenados que pueden imaginar situaciones inalcanzables para el común de las personas, incluso de los científicos muy diestros en disciplinas que no sean la propia del experimento en cuestión.

La posibilidad de imaginar claramente el objeto experimental es casi una necesidad para modelarlo y llevarlo a una simulación informática. Por ejemplo, la posibilidad de estudiar los múltiples marcos inerciales de la relatividad especial, o las topologías multidimensionales de un universo cerrado¹⁶⁴, al exceder por mucho la experiencia habitual requieren de mentes imaginativas que puedan dar el paso de la representación mental a la modelación matemática.

Más aun, “lo que el experimento mental hace, sin embargo, es darnos esa sensación de ‘ajá’, ese sentido maravilloso de entender realmente qué está pasando”¹⁶⁵. Aunque esto claramente no es un

162 *Picturability*, en el original. La traducción como imaginabilidad no es del todo adecuada pero es la mejor que encontré. Es acertada en cuanto a la capacidad de plasmar en imágenes (*pictures*) una situación determinada, lo cual hace la narración susceptible de ser representada en la imaginación (*imagination*) del sujeto. Como se ve, en el inglés tenemos una mejor distinción con los términos *picture* referido a la reproducción gráfica de una realidad, e *imagination* que apunta al sentido interno capaz de representarla, desmaterializada pero singularizada, en la mente.

163 Brown, “Thought Experiments since SR”, 5.

164 Supone un ejercicio de la imaginación representar el concepto matemático de las dimensiones espaciales por encima de las tres presentes en nuestra existencia cotidiana. Así como un elemento bidimensional, como una hoja de papel, puede doblarse sobre la tercera dimensión y hacer un tubo, de la misma manera nuestro universo tridimensional puede doblarse sobre la cuarta dimensión y producir un efecto semejante (el objeto se llama hipertoroide, o una dona en cuatro dimensiones).

165 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 7.

rasgo exclusivo, sí es una cualidad que resalta en el experimento mental notablemente más que en el físico.

2.4.1.6. Estado o modo de la mente

Cuando se acomete un experimento físico, termina (no estrictamente, pero digámoslo así por ahora) el trabajo mental para pasar a la ejecución material, esperar el resultado e interpretarlo. En cambio, en el experimento mental la inteligencia se encuentra implicada en todo el desarrollo. Por eso es importante considerar el estado y cualidades de la mente, sus procesos cognitivos, sus posibilidades y alternativas durante el experimento.

Sirva como ilustración el descubrimiento de la “red del modo por omisión”¹⁶⁶ en que se encuentra la mente cuando no se piensa en nada. Un estado intensamente activo del cerebro durante el cual suceden una cantidad de operaciones que modifican y predisponen distintos modos de pensamiento. Es decir, del momento de un experimento mental a la repetición del mismo un tiempo después, el instrumento puede encontrarse en un estado distinto.

Cuando un experimento mental está muy estrictamente determinado en su narrativa la posibilidad de repetición es mayor; pero cuando apenas se está esbozando, cuando el experimentador está explorando planteamientos de diseño, el modo en que la mente se encuentra puede tener un efecto notable en el proceso. Haciendo una pregunta a manera de retruécano que no es una tautología y puede ilustrar esta cuestión, se podría decir: ¿en qué estabas pensando, cuando estabas pensando en eso? No es una pregunta ociosa pues como explica Moshe Bar, aquello a lo que no se le presta atención, aunque esté a la vista, no se percibe (el cerebro discrimina)¹⁶⁷.

¹⁶⁶ *Default mode network* o DMN.

¹⁶⁷ Bar, *Mindwandering*. C. 11.

Brown, al defender su postura de que el experimento mental no es meramente un argumento, resalta esta cualidad de la diversidad de procesos mentales en los que puede suceder un experimento mental:

aun si la reconstrucción de un experimento mental como un argumento explícito siempre es posible, la dificultad de encontrar uno y hacerlo explícito sugiere que los experimentadores mentales no están pasando por un proceso mental que está de algún modo estrechamente relacionado con un argumento¹⁶⁸.

El proceso mental, o el modo en que se encuentra la mente al diseñar, realizar e interpretar un experimento mental supone una condición intrínseca del mismo experimento.

Concluyo este punto diciendo algo evidente: el modo de la mente del investigador, al interpretar los resultados de un experimento, de cualquier tipo que sea, tienen una poderosa influencia sobre lo que se descubre en ellos, y no me refiero al sesgo de la confirmación sino a la calibración del intelecto investigador.

2.4.1.7. Rapidez de resultado

El experimento mental no está ceñido al paso del tiempo a la manera del físico, y lo mismo sucede con sus resultados. Esta referencia a rapidez no considera el tiempo de incubación ordinariamente necesario para provocar intuiciones sino a la inmediatez con que, ante las evidencias o elementos, puede venir el nuevo conocimiento.

2.4.1.8. Sujeto de la experiencia

Ampliando su argumentación precedente, Brown complementa y aclara:

Ya he señalado que ser 'visualizable' o 'imaginable' es una seña de identidad de cualquier experimento mental. Quizá

¹⁶⁸ Brown, *The Laboratory of the Mind*, 46.

‘sensorial’¹⁶⁹ sería un término más acertado. Después de todo, no hay razón por la cual un experimento mental no pueda ser sobre sonidos, sabores o aromas imaginados. Lo que es importante es que sea experimentable¹⁷⁰ de alguna u otra manera. Así como ser sensorial, los experimentos mentales son como los experimentos reales en tanto que algo ordinariamente es manipulado¹⁷¹.

Brown hace notar la analogía entre experimento físico y mental de manera explícita señalando que, aunque su uso sea distinto, la experiencia sensorial ha de estar en el origen de uno y otro tipo de experimento. En este punto considero necesario discrepar: si el experimento involucra la sensibilidad humana de modo inmediato, se encontrará sujeto a la cronología y la sucesión, con lo cual el experimento se torna en material. Un experimento, por ejemplo, sobre sensaciones del olfato puede ser muy breve en cuanto a la ejecución y más cargado en la interpretación pero sigue siendo un experimento material.

A riesgo de ser excesivamente obvio, todo experimento requiere de un sujeto que lo diseñe, ponga en marcha e interprete. Por ello la primera cualidad de todo experimento es la componente intelectual.

2.4.2. Con efecto relevante sobre la instrumentación

Agrupo aquí las cualidades que inciden de modo relevante, o describen aspectos de los instrumentos materiales, ya sean de medición, interacción o procesamiento externo no especializado. Son cruciales en la etapa de diseño pero al iniciar la ejecución de un experimento quedan más vivamente desligados de la mente humana, y esto es el factor de discriminación que me inclina a colocarlos aquí.

169 *Sensory*. La traducción es la más cercana posible.

170 *Experienceable*. Experimentable en el sentido de que puede ser sujeto de la experiencia, no de que se realiza un experimento como he venido usando la palabra en todo este documento.

171 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 17.

2.4.2.1. Componente física

Casi resulta ocioso señalar que una cualidad exclusiva del experimento físico es la componente eminentemente física del instrumento y de la ejecución. A esto se añade la implícita selección de variables controlables para las que el experimentador debe tomar provisiones de medición, lo cual implica que son mensurables. Es decir, la materialidad y la sensibilidad son cualidades que están presentes de manera ineludible en un experimento físico. ¿Significa eso que no lo están —no deben existir— en uno mental? Esta pregunta empieza a delimitar una frontera a considerar al trazar un mapa metodológico: si el experimento mental tiene como cualidad intrínseca y definitoria la ausencia completa de elementos materiales o sensibles.

Cabe señalar que la implicación física puede tener al menos tres posibilidades:

- 1) la del aparato experimental propiamente dicho,
- 2) la de los instrumentos de medición que no pretenden influir sino solo detectar,
- 3) y la que juega la capacidad de procesamiento de observaciones en donde las herramientas informáticas dominan el escenario.

Puede apreciarse que la interacción con la naturaleza es muy distinta en cada una de los tres, pasando de la interacción con el objetivo, a la observación sobre el objetivo, para culminar en la posibilidad de estar desprendido en el tiempo y en el espacio del objetivo.

La presencia de elementos físicos, por muy limitados que sean, cambiará algunas cualidades que parecen esenciales en el experimento mental, como la intemporalidad, rapidez de ejecución y de obtención de resultados, etc.

Lo ordinario del experimento mental no es una interacción con el mundo material; a pesar de que ordinariamente la tiene si consideramos su influencia sobre la mente del experimentador:

pero esto es una influencia sobre el instrumento, no sobre el objetivo.

El experimento mental, como cualquier otro trabajo de la mente, parte de datos de la experiencia por lo que *nunca* sería plausible considerar que no parte de elementos empíricos; en todo caso, puede decirse que no son de adquisición inmediata, en el tiempo o en el espacio.

2.4.2.2. Cronología o intemporalidad

Un experimento físico se encuentra estricta e irremisiblemente ligado al paso del tiempo. Esta es una variable que se considera, se planea en función de ella, se calcula, pero no se controla nunca. Es decir, se puede señalar el momento de inicio, el momento de terminación, la duración, pero nunca el ritmo de paso, la reversa, la suspensión.

Incluso tomando en cuenta la relatividad del tiempo que resulta de las altas velocidades y las altas energías la cuestión no es sencilla: parecería que el experimentador puede controlar en cierta medida el paso del tiempo cuando lo único que sucede es que, bajo ciertas condiciones, puede calcular la variación en su decurso, pero no puede hacer nada para modificarlo más allá de las ecuaciones de Einstein.

El tiempo como dimensión incontrolable es una cualidad indiscutiblemente única, intrínseca y definitoria de la materia. Puede incluirse en la simulación informática pero no solo no es determinante en un experimento mental sino que la mente tiene una particular dificultad cuando intenta manejar un reloj interno explícito: más bien salta de evento a evento, de causa a efecto, de raíz a consecuencia literalmente con la velocidad del pensamiento, sin pasar por etapas intermedias. La determinación de la velocidad del paso del tiempo en la realidad objetiva es un tema

de difícil estudio¹⁷², más aun cuando se considera despojada de la materialidad que le da una objetivación más patente.

La variabilidad del paso del tiempo en la mente no solo es una posibilidad sino, de hecho, casi una limitación por la dificultad de entablar una relación objetiva y estricta entre el tiempo de la mente y el del mundo físico.

Señala también Brown¹⁷³ como una de las características del experimento mental la de extenderse en el tiempo. Las percepciones que dan origen a un desarrollo mental no están circunscritas a un tiempo específico (el investigador pone el marco), lo mismo que el tiempo de desarrollo del experimento tampoco está ceñido a una cronología o duración rigurosas. La cronología, cualidad ineludible en el mundo físico dada la radical irreversibilidad del tiempo, no es una restricción en el mundo de la mente.

En el caso de un experimento puramente mental, se crea un universo con la capacidad de gobernar incluso sus leyes fundamentales: puede imaginar un tiempo que se detiene, que retrocede, que convierte lo sucedido en no-sucedido. Si esta manipulación se apega a la realidad natural puede resultar válida y con esto se expresa una potencia exclusiva del experimento mental.

2.4.2.3. Secuencia

Ceñido al tiempo, con un “antes” y un “después” indefectiblemente determinados, el experimento físico sigue una secuencia estricta. Puede ser cíclica, iterativa, lineal o como se haya diseñado, pero siempre sucede algo antes y otra cosa después. Algo que ya sucedió no puede ser eliminado; lo que no sucedió cuando se esperaba, puede ser replicado en otro momento pero el no-suceso siempre quedará como no-sucedido.

¹⁷² Bradford Skow, “On the Meaning of the Question ‘How Fast Does Time Pass?’”, *Philosophical Studies* 155, núm. 3 (2011): 325–44, <https://doi.org/10.1007/s11098-010-9575-3>.

¹⁷³ Brown, *The Laboratory of the Mind*, 12.

La simulación informática puede parecer libre tanto de esta cualidad como la de cronología, cuando el equipo es de mucha potencia; sin embargo esto es solo una apariencia: un procesamiento computacional siempre sucede de manera secuencial, incluso cuando existen procesos paralelos y simultáneos (*threading*), siempre sucede cada uno en una secuencia ineludible, aunque permite reversa, suspensión, iteración, siempre sucede algo antes y algo después. Cierto es que en la simulación informática es posible eliminar lo sucedido y — para fines de la simulación— continuar como si no hubiera sucedido y por tanto un evento deja de influir en el futuro.

2.4.2.4. Estado inicial propio

Un elemento de la descripción o de la narrativa es la determinación del estado inicial. Su modo de representación será distinto para el experimento físico y el mental, pudiendo el primero ser dominado por esquemas y fórmulas mientras que el segundo lo será eminentemente por la antes descrita narrativa.

Esto provocará que en el físico exista una expectativa de replicabilidad estricta mientras que en el segundo, al involucrarse el instrumento de la mente desde la misma comprensión del estado inicial establecido en la narrativa, pueden existir diferencias relevantes de replicabilidad por una diferencia en el pretendido estado inicial. El planteamiento inicial requiere dejar explícita la base teórica que no resulte más evidente, de acuerdo al público objetivo.

Las condiciones iniciales de una simulación informática son notablemente más flexibles y, de hecho, suponen una de sus fortalezas: la posibilidad de iterar el experimento, con el mismo modelo pero condiciones iniciales cambiantes para verificar la hipótesis de trabajo.

2.4.2.5. Origen en fenómenos reales

Un experimento físico necesariamente se apoya sobre fenómenos reales en el inicio, pues al tratarse de un procedimiento que busca interactuar con la naturaleza, nace de la realidad de la naturaleza.

En cambio, uno mental, si ha de obtener nuevo conocimiento sobre la naturaleza podría asumirse que también lo hace; sin embargo esto no es necesariamente cierto, o no lo es en todos los casos. El gato de Schrödinger es, nuevamente, un ejemplo: el fenómeno de descomposición atómica es real, pero el gato nunca estará vivo y muerto al mismo tiempo, lo cual no obsta para el desarrollo del experimento mental. Quizá una diferencia estriba en qué persigue el experimento: si es ilustrativo o demostrativo ordinariamente se puede pensar en una base de fenómenos reales; por el contrario si su objeto es negar una hipótesis o reducir al absurdo, puede manejarse con distintos grados de libertad al respecto.

La cuestión sería distinguir entre sustento teórico real y fenómeno real. El sustento teórico ha de apegarse a lo que sabemos para que la mente pueda funcionar, pero el fenómeno puede ser hipotético, infactible incluso, como la situación que presenta Newton en el experimento de las esferas cuando describe que el universo de pronto se ve despojado de toda su materia y lo único que queda son las esferas¹⁷⁴: eso no es un fenómeno real ni remotamente factible, sin embargo resulta viable para una elaboración mental.

Sorensen resalta que

nuestra compulsión inconsciente para remedar los patrones naturales asegura que 'las limaduras de hierro se dirigen al imán tanto en la imaginación como de hecho y que, cuando se arrojan al fuego, se calientan también en nuestro concepto'. Este 'conocimiento instintivo' aprovechado por

¹⁷⁴ Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, ed. William Thomson y Hugh Glasgow, 3ª (Londres: Guil. & Joh. Innys, Regiae Societatis Typographos, 1726), 11.

los experimentos mentales imita la realidad de manera inevitable¹⁷⁵.

Esta consideración es un complemento interesante y de valor pues no resulta extraño que los conocimientos “incomprendidos y no analizados” (siguiendo la misma cita de Sorensen que recoge la idea de Thomas J. McCormack) que toda persona posee por la experiencia cotidiana salten al razonamiento consciente cuando se reproduce en la mente una situación que los implica.

Esta cualidad de la mente que resalta Sorensen se encuentra ausente de modo radical en el uso tecnológico: puede afirmarse que todo conocimiento utilizado en una simulación es apriorístico en modo absoluto pues solo las reglas que expresamente se han admitido en la configuración entrarán en juego durante la simulación. Esto no significa —como veremos en el Cap. 3— que la simulación solo sea capaz de producir consecuencias lógicas ya contenidas en el planteamiento inicial.

2.4.2.6. Identidad

Para los experimentos físicos la identidad es casi un valor dado. Si la descripción, según los cánones de la disciplina de que se trate, se cumplimenta adecuadamente, un experimento puede considerarse el mismo en cualquier laboratorio o sitio donde se efectúe. En cambio, la identidad para un experimento mental reviste algunos retos.

Bokulich y Frappier cuestionan:

¿...qué ha de considerarse el mismo experimento mental [y no otro]? ¿Puede uno identificar condiciones de identidad para los experimentos mentales? ¿Qué tan similares necesitan ser dos narrativas para ser contadas como el mismo experimento mental? ¿Pueden dos pensadores realizar el mismo experimento mental y aun así llegar a conclusiones diferentes¹⁷⁶?

175 Sorensen, *Thought Experiments*, 17:51.

176 Bokulich y Frappier, “On the Identity of Thought Experiments”, 1.

Este apretado elenco de preguntas dejan clara la importancia de una narrativa clara, quizá con algunas reglas establecidas, para dejar inequívoca la identidad de un experimento mental respecto a otro. Estas consideraciones mueven a estudiar la unicidad y replicabilidad de los experimentos mentales.

Un factor potencial de diferencia en dos instancias del mismo experimento (con la misma narrativa) son las condiciones extrínsecas. La misma narrativa puede ser vista desde perspectivas distintas en dos contextos históricos o bajo dos situaciones externas diferentes. Un sesgo cultural dominante, el paradigma vigente, incluso la presión sobre el experimentador pueden ocasionar comprensiones, planteamientos y resultados dispares. Esto puede presentar dificultades para aceptar la identidad y, por tanto, la replicabilidad de un experimento mental. Si bien en los ámbitos de las ciencias naturales puede resultar más sencilla la identidad de un experimento mental, en los ámbitos humanísticos y sociales el efecto de las condiciones extrínsecas es mayor.

2.4.2.7. Replicabilidad

Tomando en cuenta la complejidad de la mente, incluso cuando la narrativa sea precisa, el estado inicial esté claro, y cualquier otra consideración descriptiva del experimento se lleve a su mayor determinación posible, la replicabilidad¹⁷⁷ no está asegurada. El instrumento que ejecuta el experimento, en el caso de la mente, por muy bien calibrado que esté no será igual en dos instancias de la ejecución. Contexto, historia, preparación, objetivos, etc. afectarán tanto en la comprensión inicial como en la interpretación final, y esto se da tanto en los físicos como en los mentales, con la diferencia de que en el físico el resultado puede ser replicable de modo objetivo, aunque la interpretación no lo sea.

¹⁷⁷ Cabe señalar que esta palabra, que no está en el diccionario de la RAE, asume un significado muy preciso y comprensible en el mundo de la ciencia experimental. Toma dicha precisión de la raíz “replicar”, que en una de sus acepciones indica “copiar algo exactamente”. La replicabilidad, por tanto, se entiende como algo susceptible de ser copiado exactamente.

Entre más abierto sea el planteamiento de un experimento mental, mayor la posibilidad de divergencia en las interpretaciones y por lo mismo también de amplitud en los resultados válidos y complementarios. Cabría añadir que aquí la discusión entre pares puede ayudar a la armonización de mentes mientras que el intercambio de ideas entre personas complementarias facilita apreciar las diferencias de comprensión y, por tanto, puede contribuir a mejorar la replicabilidad.

Como han señalado Hans Radder (1993) y Jutta Schickore (2011), sin embargo, se pueden significar cosas distintas al decir ‘replicar un experimento’, y estas han cambiado con el tiempo. Por ejemplo, uno puede hablar de replicar la ‘ejecución material’ de un experimento, replicándolo desde un determinado punto de vista, o replicar el resultado del experimento por medios teóricos o materiales diferentes (Radder 1993)¹⁷⁸.

La replicabilidad en una simulación informática prácticamente puede asumirse como garantizada, por la natural inflexibilidad de planteamiento en las condiciones iniciales; sin embargo en las simulaciones de alta precisión matemática afecta mucho la plataforma computacional por el número de decimales que maneje internamente y otras razones semejantes, que deben ser determinadas en el planteamiento de la simulación.

2.4.2.8. Rutas divergentes, resultados iguales

No es extraño, en el ámbito de las ciencias, alcanzar la misma conclusión usando rutas y bases teóricas distintas: supone una confirmación valiosa. Por ejemplo en el caso de la determinación de la edad del universo (la narrativa consistiría en resolver la pregunta sobre el tiempo transcurrido desde el *big bang* hasta la fecha), respuesta a la que se ha llegado por rutas muy distintas y convergentes en su resultado: por el modelo de expansión del universo (y la constante de Hubble); por la composición química

178 Bokulich y Frappier, “On the Identity of Thought Experiments”, 21.

de las estrellas más antiguas, presentes desde el inicio del cosmos; por la radiación cósmica de fondo.

Bokulich y Frappier lo señalan también: “Otro tipo de casos incluye experimentos mentales con la misma narrativa central y que llegan a las mismas conclusiones, pero lo hacen apelando a diferentes teorías y análisis. Un ejemplo de este tipo es el de los cohetes e hilo¹⁷⁹, discutido por Bokulich (2001)”¹⁸⁰.

2.4.3. Exclusivos del investigador

Todo experimento tiene su origen en la razón, es seguido por la mente, se valida por la inteligencia, se interpreta con el uso de la cognición, como ya he incoado antes (pg. 31) y ahora retomo para extender sus consecuencias.

El común denominador ineludible en toda acción de la ciencia experimental se encuentra en la inteligencia. Esta afirmación, por demás evidente, no es ociosa pues la tomo como base para el desarrollo de una hipótesis acerca de la unidad en el método experimental, que perfilaré en las páginas siguientes y detallaré en las conclusiones.

La riqueza actual en la investigación psicológico-cognitiva y neurofisiológica podrían aportar sustancia adicional a este trabajo, pero excedería el alcance que busco. Resulta enriquecedor, sin embargo, señalar que al hablar del instrumento con el que se experimenta se pone en juego todo el desarrollo y por tanto, el resultado de un experimento. La mente siempre será instrumental para un experimento: en el físico se usa eminentemente para el diseño e interpretación y de manera subsidiaria (salvo diseño que

179 Dos cohetes separados por 100 mts. y atados con un hilo de la misma longitud aceleran a $4/5$ de la velocidad de la luz. El hilo que los une ¿se rompe? No entro en detalles pero se trata de un experimento donde aspectos distintos de la teoría de la relatividad manifiestan que el hilo se rompería: un experimento predice la ruptura por contracción de Lorentz del hilo y otro por dilatación del espacio entre los cohetes. Son dos rutas distintas en su fundamento teórico que desarrollan la misma narrativa y obtienen el mismo resultado.

180 Bokulich y Frappier, “On the Identity of Thought Experiments”, 5.

lo exija de modo distinto) durante el curso del experimento; en el mental es, además, el único instrumento, el laboratorio en que sucede el experimento; cuando se realiza una operación informática es artífice del modelo y la formulación, codifica este modelo en el lenguaje adecuado y eso por no mencionar que es también la inteligencia el origen de la computadora misma. Y puede considerarse que, así como el biólogo usa el microscopio para ampliar su capacidad sensorial, el laboratorio de la mente tiene entre sus herramientas la ampliación tecnológica para extender sus posibilidades intelectuales.

2.4.3.1. Razón, percepción y medición en equilibrio

El papel de la razón en el conocimiento de la verdad por medio del método experimental no puede minusvalorarse ni debe exacerbarse: no una hipertrofia en el sentido del racionalismo de Parménides y Empédocles en detrimento de la experiencia, ni tampoco la atrofia que puede ocasionar el cientificismo y el positivismo que llevan a considerar como verdadero solo aquello que puede ser medido experimentalmente.

La mente y el cuerpo están intrínsecamente conectados, aun cuando el conocimiento experimental y las capacidades experienciales de los seres humanos no son plenamente mensurables. Es a través del movimiento creativo del ir y venir entre experiencia, reflexión sobre ella, observación experimental, consciencia reflexiva de dichos experimentos, y la cuidadosa aplicación de técnicas específicas sobre individuos y grupos, como surgen las posibilidades más prometedoras y peligrosas¹⁸¹.

Un experimento no puede desligarse nunca de la mente que le da origen, curso y término.

El diseño de un experimento mental, lo mismo que uno físico, se basa en asunciones, suposiciones construidas en la inteligencia con el conocimiento previo o la experiencia. Suposiciones que tantas

181 Connolly, "Experience & Experiment", 72.

veces no están en la realidad aunque sean conclusiones que provienen de ella, sino que están solo en la construcción intelectual del investigador cuando elabora un experimento. Y como el mismo Brown señala,

(Tesis I): la carga de cualquier experimento mental recae sobre el establecimiento (en la imaginación) de un fenómeno. Una vez que el fenómeno queda establecido, la inferencia a una teoría esta razonablemente libre de problemas; es decir, el salto de los datos a la teoría es relativamente pequeño¹⁸².

Un buen establecimiento del fenómeno inicial a analizar facilitará una conclusión útil.

El papel que la inteligencia juega es, por tanto, de crucial importancia y merece estudiarse un poco más en su operación para considerarla adecuadamente en el método experimental. Toco tan solo algunos puntos de mayor relevancia relacionados con el trabajo de la inteligencia en sentido amplio, es decir, de las operaciones del laboratorio de la mente, considerando también algunas facultades menos espirituales.

Para los empiristas más rigurosos, el único modo de conocer más acerca de la naturaleza es a través de nuevos datos empíricos pero esto me parece una postura que no se sostiene —como ya he argumentado en la pg. 84 y ss— pues llevaría implícita la afirmación de que toda la riqueza de conocimiento que un conjunto de datos puede ofrecer se agota con la ejecución del experimento inicial o subsecuentes relacionados.

2.4.3.2. Imaginación y memoria

Un experimento físico requiere imaginación en su diseño, pero no en su ejecución; durante la interpretación la imaginación incluso podría llegar a suponer un obstáculo al realizar inferencias factibles en esta facultad pero que no quedan respaldadas por los resultados experimentales.

182 Brown, "Thought Experiments since SR", 4.

En cambio uno mental exige de la imaginación a lo largo de todo su desarrollo. Al decir que requiere imaginación, se entiende esta facultad del alma prácticamente en todas sus acepciones tradicionales¹⁸³: como capacidad de representarse imágenes de cosas reales o ideales, como imagen formada por la fantasía (cuando la situaciones son infactibles), y como la facilidad para formar nuevas ideas y proyectos, especialmente durante el diseño y la narrativa.

Cuando el instrumento experimental es físico, el científico no requiere el ejercicio de la memoria en la ejecución de un experimento, aunque lógicamente juega un papel insustituible en la preparación y en la interpretación. En cambio, la memoria es parte integrante del instrumento en un experimento mental: un planteamiento inicial que no sea susceptible de ser retenido en la memoria —sea por deficiencia de la persona o por la complejidad intrínseca del mismo planteamiento— resultará en un desenlace insatisfactorio que no desentrañe las causalidades y relaciones que un ejercicio de este tipo puede poner de manifiesto.

La memoria es una de las facultades sobradamente engrandecidas cuando se utiliza un recurso informático: es posible llegar a cúmulos de información que la mente humana jamás sería capaz de retener o procesar, mucho menos relacionar.

2.4.3.3. Rigor lógico, abierto a la diversidad

La mente, presente en todo experimento, tiene sus propias reglas y modos de funcionamiento. Según el sujeto puede ser más o menos flexible, abierta a lo desconcertante o ceñida a lo conocido. No obstante, para que resulte un instrumento confiable ha de contar con sus propias reglas firmes sobre las que se rija de manera consistente, reglas que podemos identificar con el ámbito de la lógica.

183 Asociación de Academias de la Lengua Española, "ASALE-RAE Diccionario".
Voz: imaginar,

2.4.3.3.1. Pensar del modo habitual

Kuhn señala una cualidad que, al menos desde cierto punto de vista, equipara la metodología del experimento físico y el mental: “la situación imaginada debe permitir al científico emplear sus conceptos habituales de la manera como los ha empleado antes. Es decir, no deberá forzar el uso normal”¹⁸⁴.

¿A qué conceptos se refiere? Muchas cualidades que ya han aparecido saltan a la luz: buscamos la verdad, partimos de fenómenos que se dan en la realidad, queremos demostrar o falsear una hipótesis de trabajo y, por supuesto, la lógica y el cumplimiento de las leyes conocidas que suponen el sustento del experimento, han de considerarse sin excepciones. O bien, si se encuentra una discontinuidad lógica o repelente con la experiencia habitual, requerirá ser sustentada para rectificar el contenido teórico del experimento.

2.4.3.3.2. Cercanía con la realidad potencialmente detectable

En línea con este pensamiento, Brown afirma que

hay una estipulación frecuentemente asentada que habrá de ser abandonada. Se trata de la estipulación de que un buen experimento mental deberá, en todos los aspectos, acercarnos tanto como sea posible a lo que verdaderamente observaríamos¹⁸⁵.

¿Ofrece valor esta ruta o se asemeja a la realidad tanto de los experimentos como del proceso cognitivo del hombre? Es esencial que el científico se apoye en el sustento teórico, que pueda usar de la lógica y el discurso racional a la manera que la ciencia experimental y la filosofía han de seguir; en principio no puede el científico imaginar teorías y experimentar con base en ellas como si fueran verdaderas (en todo caso, como hipótesis a ser probadas). Sin embargo esto en el caso de un experimento mental o de una simulación informática, admite desviaciones; tal es el

184 Kuhn, “Essential Tension, Cap 10”, 265.

185 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 118.

caso de la introducción de una premisa falsa, identificada como tal, para modificar las condiciones de la simulación. Volveré a esto en el cap. 3, en concreto al hablar del ejemplo de la “viscosidad artificial” (pg. 145), aunque por ahora insistiré en este punto de apegamiento a la realidad puesto que la violación de un elemento del entramado teórico o empírico ocasionará una ruptura lógica con el desarrollo del experimento.

Abono esta idea con una frase un tanto lapidaria de Brown que, aunque refiere a los experimentos mentales filosóficos, es aplicable a cualquiera si se quiere obtener un resultado que aporte conocimiento sobre la naturaleza: “un experimento mental filosófico es legítimo siempre que no viole las leyes de la naturaleza (como se cree que son)”¹⁸⁶. Esta afirmación no nos ciñe a fenómenos observables sino a lo que sucedería si pudiéramos llevar a cabo una situación no real, apegándonos a las leyes de la naturaleza.

2.4.3.3. Detección indirecta, por cualidades y efectos

Constituiría una limitación si un experimento mental debiera apegarse a lo que puede verse. Existen realidades que, hasta donde sabemos hoy, nunca podrán ser vistas (pensemos altas energías o microfísica): es justamente una de las ventanas que el experimento mental abre al científico. Uno de los motivos para acudir a un experimento mental es, usando rectamente la mente, ir más allá de donde la realidad empírica / física / sensible / detectable puede llegar.

La pequeñez dimensional nunca ha sido obstáculo para la manipulación matemática de objetos reales y por ello también la creación de modelos simulados aptos para su tratamiento informático son el camino llano por donde transita una parte muy amplia de la investigación actual en la física subatómica. La flexibilidad de un experimento mental admite la posibilidad de considerar nuevos marcos teóricos intercambiados con la agilidad del pensamiento. Considero que no lo distancia irremisiblemente

¹⁸⁶ Brown, 29.

del método experimental pero sí lo acerca a la postura de Empédocles en donde todo fluye, incluyendo —en este caso— el mismo fundamento teórico que da pie a un experimento.

2.4.3.3.4. Lógica rigurosa y pensamiento flexible

Parece obligada, por tanto, la apelación a la lógica y al rigor intelectual pero dejando la mente abierta a la exploración. Algo parecido a lo que Bohr resume tan nítidamente en la cita con que se abre este trabajo: se requiere la lógica, pero eso no agota toda la riqueza del proceso de pensamiento. Se necesita un instrumento bien diseñado y elaborado para un experimento físico, una mente calibrada y diestra para uno mental, y el aprovechamiento de cuanto recurso la misma mente ha sido capaz de procurarse para llegar más allá de lo que sus potencias naturales le permitirían por sí solas.

2.4.3.3.5. Instrumentación material no específica

Cierro esta enumeración y este capítulo con una idea simple, que resulta evidente y se colige de lo dicho hasta ahora. Si queremos una reflexión más completa sobre el método de la ciencia experimental y consideramos que una de las características del experimento físico es la componente material o instrumental, y en el experimento mental es la ausencia de instrumento de intervención o detección, cabe ahora añadir un cuestionamiento: un experimento mental ¿debe carecer de instrumento físico en sentido absoluto, o puede apoyarse en un instrumento físico *no específico*?

Esta calificación la refiero por un motivo muy sencillo: la computadora es un instrumento físico de capacidades universales. Dependiendo del modelo que se diseñe (puede ser mental) y de la codificación que se introduzca (solo remota y casi esotéricamente material), el mismo instrumento puede desarrollar infinitud de experimentos diferentes. Estos experimentos, con la peculiaridad señalada respecto a su instrumento, ¿son físicos o mentales?

Al concluir este capítulo resulta útil una recapitulación breve que permita tener a la vista los pasos seguidos hasta aquí. En el primer capítulo recorrimos un itinerario que nos introduce a la vida del hombre en su relación con el mundo y los modos de adquisición de conocimiento, a través de los experimentos físicos y la elaboración mental que de ellos se desprende.

En este segundo capítulo, situándonos en la experiencia inmediata de la realidad física, nos hemos elevado por encima de ella gracias al poder del intelecto, explorando el laboratorio de la mente y los experimentos que suceden solo en ese ambiente de distintas características pero no por eso menos experimental.

Después, con esos dos fundamentos, he presentado una recopilación de las cualidades que podemos observar en todo experimento, señalando su presencia en los físicos, los mentales, o en ambos y clasificándolos según inciden en el sujeto que investiga, en el objeto de estudio, o exclusivamente en la inteligencia que realiza todo y las disposiciones y hábitos que afectan al conocimiento.

Contamos ahora con dos escalones bien establecidos y un común denominador: la experiencia directa y los experimentos físicos extendidos por la instrumentación necesaria más allá de la capacidad corporal del investigador; el experimento en el laboratorio de la mente con la potencia y cualidades del más poderoso de todos los instrumentos materiales; y el común denominador del intelecto que siempre se encuentra presente, en toda parte de cualquier experimento.

Estas bases permiten ahora dar el último paso que explora la extensión de la mente mediante la simulación informática, así como hemos visto la extensión del cuerpo mediante la instrumentación. Para ello, es necesario introducirnos adecuadamente en la aclaración y determinación sobre qué es la simulación y cuáles son las bases sobre las que se apoya, para luego explorar su relación con el experimento mental y finalmente

la situación del conjunto en la metodología de la ciencia experimental, pregunta que da origen a toda esta investigación.

Antes de pasar al capítulo 3, de manera similar a como presenté en el capítulo 1, recojo una síntesis de los experimentos abordados — de manera extensa o solo pasajeramente— en este capítulo que ahora termina.

Experimento	Aportaciones
H. S. Leavitt en el observatorio de Harvard	*A la vista de la acumulación de información, mediante un proceso intuitivo y de identificación de patrones, emerge una teoría que no se desprende de modo directo de los datos mismos.
Mapa de anomalías gravitacionales en Marte	*Reutilización novedosa de datos aparentemente agotados para la obtención de nuevo conocimiento.
El cubo de Newton	*Narrativa consistente. *Atribución de conclusiones que el autor no explicita. *El problema de la replicabilidad.
Galileo y los cuerpos en caída libre	*Narrativa nueva que confronta una precedente. *Reducción al absurdo. *Destruye una conclusión a la vez que construye el sustituto. *Los fenómenos reales como punto de partida, a riesgo de que la argumentación completa carezca de credibilidad.
Ptolomeo, el Almagesto y el sistema geocéntrico	*Punto de partida falso, fenómeno inexistente en la realidad, que de cualquier manera es capaz de sustentar un sistema predictivo por aproximación: el valor de la falsificación, idealización y reducción, y los resultados válidos de manera fortuita sobre premisas falsas.
El plano de Stevin	*Fácil de imaginar. *Paradójico en su conclusión inmediata. *Aparente oposición de su resultado con una ley bien establecida: el movimiento perpetuo es imposible.
Principio de equivalencia de Einstein	*Remite la exposición narrativa de un fenómeno a la experiencia imaginable por el hombre común, facilitando la claridad y replicabilidad. *De ahí obtiene una conclusión que parece contundente e innegable, que al menos con la tecnología de su momento, es infactible de comprobar por experimento físico. *Generación de numerosas conclusiones, sustentadas matemáticamente, que se encuentran lejos de una posible comprobación empírica. *Exposición imaginable de fenómenos no observables, ajenos a la experiencia cotidiana.

Cap. 3: La mente y el recurso informático

El termómetro extiende la facultad del tacto, el telescopio la de la vista, el pistón es un crecimiento de la fuerza física corporal: los experimentos físicos alcanzan nuevas cotas epistémicas al extender las capacidades del investigador más allá de su potencia natural.

A continuación, con los fundamentos establecidos en los primeros dos capítulos, desarrollaré la hipótesis de que así como la instrumentación física extiende las posibilidades corporales sin dejar por ello de ser experimentos físicos, la informática extiende la potencia intelectual sin constituir tampoco una categoría epistémica distinta sino una extensión de lo anterior.

3.1. Preludio: nuevas posibilidades experimentales

A partir del siglo XX aparece un nuevo elemento que necesariamente debe incluirse en el elenco metodológico para las ciencias experimentales. Con el advenimiento de la capacidad de cómputo —desarrollada en sus fundamentos teóricos en el siglo XIX, ejecutada exitosamente en el XX y especialmente acelerada desde los años de la Segunda Guerra Mundial y hasta la fecha— se abre una puerta que amplía la posibilidad de experimentación sin intervención directa sobre el objetivo.

Tanto el experimento mental como la observación instrumental sin intervención y ahora la operación informática revisten peculiaridades que merecen ser consideradas si se desea encuadrar de modo más completo la riqueza metodológica disponible a las ciencias experimentales. En este capítulo abordaré con mayor profundidad la simulación informática como instrumento para la experimentación científica. Para llegar a ello es necesario recorrer las bases que permitan comprender mejor su naturaleza y potencial.

3.1.1. Extender los sentidos y la mente

El experimento comprende una intervención del investigador sobre un objetivo; en el experimento mental no se interviene en el objetivo; la observación instrumental actúa modificando — experimentando sobre— el detector ante la incapacidad o inconveniencia de intervenir directamente sobre el mundo. En todos los casos la mente diseña, ejecuta e interpreta la acción experimental y sus resultados.

¿Qué determina el límite de la mente cuando requiere de un instrumento para la detección o el procesamiento? En siglos pasados podría bastar el uso primordial de los sentidos naturales para “observar” en sentido amplio. Cuando crece la necesidad de precisión, profundidad, extensión temporal, condición extrema, los sentidos humanos son insuficientes y se recurre a básculas, termómetros, telescopios y microscopios, espectrógrafos, magnetómetros, y la lista es interminable: estos instrumentos no necesariamente —más bien casi nunca— intervienen modificando el objetivo observado¹⁸⁷ y desde su aparición se han considerado elementos intrínsecos de un experimento.

“Dadme un punto de apoyo y moveré el mundo”, afirmaba Arquímedes¹⁸⁸. Lo que en su momento supuso la palanca para la

187 Esta afirmación requiere dos anotaciones. Por un lado instrumentos como ciertos tipos de termómetro y el magnetómetro sí tienen una intervención directa sobre el objeto por la acción misma de la medición, mientras que otros como el telescopio no la tiene y el microscopio en la medida que requiere iluminar el objetivo y con ello lo afecta. Por otro lado, partiendo de la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, la mera presencia de un observador consciente provoca el colapso de la función de estado de una partícula y, por tanto, interviene en el mundo. Ambas consideraciones las descarto de este estudio: la primera por ser una intervención no intencional —aunque deba considerarse en un buen experimento— y por tanto no es resultado de la deliberación experimental; la segunda por referirse a realidades del mundo subatómico cuando la experiencia cotidiana del hombre orbita siempre en la dimensión macroscópica.

188 Alexandrini, *Mathematicae collectionis*. En principio aparece en el Lib. VIII pero no me ha sido posible identificar el punto preciso en la traducción latina. Considero que lo conocido de la frase y la claridad de la idea que pretendo

fuerza de los brazos, ahora la computadora lo supone para la capacidad intelectual: ni la palanca se mueve sola, ni la tecnología se instruye a sí misma¹⁸⁹, pero ambas ofrecen una extensión de las capacidades naturales que abren nuevas posibilidades al hombre.

Un instrumento de detección o medición faculta al investigador para llegar más allá de lo que su propio cuerpo lograría. Análogamente, una computadora busca extender la capacidad de retención, detección, procesamiento, relación y referencia más allá de los límites intelectuales naturales del investigador. ¿Existe una diferencia esencial entre la extensión de las capacidades sensitivas y las intelectivas mediante instrumentos externos? Indudablemente que sí, pero de cara a la comprensión del papel de la informática en la metodología experimental estamos hablando de ampliación de capacidades del investigador que es, siempre, quien en último término experimenta¹⁹⁰.

3.1.2. El experimento no-físico, no siempre carente de materia

Antes de pasar al estudio de la potencia informática en la experimentación científica quiero aclarar que en la redacción de las páginas precedentes ha sido notoria la oscilación en terminología con la que he buscado referirme al experimento físico, más tradicionalmente llamado empírico, o también señalado como el que sucede en la realidad, o bien experimento material. Todas estas maneras de aludir a él —salvo, en mi opinión, la de experimento empírico que además de pleonástico me parece impreciso— tienen su sentido y validez. Mi elección más frecuente, como se ha podido ver, ha sido la de experimento físico.

ejemplificar con ella no requieren más referencia.

189 Existen posiciones que sostienen la capacidad futura de la inteligencia artificial sobre su mismo diseño y programación. Esto, no obstante, siempre requiere un origen en la inteligencia humana que ha hecho la programación inicial.

190 Es muy debatible el tema de la inteligencia artificial como creativa para la generación de nuevas investigaciones desde su diseño hasta la interpretación de resultados: siempre está, al inicio y al final, un ser humano. No entraré en ese debate.

Esta consideración se aplica también a la manera de hablar sobre el experimento mental, en donde ese término me resulta muy limitante. Una terminología negativa dista mucho de ser la más acertada, pero no encuentro mejor manera de referirme al experimento mental que “experimento no-físico” en contraposición, o más propiamente, como reducción al físico; pero esto —como he explicado arriba— es también impropio pues el experimento mental no supone tan solo una reducción del físico sino también puede suponer una notable ampliación sobre este. No he usado el término “no-físico” por incómodo pero hasta ahora, cuando he hablado de experimento mental, precisamente me he referido a esa cualidad y sus consecuencias: la carencia completa de materialidad instrumental, de medición y de procesamiento. Ahora daré un paso nuevo en el que un experimento que no sucede con intervención sobre su objetivo — un experimento tradicional y claramente calificado de “no-físico” — puede sin embargo incluir elementos físicos.

3.1.3. De la hipótesis a la comprobación

El punto de entrada para abordar un experimento es el planteamiento: aunque puede suceder epistémicamente hablando, en una secuencia distinta —como cuando un hallazgo fortuito provoca una hipótesis de la que se desprenden preguntas que habrán de ser sustentadas por observación— ordinariamente el investigador realiza una observación que le ocasiona cuestionamientos, elabora una hipótesis y en seguida pasa diseñar el modo de comprobarla. Lo explícito de manera gráfica simple, para ilustrar con mayor facilidad la siguiente argumentación:

Observación → Preguntas → Hipótesis → Comprobación

En este último paso, de la hipótesis a la comprobación, hay un trecho largo que pasa por la representación del objeto de estudio y la elaboración de un modelo que sea capaz de comprobar la hipótesis. El modelo puede ser la realidad misma, interviniendo el

investigador de un modo particular y controlado, o una representación reductiva de esa realidad.

Por tanto, en las siguientes tres secciones reflexionaré sobre

1) la representación y el modelo, imprescindibles para recorrer el camino entre hipótesis y comprobación, antecedente necesario a

2) la simulación informática, para la cual conviene tocar algunas ideas acerca del lenguaje que facilita una gran parte de las representaciones y resulta requisito prácticamente ineludible en las simulaciones informáticas:

3) las matemáticas.

Esto que acabo de presentar en orden lógico lo desarrollaré ahora de manera cronológica en cuanto a su necesidad: matemáticas, representaciones y modelo, para terminar con la simulación.

3.2. Las matemáticas

Para este tema me apoyo de modo eminente en la brillante síntesis que ofrece Mortimer Adler en el *Syntopicon*¹⁹¹, un derivado muy rico de su colección sobre *Los grandes libros*. En la voz “matemáticas”, casi al inicio, Adler afirma que “el conocimiento matemático simboliza el poder de la mente humana para alzarse sobre los particulares sensibles y los eventos contingentes, a las relaciones universales y necesarias”¹⁹².

Ambos rasgos de su apreciación resultan enriquecedores: por un lado es necesario desmaterializar y abstraer para poder representar en la mente o en instrumentos informáticos y por otro resulta necesaria la elaboración intemporal de una situación real para comprenderla y estudiarla en cualquier momento de la historia. Por intemporalidad no me refiero solo a la posibilidad de estudiar hoy los hechos de ayer o predecir los de mañana, sino de

191 Mortimer Adler, *The Syntopicon: An Index to the Great Ideas*, 2nd ed, vol. II, 2 vols., Great Books of the Western World: A Chronology of the Great Authors (Chicago, USA: Encyclopaedia Britannica, 1990).

192 Adler, II:42.

privar una situación del mundo de su natural cronología para trabajar en secuencias que violan la realidad física: acelerando, frenando, retrocediendo o saltando en el tiempo.

3.2.1. Historia e ideas sobre las matemáticas

A lo largo de un recorrido por señalados pensadores resultan de interés particular algunos de los que Adler menciona, por ejemplo: “La ciencia de las matemáticas, —escribe Kant— presenta el ejemplo más brillante de como la razón puede acrecentar con éxito su dominio sin la ayuda de la experiencia”¹⁹³. Esta afirmación, además de hablar sobre las matemáticas, abona al argumento de la posibilidad de la mente para adquirir conocimiento sin necesidad de la experiencia directa.

Hume —señala Adler— asigna a las matemáticas un papel subordinado a la física cuando indica que “al ser combinada con la física, las matemáticas permanecen subordinadas o en el mejor de los casos como una ayuda en la formulación y descubrimiento de las leyes de la naturaleza”¹⁹⁴, selección de texto que no comparto del todo si bien solo porque yo no hablaría de un papel subordinado como si las matemáticas fueran inferiores a la física, sino de un papel instrumental en el que la física se comprende, activa y enriquece con las matemáticas. El mismo Hume señala que las matemáticas se encuentran en el ámbito de las ideas y la física en el de las acciones: son las ideas las que mueven las acciones pero sin las acciones, las ideas no realizan cambios en el mundo¹⁹⁵.

Resulta oportuna la afirmación de Brown: “La manera como las matemáticas se aplican a la ciencia no es en la forma de premisas adicionales añadidas a los primeros principios físicos, sino más

193 Adler, II:43.

194 Adler, II:45.

195 William Edward Morris y Charlotte R. Brown, “David Hume”, en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Summer 2022 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2022), <https://plato.stanford.edu/archives/sum2022/entries/hume/>.

bien como aportación de modelos”¹⁹⁶, o dicho de un modo con un fuerte matiz científicista, las matemáticas son el lenguaje de la realidad (material) y por tanto el idóneo para representarla, estudiarla y describir su funcionamiento. Es tal la imbricación entre representaciones y modelos de realidades físicas, y las matemáticas, que resulta de uso común la expresión de “modelo matemático” para describir comportamientos físicos, aunque definitivamente no es ese su único alcance.

“Galileo, Descartes y Newton tienden a hacer del análisis matemático una parte integral de la física. Como la estructura del mundo es matemática, así también la ciencia de la naturaleza debe ser matemática”¹⁹⁷, señala Adler. Considero que esto ilustra lo expuesto sobre los modelos y la simulación informática: el lenguaje más viable para representar la naturaleza para el uso de las ciencias es el de la matemática. Aclaro que esto es exclusivamente para el papel de las ciencias naturales y en aras de la experimentación, pues es bien sabido que el mundo admite muchos tipos de exposiciones, válidas en su ámbito y complementarias en la comprensión de la realidad. Simplemente por mencionar uno que dista mucho de la representación matemática del mundo: la descripción poética ofrece luces maravillosas para entender la realidad y resulta notablemente alejada del poder de las matemáticas.

Adler sigue con el testimonio de autores relevantes cuando señala que

Fourier va incluso más lejos. ‘El análisis matemático’ dice, es ‘tan extenso como la misma naturaleza.’ El análisis matemático tiene ‘relaciones necesarias con los fenómenos sensitivos.’ Para aprehender ‘las leyes de estos fenómenos,’ las matemáticas ‘los interpretan por medio del mismo lenguaje como para testificar la unidad y simplicidad del

196 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 76.

197 Adler, *The Syntopicon*, II:45.

plan del universo, y para hacer aun más evidente ese orden inmutable que preside todas las causas naturales'¹⁹⁸.

Resalta este texto de Fourier que el lenguaje más apto para representar la realidad física con objeto de manipularla experimentalmente, es la matemática a la que atribuye una cercanía a los fenómenos físicos y una extensión de alcance universal.

Finalmente, Adler concluye que “parece haber un acuerdo general en la tradición de los grandes libros respecto a que las verdades de las matemáticas son racionales más que empíricas; o, en el lenguaje de Kant y James, *a priori* más que *a posteriori*”¹⁹⁹. Resulta una idea de valor para nuestro estudio poder afirmar —en la tradición de los grandes pensadores de la historia— que las matemáticas son más racionales que empíricas, que el hombre ha llegado a profundos avances intelectuales sin la aportación inmediata de la experiencia en cada caso, aunque quizá —como resulta de experiencia— sea el contacto con la naturaleza el origen de todo discurso intelectual, pero no toda aportación intelectual proviene directamente de este contacto. Esto es así, como también indica Adler citando a James: “para James, como para Locke y Hume, las matemáticas son estrictamente una ciencia de las relaciones entre ideas, no de existencias reales”²⁰⁰. Ya antes señalé (pg. 67) precisamente este rasgo de la aportación intelectual no apoyada en la experiencia: la capacidad de la relación entre ideas ofrece la ruta a nuevos conocimientos.

3.2.2. El papel imprescindible de las matemáticas

Así, pueden verse algunas cualidades de las matemáticas que ayudarán a la comprensión del trabajo intelectual tanto en el laboratorio de la mente como en su ampliación mediante la simulación informática: su capacidad de abstraer; la oferta de un lenguaje común y necesario; la adecuación como representativo de

198 Adler, II:45.

199 Adler, II:45.

200 Adler, II:51.

la naturaleza; la posibilidad de enriquecimiento mediante las relaciones entre ideas; las verdades que presenta como fruto de la razón, no de la experiencia.

Brown, en continuidad con estas ideas, señala que “La epistemología de los experimentos mentales es similar a la epistemología de las matemáticas. Así como a veces percibimos entidades matemáticas abstractas, igualmente a veces percibimos universales abstractos”²⁰¹ y aunque me parece que la segunda parte de su afirmación no es del todo acertada, la primera resulta de utilidad pues si el sustrato tanto del experimento mental como de la simulación informática yace en las matemáticas, tenemos una conexión más que evidente entre ambos.

Por último, antes de entrar al ámbito de la modelación y finalmente en la simulación, considero útil abundar en una distinción que puede resultar baladí en un contexto de ciencias naturales pero al tratarse de una tesis que estudia un tema desde la perspectiva filosófica se podrá apreciar como una digresión necesaria. Me refiero a la diferencia entre solución y simulación, términos matemáticos no fáciles de definir pero comprensibles en el ámbito de la ciencia experimental y que ahora pretendo explicar de modo muy sucinto.

3.2.3. Solución analítica y simulación

Los problemas de la física, dentro de la variedad metodológica que ofrecen al científico, revisten al menos dos modos más generales para llegar a su término: la solución analítica o el uso de una ecuación para predecir un desenlace²⁰², como el caso de una fórmula que predice la velocidad a la que un objeto en caída llega al piso, partiendo de su altura y de la gravedad del planeta; y la simulación, que supone una representación, lo más detallada

²⁰¹ Brown, *The Laboratory of the Mind*, 107.

²⁰² Una solución es la introducción de valores en las variables de una ecuación, que ocasionan un valor verdadero en la ecuación. Como ejemplo básico se puede decir que la solución a la ecuación $x + 1 = 3$ se da cuando a x se le asigna el valor de 2.

posible, de lo que va a suceder en un momento determinado del futuro. Explicaré a continuación, apoyado en ejemplos, los trazos esenciales que permitan ver la naturaleza de una simulación en general para, en el siguiente epígrafe, entrar en el detalle de su uso y epistemología.

El trabajo de obtener los trazos orbitales de los objetos en el sistema solar, donde el “problema de los tres cuerpos”²⁰³ supone una barrera matemática que impide una solución analítica, obliga a la obtención de un posible resultado a través de la simulación. O la predicción del movimiento y comportamiento de un fluido turbulento en donde la cantidad de interacciones entre las partículas, todas relevantes para una predicción fiable, suponen un sistema de ecuaciones analíticamente insolubles. En términos generales, la interacción cuantiosa de partículas²⁰⁴ o de factores que hace excesivamente compleja o infactible la solución mediante ecuaciones requiere de la simulación.

Más adelante, en la sección 3.4, profundizaré en motivos ulteriores que pueden inclinar a un investigador al uso de la simulación, como podría ser la infactibilidad de obtener datos de primera mano y otros motivos. Por ahora me limito a señalar la diferencia metodológica, fundamentada en las matemáticas, que puede llevar a elegir la simulación en vez de la solución analítica.

3.2.3.1. Demanda de cómputo que excede la inteligencia

La simulación es un mecanismo de adquisición de conocimiento que requiere una cantidad ordinariamente relevante de cómputo matemático. Cuando el hombre quiso llegar a la Luna fue necesario hacer extensas simulaciones que trazaran el camino desde Cabo Cañaveral hasta el extremo sur-occidental del Mar de

203 Se trata de un clásico en la mecánica (“*the three body problem*”) que muestra la interacción entre tres o más objetos como podrían ser el Sol, la Tierra y la Luna; no abundo aquí más acerca de su complejidad.

204 Se entiende por “partícula” desde la subatómica hasta las estrellas: el límite no es el tamaño sino su capacidad de ser representada matemáticamente como una unidad puntual.

la Tranquilidad: no era factible la solución de una ecuación que arrojara el resultado final, sino que con el conocimiento del comportamiento de todos los elementos involucrados (la Tierra, la Luna, el cohete, la densidad de la atmósfera en cada estrato de altitud, la climatología, la radiación solar, etc.) se calcula dónde estará el cohete en un momento determinado; y a partir de ahí, dónde estará un segundo después; y así sucesivamente hasta llegar a su destino. El trazo será tanto más preciso cuanto más pequeño sea el tiempo entre un cálculo y otro. Se puede percibir aquí la enorme cantidad de cálculos requeridos para algo que hoy nos parece trivial.

Siguiendo una de las tres definiciones que ofrece Winsberg —por ahora, la primera y más sencilla— una simulación (informática) es “un algoritmo, ejecutado en una computadora, que usa métodos de paso-a-paso para explorar el comportamiento aproximado de un modelo matemático, ordinariamente porque el modelo contiene ecuaciones que no tienen una solución analítica”²⁰⁵.

3.2.3.2. De analógico a discreto

La simulación representa estados futuros de un sistema, mediante la discretización (paso a paso) de la realidad analógica (con un flujo continuo en el tiempo) y ofrece así una ruta de solución que, por un lado, sería imposible de obtener con otro procedimiento, y por otro la hace susceptible de codificarse en un algoritmo que puede ser operado informáticamente. Omito por ahora mayor profundización al respecto, como la que trabaja Saam en su artículo del 2017²⁰⁶ y que tendré oportunidad de aprovechar más adelante.

205 Eric Winsberg, “Computer Simulation and the Philosophy of Science”, *Philosophy Compass* 4, núm. 5 (septiembre de 2009): 1, <https://doi.org/10.1111/j.1747-9991.2009.00236.x>.

206 Nicole J. Saam, “What Is a Computer Simulation? A Review of a Passionate Debate”, *Journal for General Philosophy of Science* 48, núm. 2 (junio de 2017): 293–309, <https://doi.org/10.1007/s10838-016-9354-8>.

Con estas bases es oportuno ahora estudiar el uso de la inteligencia para mostrarse aspectos de la realidad en un modo que le permita efectuar operaciones fuera de la realidad misma y sin intervenir con ella de modo directo. El paso inmediato es a través de las representaciones y modelos.

3.3. Representaciones y modelos

En el cap. 2 al reflexionar acerca del experimento mental quedó implicado el modo de representar una realidad para elaborar con ella un experimento. En ese punto me referí más a la narrativa e imaginabilidad de la situación: un planteamiento que fuera suficientemente descriptivo de la situación de manera que su representación en la mente resultara factible en distintos experimentadores y que a su vez fuera viable de reproducirse consistentemente por personas con distintos contextos.

Ahora se hace necesario dar un paso más sistemático en la reducción de una realidad para ser trabajada fuera de la realidad misma: es necesario representarla, ya sea verbal, gráfica, física o matemáticamente para ser manipulada e intervenida sin contacto con el objetivo inicial. Este paso resultará de todo punto esencial al avanzar al papel de la simulación informática, cuyo punto de partida es la adecuada modelación del sistema objetivo.

3.3.1. Objeto y objetivo

Resulta el momento adecuado para asentar una terminología que he estado utilizando sin especificarla: siguiendo a Mäki, que realiza una detallada codificación de los elementos constitutivos de un modelo, a la que me he referido antes para hablar de la audiencia en un experimento mental (pg. 108), me limitaré a determinar los que ahora resultan más inmediatamente relevantes en las siguientes porciones de este estudio. Mäki utiliza el término “objeto” para referirse a la “representación” de la realidad

“objetivo”²⁰⁷ que ha reducido en un modelo²⁰⁸. Este binomio objeto-objetivo permitirá un relato más claro e inequívoco al hablar de modelos y de simulaciones.

3.3.2. Modelación

El modelo ha sido largamente usado en la historia no solo de la ciencia, sino de la cultura en general. El artista crea un modelo para orientar su trabajo; el arquitecto plasma en una maqueta la ilustración de lo que constituirá la obra terminada; el ingeniero genera el prototipo con muchas de las cualidades que tendrá el producto final; el químico crea un reactor a escala para estudiar el comportamiento de su diseño a nivel industrial.

Todos los anteriores son representaciones que tienen una componente física, reductiva del objetivo estudiado. En el laboratorio de la mente puede considerarse también la construcción de modelos, encogimientos de la realidad en las que se asientan suposiciones y se presentan reducciones que, finalmente, pretenden ser suficientemente representativas del objetivo de estudio y sus cualidades.

Pero ¿qué es un modelo?

La modelación juega un papel importante en la práctica científica. Sin embargo, no es sencillo dar una respuesta clara a la pregunta de qué es un modelo científico dado que entidades de muy amplia variedad pueden ser así consideradas. (Valeriano Iranzo)²⁰⁹.

207 Aclaro una dificultad en la traducción: Mäki y otros usan los términos *object* y *target* para significar con el primero el modelo mismo sobre el que se va a operar y con el segundo a la realidad objetiva que ese modelo representa. La traducción que he elegido para estos términos es la de “objeto” y “objetivo” pues la traducción literal de *target* sería “blanco” que me parece poco adecuada.

208 Mäki, “Models and locus”, 55.

209 Wenceslao J. Gonzalez, ed., *Bas van Fraassen’s Approach to Representation and Models in Science*, vol. 368, Synthese Library (Dordrecht: Springer Netherlands, 2014), 64, <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7838-2>.

Aglutinando distintas partes de las acepciones ofrecida por la Real Academia de la Lengua²¹⁰, diría que un modelo es una reducción de la realidad a partes analógicas, ordinariamente no coincidentes con el objetivo en estudio; puede ser físico, ideal, virtual, matemático. Se trata de una razonablemente libre y no académica definición que sirve como punto de partida para adentrarse en este esencial recurso de las ciencias experimentales.

3.3.3. Reducción e idealización

Representar una realidad física mediante otra reductiva, que puede ser material o no, significa necesariamente despojarla de parte de su verdad. Con acierto, Mäki señala que

Los científicos y filósofos en ejercicio sostienen dos visiones que en mi opinión deben evitarse. Ambas posiciones mantienen que el modelo 'solo es un modelo' y no se pretende como un candidato serio para la verdad. La primer idea de que los modelos no pueden ser verdad porque contienen mucha falsedad. Los modelos violan 'la totalidad de la verdad' en el sentido de que dejan fuera mucho y abarcan muy poco: los modelos aíslan. También violan el 'nada más que la verdad' dado que contienen suposiciones que distorsionan las propiedades de las cosas en el mundo: los modelos idealizan. Ambas ideas se unen en el pensamiento intuitivo de que el mundo es mucho más rico y complejo que cualquier modelo tan delgado y pulcro²¹¹.

Esta doble visión que Mäki critica legítimamente se opone a la naturaleza reductiva de la ciencia experimental y al mismo tiempo resalta la idealización de un modelo al establecer condiciones no existentes en la realidad pero que válidamente pueden simplificar la modelación (como la eliminación de la fricción o la exclusión del efecto relativístico en movimientos de baja velocidad). El papel de las suposiciones ideales puede servir el propósito de

²¹⁰ Asociación de Academias de la Lengua Española, "ASALE-RAE Diccionario".

Voz: modelo.

²¹¹ Mäki, 48.

aislamiento teórico: esto es una riqueza de la reducción en el método experimental que se traslada también a los modelos. Más aun, como señala Winsberg, la inclusión de supuestos deliberadamente falsos pueden ser la premisa necesaria que permita llegar a la verdad como el muy conocido y documentado caso de la viscosidad artificial en la dinámica de fluidos simulada mediante computadora, específicamente en los fluidos con ondas de choque²¹².

3.3.4. Falsificación

“La epistemología valora la verdad. A veces razones prácticas, prudenciales o políticas nos convencen de aceptar una falsedad conocida, pero la mayor parte de los epistemólogos niegan que pueda haber buenas razones cognitivas para hacerlo”²¹³.

Con esta polémica afirmación da inicio Elgin a su artículo “*True enough*” en el que argumenta justamente lo contrario. No está ni remotamente sola en la defensa de esta propuesta.

Winsberg otorga al término “falsificar” un sentido distinto al popperiano, el cual describe como

la práctica de incorporar en un modelo un supuesto que sabes que es falso, precisamente porque esperas que el añadido de este supuesto mejore la precisión predictiva o representativa de los resultados del modelo – es decir, los ‘datos’ producidos por la simulación representarán mejor el fenómeno que se está simulando. El contraste entre estos dos sentidos del término [falsificar] raya en lo irónico, pero no puedo pensar en un término mejor para sustituirlo²¹⁴.

Con esta re-significación acomete la tarea de argumentar el valor de la “falsificación” en un modelo, cualidad a la que ya me he

212 Eric Winsberg, “Models of Success versus the Success of Models: Reliability without Truth”, *Synthese* 152, núm. 1 (2006): 1–19.

213 Catherine Z. Elgin, “True Enough”, *Philosophical Issues* 14 (2004): 1.

214 Winsberg, “Models of Success versus the Success of Models: Reliability without Truth”, 2.

referido antes, de otro modo (pg. 118) al hablar del apoyo en fenómenos reales al experimentar. Como ejemplo simple explica que “hasta los mapas pueden ser usados para navegar con éxito a través de los territorios que muestran, pero omiten muchos detalles y distorsionan determinadas características”²¹⁵.

Esta idea va en consonancia con la de Mäki que se pregunta: ¿puede un modelo utilizar presupuestos no solo reductivos sino abiertamente falsos y aun así contener la verdad o dirigir al descubrimiento de nuevas verdades? Me adhiero a Mäki cuando señala que acepta “la idea más débil de que un modelo puede ser verdadero a pesar de supuestos falsos. También acepto —y argumento en este artículo— la idea más fuerte de que el modelo puede facultar a la captura de la verdad gracias a suposiciones falsas”²¹⁶.

Esto trae a la cabeza de nuevo el Almagesto y Ptolomeo que ya mencioné en la p. 97: suposiciones falsas que si bien no llevan a una verdad esencial sobre el funcionamiento del sistema solar, sí posibilitan una capacidad predictiva que acercó a la verdad durante 13 siglos. Cabe señalar la diferencia esencial, de que Ptolomeo creía poseer la verdad en los supuestos mientras que en el planteamiento de falsificación de Winsberg se introduce una premisa que se sabe falsa y aun así —incluso, a veces, por eso mismo— se utiliza.

Resulta grato el término que Elgin da al uso de la falsedad dentro del método de las ciencias experimentales, no solo como factible de ser usado sino como un recurso que incrementa el valor del experimento. En su artículo, de título difícilmente traducible sin deformar su sentido, señala que

los modelos efectivos son los que he llamado *felices falsedades*²¹⁷ (Elgin, 2017). Son (típicamente)

215 Winsberg, 9.

216 Mäki, 48.

217 Elgin les llama “*felicitous falsehoods*” que literalmente se traduce como lo he puesto, sin embargo considero que el uso del término *felicitous* le confiere una

representaciones *de* fenómenos; es decir, típicamente tienen objetivos. Pero deliberadamente desfiguran esos objetivos. Aun así algunos, no siendo propositivos tampoco son estrictamente falsos, los llamo falsedades porque desfiguran. Los llamo felices porque sus imprecisiones son epistémicamente fructíferas; no son defectos²¹⁸.

Desarrollando esta idea, Elgin señala que “para que un modelo sea epistémicamente efectivo (...) las imprecisiones en puntos no diferenciales no son problemáticas”²¹⁹. Como se ve, da un paso más allá de Winsberg quien solo ve la falsificación como un recurso en ocasiones imprescindible, para considerarlo una posibilidad grata, apta y que produce resultados.

Comentando a Elgin, Le Bihan señala que

una réplica perfecta y completa del sistema objetivo, una que comparte todas las características de ese sistema, sería —en muchos sentidos— cognitivamente inútil. Esto es así porque la réplica sería tan difícil de comprender como el sistema objetivo mismo²²⁰

y en ese caso podríamos preguntarnos, ¿para qué necesitamos un modelo? Le Bihan, en el cierre de su artículo, resume diciendo que el hecho de que “las falsedades pueden positivamente aportar al valor epistémico de las representaciones científicas es posiblemente la intuición más importante del trabajo de Elgin”²²¹,

tonalidad distinta a la expresión. Con base en el Diccionario de Oxford, además de “feliz”, la palabra significa “apto” y “bien elegido” añadiendo la acepción pragmática de que “produce buen resultado”. Me limito a usar “feliz” por sentido práctico pero me seduce el sentido más rico y preciso con que Elgin dota a su expresión al elegir esa palabra.

218 Catherine Z. Elgin, “Models as Felicitous Falsehoods”, *Principia: An International Journal of Epistemology* 26, núm. 1 (el 1 de junio de 2022): 11, <https://doi.org/10.5007/1808-1711.2022.e84576>.

219 Elgin, 12.

220 Soazig Le Bihan, “Partial Truth versus Felicitous Falsehoods”, *Synthese* 198, núm. 6 (junio de 2021): 5432, <https://doi.org/10.1007/s11229-019-02413-4>.

221 Le Bihan, 5435.

valoración quizá un poco dura pero de provecho al corroborar la riqueza de esa intuición (sea o no la más importante).

De este modo, respondo afirmativamente a la pregunta de Mäki, con las opiniones de Winsberg, Elgin, Strevens²²², Le Bihan y otros, que comparto plenamente. Un modelo no necesariamente presenta la verdad completa, o debe ser completamente verdadero, sino que “Los modelos se conectan con sus objetivos, no por la verdad sino por la similaridad. Los sistemas de modelos pueden ser similares a sus sistemas objetivo en distintos aspectos y grados”²²³. Como señala Iranzo “una seductora alternativa a la verdad es la similaridad. (Valeriano Iranzo)”²²⁴ y añado una clara conclusión de Elgin que explica:

la naturaleza es compleja. Presenta una gran variedad de patrones. Algunos de estos se encuentran, en su estado natural, ocultos por irrelevancias. Solo surgen bajo idealizaciones donde se apartan las complicaciones inconsecuentes. La comprensión científica involucra los modelos idealizados²²⁵.

No cabe duda de que esta afirmación, que se encuentra sólidamente sustentada, orienta con claridad hacia la importancia del experimento mental y la simulación, con sus reducciones, falsificaciones e idealizaciones, como una herramienta que debe estar en la caja de herramientas del científico sin conferirle un intrínseco valor epistémico inferior sino claramente complementario y, en ocasiones, insustituible.

222 Michael Strevens, *Depth: An Account of Scientific Explanation* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2011). No tuve oportunidad de consultar la fuente directa, solo por las citas de Elgin.

223 Mäki, “Models and locus”, 59.

224 Gonzalez, *Bas van Fraassen’s Approach to Representation and Models in Science*, 368:66.

225 Elgin, “Models as Felicitous Falsehoods”, 21.

3.3.5. Verdad y semejanza

La similitud entre objeto y objetivo es la que otorga valor epistemológico a un modelo y a una simulación. La afirmación precedente es sostenida por Winsberg y Parker, entre otros: “Weisberg se suma a filósofos tales como Cartwright (1983), Giere (1988), Telle (2001) y Godfrey-Smith (2006): los modelos científicos exitosos guardan relación de similaridad con sus objetivos del mundo real”²²⁶.

Obviamente no se trata de una similitud material indeterminada la que otorga valor pues, como ejemplifica Parker no carente de ironía, un camión de bomberos se parece a una manzana en que ambos son rojos y tridimensionales. Es necesario buscar la similitud en lo relevante y en el grado adecuado, considerar el alcance que se persigue con la simulación, el contexto en que se va a desarrollar, etc. cualidades muy similares a las desarrolladas para el experimento mental. No es una empresa sencilla pretender valorar de modo ponderado la similitud real entre objeto y objetivo, aunque Parker lo explora en el artículo citado (no lo copio para evitar un detalle excesivo).

Con la claridad y evidencia que la afirmación precedente puede evocar, el hecho es que de manera ordinaria no es posible adherirse plenamente a la verdad que ofrece una similitud lo más profunda posible. Un modelo no necesariamente es verdadero, de modo radical y absoluto, sino similar a la verdad, lo cual no es obstáculo para permitir llegar a la verdad no contenida previamente en él sino alcanzada por el desarrollo intelectual o informático operando sobre este modelo.

Resulta entonces muy clara la pregunta que Brown presenta al decir que “La cuestión final sigue siendo si ahora podemos hablar acerca de la verdad de los modelos o más modestamente solo acerca de la verdad en los modelos. La última es claramente

²²⁶ Wendy S. Parker, “Getting (Even More) Serious about Similarity”, *Biology & Philosophy* 30, núm. 2 (marzo de 2015): 1, <https://doi.org/10.1007/s10539-013-9406-y>.

menos problemática”²²⁷. Con lo dicho hasta aquí resalta la imposibilidad de afirmar que los modelos son verdaderos en general o por definición, más cuando definiendo —con apoyo en la historia y en la experiencia y pensamiento actuales— la introducción deliberada de felices (Elgin) falsificaciones (Winsberg) y tiene una intrínseca reducción de la realidad (Mäki).

Un experimento mental, lo mismo que un modelo, puede ser verdadero en sí mismo pero no es eso lo que interesa al científico, sino la verdad que de ese modelo —con independencia de sus condiciones de verdad, de toda la verdad, de solo la verdad, de reducción, idealización o aislamiento— pueda aportar al conocimiento de la verdad. Puede resultar una visión un tanto pragmática, pero cuando se utiliza un instrumento precisamente lo que busca es el servicio que ese instrumento puede prestarle y en ese sentido un experimento mental, lo mismo que un modelo, puede aportar a la verdad aun con supuestos limitados e idealizaciones.

Entresaco de un texto de Mäki otras cualidades de un modelo. En su atinada descripción de los elementos de un modelo señala que en él

se requiere incitar al surgimiento de verdaderos puntos de similitud — más que una similitud exitosa o carencia de similitud... La similitud exitosa no debe ser utópica... Para que surja un verdadero punto de similitud, la similitud exitosa debe caer a nuestro alcance, dentro del horizonte de nuestras posibilidades cognitivas²²⁸

pues bajo las premisas de falsificación e idealización, si la mente no fuera capaz de entender el modelo tampoco identificaría estas dos separaciones de la verdad alcanzadas solo por similitud con el objetivo y, por tanto, ponen en riesgo la validez de su interpretación de los resultados.

227 Mäki, “Models and locus”, 62.

228 Mäki, “Models and locus”, 56.

Un modelo o representación reductiva y analógica, así explicado, cubre algunas cualidades que ya quedaron reseñadas respecto al experimento mental: debe ser imaginable y fácil de comprender si se aplicará en un experimento mental; sin embargo estas cualidades no son iguales si habrá de trabajarse informáticamente: entonces lo que se requiere es que sea comprensible y codificable en un algoritmo susceptible de representación programática. La imaginabilidad queda sustituida por la capacidad de codificación y la facilidad de comprensión por la estructuración en un algoritmo, sin importar el nivel de complejidad.

Por tanto, el paso de la modelación a la simulación exige la posibilidad de establecer una narrativa de precisión formal y abstracta que admita la codificación de la realidad en un lenguaje preciso. Ese lenguaje son las matemáticas.

3.3.6. Lenguaje para la descripción de modelos

Un modelo que pretende representar un objetivo complejo requiere del lenguaje abstracto y poderoso que le ofrecen las matemáticas, sobre todo si habrá de utilizarse en una simulación. Para ello es conveniente hacer aun más explícita la vinculación entre la modelación destinada a la simulación y el uso de las matemáticas; o dicho de otro modo, en los desarrollos siguientes haré una confluencia cada vez más frecuente y explícita entre los modelos, su lenguaje de representación a través de las matemáticas y el uso de estos modelos así codificados en una simulación.

Antes de pasar a la simulación presento algunas consideraciones necesarias respecto al modelo. En continuidad con lo desarrollado en el cap. 2, ¿es el modelo —particularmente el modelo matemático— una forma de experimento mental o al menos, un antecedente necesario? A la luz de las reflexiones presentadas hasta ahora, me adhiero a la postura de Brown: el modelo matemático no es un tipo nuevo de experimento mental sino una aportación adicional a las ciencias y, por tanto, a los demás

instrumentos de la ciencia experimental, incluidos los experimentos mentales.

Al exponer las condiciones generales para un experimento (pg. 54), aplicables en buena medida al experimento mental, desarrollé implícitamente los requerimientos para un buen modelo puesto que en realidad todo experimento parte, de una u otra forma, de una representación que el experimentador se hace de la realidad. Como afirman Bokulich y Frappier citando a Nersessian:

los experimentos mentales son una forma de lo que ella llama razonamiento simulativo basado en modelos. En esta perspectiva, realizar un experimento mental es construir un modelo mental y después simular qué sucedería con ese modelo bajo distintas manipulaciones. (Nersessian 1993, p. 291)²²⁹.

Así como en el experimento físico o mental el correcto diseño y desarrollo dotarán al experimentador de mayor confianza sobre los resultados, igualmente en un modelo destinado a la simulación informática —y más cuando un experimento exige de modo inevitable dicha simulación— será tanto más confiable cuanto mejor hecho esté su diseño. O como lo dice Boge,

dada la dependencia de los experimentos en las SIs [CS o *Computer Simulations*, en el original, que traduzco como Simulaciones Informáticas o SIs], la dependencia de las SIs en las suposiciones de modelación, y la dependencia de los modelos en la selección de parámetros, investigaré la siguiente pregunta: ¿cómo pueden establecer los investigadores la confianza en sus resultados experimentales y qué nos dice esto acerca de los modelos utilizados²³⁰?

No pretendo seguir el itinerario de Boge sino que me pareció de interés el modo como plantea su pregunta pues es precisamente la

229 Bokulich y Frappier, "On the Identity of Thought Experiments", 14.

230 Florian J. Boge, "Why Trust a Simulation? Models, Parameters, and Robustness in Simulation-Infected Experiments", Preprint, 2021, 2, <http://philsci-archive.pitt.edu/19318/>.

capacidad de llegar a la verdad que nos ofrece un modo de profundizar un poco más en la epistemología del modelo y, ahora, de la simulación.

3.4. La simulación

Parker usa una muy corta descripción para caracterizar una simulación cuando señala que es “una secuencia de estados ordenada en el tiempo que sirve de representación de otra secuencia de estados ordenada en el tiempo”²³¹. Aun con su apariencia de tautología, se trata de una descripción que capta lo esencial en una simulación: la discretización de un objetivo continuo en una representación reductiva que reproduce algunas de sus cualidades significativas o en todo caso, las que el investigador ha seleccionado omitiendo otras que deliberadamente ha discriminado.

3.4.1. Analógica y discreta

Winsberg aborda el tema de la simulación estableciendo dos tipos o, más propiamente, una distinción relevante:

Es útil recordar que, al menos en una comprensión común de la noción de ‘simulación’, no todas las simulaciones son simulaciones informáticas. También hay una clase de técnicas para la investigación frecuentemente llamadas ‘simulaciones analógicas’²³².

La elección de Winsberg del término “analógico” tiene, en mi opinión, una doble faceta muy atinada: por un lado se refiere a la segunda acepción que la Real Academia de la Lengua atribuye a la palabra “analógico”²³³ cuando le asigna un significado en la naturaleza: “Que presenta información, especialmente una medida, mediante una magnitud física continua proporcional al valor de dicha información” y por otro a la primera acepción de la

²³¹ Parker, “Does Matter Really Matter?”, 486.

²³² Eric Winsberg, “A Tale of Two Methods”, *Synthese* 169, núm. 3 (2009): 576.

²³³ Asociación de Academias de la Lengua Española, “ASALE-RAE Diccionario”.
Voz: analógico.

palabra “analogía”²³⁴ en su uso más común en filosofía y lingüística: “Relación de semejanza entre cosas distintas”.

Ya presenté varios ejemplos de simulaciones analógicas al introducir los modelos en la pg. 143, ahora tan solo declaro la distinción: una simulación analógica es una “representación en miniatura” del objetivo de estudio. Caben aquí los prototipos incompletos, modelos reducidos, pruebas de concepto, etc. que tienen una existencia física, una similitud material y formal con la realidad que representan, pero no contienen toda la verdad sino que están reducidos e idealizados en más de un aspecto. En cambio, la simulación discreta es la informatización y, por tanto, discretización paso a paso de una realidad física continua.

3.4.2. La discretización de la realidad

Por un lado, un modelo debe presentar semejanza entre objeto y objetivo siendo esencialmente distintos; pero por otro —y quiero resaltar este aspecto— es una simulación que replica el aspecto continuo o analógico de la realidad. Por poner un ejemplo, la temperatura de un cuerpo es un dato analógico, sin solución de continuidad entre valores²³⁵, y podemos medirlo con un termómetro de mercurio que refleja exactamente el carácter analógico de la temperatura. Más si usamos un termómetro digital, que incluye una rudimentaria simulación informática, el resultado es discreto, en saltos o estados determinados por la programación del aparato.

Esto es una cualidad básica de la simulación informática: la necesidad de transformar la realidad analógica a un modelo discreto. Lo explica Lenhard cuando señala que

234 Asociación de Academias de la Lengua Española, “ASALE-RAE Diccionario”.
Voz: analogía.

235 Vale señalar que esta realidad provocó un interesante debate a finales del S. XIX cuando se planteó la continuidad de las frecuencias de radiación electromagnética emitidas por un objeto de cuerpo oscuro. No tocaré más que esta efímera mención del suceso que dio pie al desarrollo de la mecánica cuántica: la realidad no es, en muchos aspectos, absolutamente analógica sino cuántica, sucede en saltos o “cuantos”.

el paso de un modelo teórico a un modelo informático involucra una tarea constructiva separada, parcialmente autónoma. Esta tarea debe salvar la brecha entre el formalismo continuo de las matemáticas tradicionales donde las teorías se formulan, y las operaciones discretas que las máquinas digitales pueden desarrollar²³⁶.

Esta cualidad es, quizá, uno de esos ineludibles puntos que separan la realidad física, de naturaleza continua, de la informática, necesariamente discreta incluso formulada con ecuaciones continuas tal como resulta de la naturaleza de las matemáticas.

Cierro esta consideración con la contribución de Winsberg al respecto cuando señala que,

por tanto, lo que el simulacionista²³⁷ debe hacer es encontrar un remplazo para el modelo surgido de la teoría – una que consiste en un conjunto de ecuaciones que puede ser iterado numéricamente, usando métodos de paso a paso. Cuando un modelo teóricamente motivado es así ‘discretizado’ y convertido en un modelo de simulación, las ecuaciones diferenciales originales son transformadas en ecuaciones de diferencias y trabajadas en un algoritmo informatizable que puede correr en una computadora digital²³⁸.

Este modo de entender la simulación informática es consistente con su elección entre las tres maneras de concebir la simulación informática que él mismo ofrece: 1) como un algoritmo que aplica un método; 2) como un método que modela ecuaciones matemáticas analíticamente insolubles; 3) la consideración de separar ambos términos: simulación e informática²³⁹. Al igual que Winsberg, me inclino por la segunda explicación.

236 Lenhard, “Thought Experiments and Simulation Experiments”, 16.

237 El neologismo es de Winsberg: *simulationist*.

238 Winsberg, “Models of Success versus the Success of Models: Reliability without Truth”, 3.

239 Winsberg, “Computer Simulation and the Philosophy of Science”, 1.

3.4.3. Complemento, requisito o sustituto

La simulación discreta o informática, así comprendida, ¿puede suponer un sustituto de valor epistemológico relevante para un experimento? Esta pregunta excede el objetivo de este estudio particularmente porque no pretendo que la simulación sustituya nada sino más bien que la simulación ocupe su sitio complementario en la metodología de la ciencia experimental: en ocasiones como extensión o complemento, en otras como sustituto irremplazable, incluso a veces como alternativa más económica. Pero me alejo de la categorización unívoca de su valor epistemológico, aunque recorra un poco esa ruta para enriquecer los razonamientos.

Investigaremos esta cuestión analizando una simulación de la formación de H_2 en el espacio exterior. Encontramos que en este caso²⁴⁰ la simulación puede actuar como sustituto de un experimento, porque existe un respaldo teórico integral acerca del rango de fenómenos a los que el proceso investigado pertenece y porque cualquier suposición particular al modelo como, por ejemplo, la validez de las aproximaciones, puede justificarse. Si se cumplen estos requisitos entonces la validación empírica directa de este ‘experimento virtual’ puede ser prescindible²⁴¹.

Un punto a notar aquí es la manifestación del respaldo teórico necesario para que la simulación sea complemento (o sustituto) válido de un experimento físico. La simulación requiere de un modelo y ese modelo ha de guardar una similitud formal con los rasgos relevantes del objetivo, sin embargo no puede contenerlo todo (reducción) por lo que el trabajo de modelación ha de llevar a un objeto que abarque la verdad significativa y las falsificaciones —por reducción o por introducción de premisas que no son verdaderas— que aporten a la construcción de un modelo

²⁴⁰ La cursiva es mía, la uso para señalar lo que he copiado como contexto pero no es relevante y por eso no veo necesaria mayor explicación. Lo significativo es el resto de la cita.

²⁴¹ Arnold y Kästner, “Computer Simulation as Substitute for Experiment?”, 1.

susceptible de arrojar resultados verdaderos. Es lo que, de otro modo y refiriéndose a Mach, también expone Buzzoni: “Como dice Mach, el juego de la imaginación propiamente puede empezar solo cuando la experiencia física es suficientemente rica (1906, 187–88; 1926/1976, 136–37)”²⁴².

Arnold y Kästner traen a la luz otra consideración acerca de la simulación al señalar que

el proceso de diseñar o preparar la simulación también expone analogía con los experimentos. Mientras que en un experimento material, las técnicas de medición deben ser elegidas adecuadamente, en la simulación se deben elegir diversas aproximaciones adecuadamente²⁴³.

En el planteamiento esencial de la similitud entre el modelo usado en una simulación o un experimento mental, y su parecido con uno físico, dado que el modelo es reductivo e idealizado, resulta primordial elegir en qué ha de parecerse y en que pueden distinguirse el objeto y el objetivo. La simulación va así, progresivamente, iluminándose como un mecanismo de extensión que no es del todo diferente al experimento mental sino que más bien se parece a él no solo de modo analógico sino como añadido a las posibilidades de este.

Perovic y Franklin hacen una afirmación adicional sobre las simulaciones que comparto de manera contundente y me parece, por otro lado, del todo patente. Afirman que “en algunos campos, como la física de alta energía, las simulaciones [computacionales] son una parte esencial de los experimentos. Es de justicia decir que sin las simulaciones computacionales estos experimentos serían imposibles”²⁴⁴.

La simulación informática se añade así al universo de las herramientas de la ciencia experimental como una más, perfectamente relacionada con las demás. No hablan Perovic y

²⁴² Buzzoni, “Pierre Duhem and Ernst Mach on Thought Experiments”, 3.

²⁴³ Arnold y Kästner, “Computer Simulation as Substitute for Experiment?”, 19.

²⁴⁴ Perovic y Franklin, “Experiments in Physics”, 36.

Franklin tan solo de que puede usarse este recurso para necesidades determinadas, sino de la complementariedad que existe entre la simulación informática y un experimento físico. Nuevamente podemos hablar de EHT (pg. 41), cuya complejísima interpretación de las mediciones hubiera sido imposible sin las abundantes simulaciones usadas para validar el método y obtener los resultados.

3.4.4. Replicación informática

Arnold y Kästner hacen consideraciones que todos los que hemos realizado simulaciones computacionales conocemos de primera mano y que ya señalé antes (pg. 120):

como un experimento, la simulación puede replicarse. En el caso de una simulación computacional la replicación significa: reimplementar la misma simulación bajo condiciones diferentes como, por ejemplo, bajo un ambiente de sistema diferente, con estructuras y librerías de software diferentes pero funcionalmente equivalentes, con aproximaciones diferentes pero igualmente bien orientadas o con funciones diferentes que tienen confiabilidad comparable para el problema en cuestión²⁴⁵.

Por tanto, al igual que en un experimento físico y en uno mental, esta necesidad exige una serie de condiciones que determinen la identidad de un experimento, establezcan una narrativa, descripción, protocolo o algoritmo claro; que cuenten con un lenguaje común que trascienda la materialidad de un instrumento o las condiciones extrínsecas del experimento. De un lado, la simulación –para ser replicable– ha de guardar las condiciones de un experimento en el sentido tradicional; de otro, su novedad le permite llegar más allá de los límites de la intervención con la naturaleza circunscrita a la realidad material. ¿Es una modalidad superior a la otra, en sentido absoluto? ¿Se puede afirmar que el

245 Arnold y Kästner, "Computer Simulation as Substitute for Experiment?", 20.

valor epistémico es siempre distinto en el mismo sentido? Considero que no.

Nos encontramos, al igual que en la distinción entre experimento físico y mental, en una dificultad de contraste entre ideas: si se quiere distinguir absolutamente, con fronteras definidas, entre uno y otro, será muy difícil llegar a solución. De igual modo caracterizar la simulación informática *a se*, pretendiendo mantenerla desligada del método experimental completo, parecerá una tarea destinada al fracaso. Aunque sus métodos y operaciones no dejan lugar a dudas sobre su identidad, el papel que juega en la aportación al conocimiento del mundo resulta más difuso en sus bordes.

Sin duda es útil este trabajo de definición y delimitación incluso si no se pretende dibujar esa frontera. Aun así, considero posible hacer un esquema que ilustre de modo más flexible que mediante la oposición entre métodos —no es la postura de Winsberg pero sí la de otros— y opino que este no es un planteamiento acertado de solución. Arnold y Kästner no separan simulación y experimento cuando afirman —usando la misma terminología ofrecida por Mäki que vimos al exponer los modelos— que

por objeto nos referimos al ente sobre el que una simulación informática o un experimento operan. Por sistema objetivo significamos ese ente en la naturaleza sobre el que queremos aprender algo con una simulación o experimento. El objeto debe ser representativo del sistema objetivo de una u otra manera. En el caso de un experimento, sin embargo, el objeto también puede ser una instancia del mismo sistema objetivo, mientras que en la simulación el objeto siempre es una representación del sistema objetivo. Tanto las simulaciones como los experimentos corren en un ambiente controlado y ambos admiten intervenciones sobre el objeto [Parker, 2009, p. 487]²⁴⁶.

246 Arnold y Kästner, 4.

Esta similitud reportada por Parker²⁴⁷ y recogida por Arnold y Kästner nos sitúa en una puerta interesante: tras estudiar algunos rasgos de la simulación, en su confluencia con la informática, los modelos y las matemáticas, ahora exploraré la crítica epistemológica a este recurso intelectual en el mapa metodológico de la ciencia experimental.

3.5. Valoración epistemológica de la simulación informática

La simulación informática es un tema de reciente aparición en el mundo —podría decirse que despegaba hacia el final de la primera mitad del S. XX, específicamente al final de la Segunda Guerra Mundial en los ámbitos de la meteorología y la física nuclear²⁴⁸— y es de interés que no haya tardado mucho en pasar al dominio de la filosofía de la ciencia a pesar de tratarse de un área profundamente técnica. Se abre un mediterráneo para el conocimiento, como resaltaba Winsberg en 2010, pues “si mucha de la ciencia contemporánea indudablemente ha entrado en la era de la simulación informática, entonces la filosofía de la ciencia debería responder en consonancia. Y ciertamente queda mucho trabajo por hacer”²⁴⁹. Es indudable que se ha recorrido bastante trecho al menos en estos más de 10 años desde esa afirmación. Lo señala Saam cuando en 2017 resume los siguientes cuestionamientos, que copio completos por resultar un planteamiento muy orientador:

En la última década la filosofía de la simulación se ha desarrollado como una nueva rama de la filosofía de la ciencia. Relevantes cuestiones de la filosofía de la simulación han sido la epistemología y metodología de las simulaciones

247 Parker, “Does Matter Really Matter?”

248 Eric Winsberg, “Computer Simulations in Science”, en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta y Uri Nodelman, Winter 2022 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2022), <https://plato.stanford.edu/archives/win2022/entries/simulations-science/>.

249 Eric Winsberg, *Science in the Age of Computer Simulation* (Chicago; University of Chicago Press, 2010), 138, <https://doi.org/10.7208/9780226902050>.

informáticas. En particular, han surgido controversias acerca de tres preguntas:

1. ¿Son las simulaciones informáticas una actividad nueva *sui generis* lo cual significa que presentan nuevas cuestiones filosóficas?
2. ¿Dónde deben situarse las simulaciones informáticas en el ‘mapa metodológico habitual’ (Galison 1996: 120) – que distingue experimento de teoría (matemática)? Especialmente, ¿las simulaciones, en último término, califican como experimentos o como experimentos mentales?
3. ¿(Cómo) pueden las simulaciones informáticas producir conocimiento nuevo y explicar procesos del mundo real²⁵⁰?

Aunque no lo haré de un modo cronológico o sistemático, en este apartado final, previo a la recopilación de mis conclusiones, abordaré las tres preguntas. Están presentes de uno u otro modo en la mayor parte de la literatura disponible que, vale decirlo, no es tan abundante como en otras áreas de estudio por ser mucho más reciente.

La afirmación que realizan Corsi y Lupacchini, cuando señalan que

mediante la creación de ‘modelos de juguete’, es decir, modelos simplificados de teorías físicas complejas, no solo pueden las matemáticas preparar una base para probar teorías físicas, sino que las pruebas matemáticas pueden tornarse en más convincentes que los experimentos²⁵¹

es, en mi opinión, un tanto audaz, pero reviste interés por la dirección en la que apunta. ¿Sería válido llegar a una afirmación de esa magnitud?

²⁵⁰ Saam, “What Is a Computer Simulation?”, 3.

²⁵¹ Giovanna Corsi y Rossella Lupacchini, *Deduction, Computation, Experiment Exploring the Effectiveness of Proof*, 1st ed. 2008. (Berlin; Springer, 2008), <https://doi.org/10.1007/978-88-470-0784-0>. Prefacio.

3.5.1. La pretensión de una superioridad absoluta

Considero que la postura de Corsi y Lupacchini, si se toma un tanto descontextualizada del resto del artículo, como estoy haciendo ahora, carecería de la misma apertura de tantos otros artículos y opiniones: orienta a tomar postura en uno u otro campo, las pruebas matemáticas son (o no) más poderosas que los experimentos. Con la lectura de fuentes valiosas me convengo cada vez más de que en el tema que nos concierne se trata de una postura que resta, más que sumar a la verdadera comprensión de los métodos de la ciencia experimental. Existen ocasiones, circunstancias, situaciones concretas en las que la comprobación matemática es más poderosa que la experimentación, sin duda. Pero no en todas, no como afirmación global.

Por mencionar un ejemplo de la precedente afirmación, puede sencillamente considerarse la enormidad de eventos astronómicos y cosmológicos en donde la intervención física con el objetivo resulta inviable y la detección directa se aproxima también a ese umbral de imposibilidad. 100 años de desarrollos matemáticos indicaban al equipo de LIGO qué sería lo que detectarían al suceder la fusión de dos hoyos negros, al grado de que cuando realmente detectaron el primero la impresión de los investigadores fue que les habían filtrado una simulación en el detector, tan perfecta era la coincidencia²⁵².

Sin duda que el evento provocó emoción, alivio, excitación en toda la comunidad científica (y provocó la entrega de un Premio Nobel²⁵³), pero podría decirse que no hubo sorpresa pues ya sabían lo que detectarían: nadie tenía la menor duda de la precisión matemática del modelo de la relatividad general desarrollado por Einstein y plasmado en sus ecuaciones. Sin embargo resultaría aventurado, a la luz de ese ejemplo,

252 B. P. Abbott et al., "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", *Physical Review Letters* 116, núm. 6 (el 11 de febrero de 2016): 061102, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.

253 "All Nobel Prizes 2017", NobelPrize.org, consultado el 22 de marzo de 2023, <https://www.nobelprize.org/all-nobel-prizes-2017/>.

generalizar afirmando que las matemáticas son superiores a la experimentación en todos los casos como método para comprobar hipótesis, como se concluye de la sencilla operación de formulación de un pastel que sucede en la cocina del hogar.

El siguiente juicio de Winsberg pone de manifiesto la misma postura de extremos y resulta un buen modo de resumir mis personales puntos de vista, cuando señala que

hemos, en otras palabras, rechazado la demasiado conservadora intuición de que la simulación computacional no es sino la aburrida y directa aplicación de teoría. Pero también hemos evitado abrazar la intuición opuesta, excesivamente pomposa, de que la simulación es una forma radicalmente nueva de producción de conocimiento 'a la par' con la experimentación. De hecho, hemos visto que ubicar la simulación sobriamente 'en el mapa metodológico' no es un asunto simple²⁵⁴.

Este 'mapa metodológico' es justamente uno que de algún modo he procurado perfilar a lo largo de estas consideraciones y pretendo dibujar con mayor precisión en las conclusiones de este estudio. Un mapa en el que se pueda apreciar la congruencia y complementariedad de los instrumentos que he analizado en estas páginas.

Existen experimentos que son clara e indubitablemente físicos y otros que los son sin espacio de duda, mentales; también contamos con simulaciones informáticas basadas en modelos matemáticos puros y modelos analógicos que resultan prácticamente idénticos a sus objetivos materiales. Pero estas realidades no han de ceñirnos a buscar una caracterización absoluta que pretenda encasillar cada investigación o experiencia en una categoría absoluta.

254 Winsberg, *Science in the Age of Computer Simulation*, 136.

Como señala Saam²⁵⁵ refiriendo una fuente de 1996 que no he logrado obtener, Peter Galison parece ser el primero en hablar de la simulación informática como tema de interés para la filosofía de la ciencia y lo hace en el contexto de su inclusión en el mapa metodológico habitual que ya he citado antes, expresión que al parecer él mismo acuña. Lo cita Saam en su triple planteamiento antes recogido cuando señala que

Peter Galison fue el primero en abordar la cuestión clave de este discurso cuando pregunta: ¿Dónde deben localizarse las simulaciones informáticas en el ‘mapa metodológico habitual’ que distingue experimento de teoría (matemática)? (Galison 1996, 120)²⁵⁶.

Se entiende que haya resultado de interés a la filosofía de la ciencia enfocar el valor del experimento mental, la modelación matemática y la simulación informática: son tres recursos carentes de materia similar al objetivo de estudio e íntimamente ligados entre sí que existen en el elenco metodológico de la ciencia experimental. Ninguno de ellos parece absolutamente superior, sino más acertado para una aplicación concreta o, usando palabras de una tira cómica llena de sabiduría: nada sirve para todo, pero todo sirve para algo²⁵⁷.

Puede iluminarnos explorar una complementariedad más clara entre la simulación y el experimento para situarlos con provecho en un mapa metodológico. Ofrezco un ilustrativo texto de Winsberg:

lo que podríamos llamar la relación ontológica entre simulaciones y experimentos es algo complicada. ¿Es verdad que las simulaciones son, después de todo, una especie particular de experimento? He tratado de abogar en contra de esta aseveración, mientras que al mismo tiempo insisto en

255 Saam, “What Is a Computer Simulation?”, 1.

256 Saam, 1.

257 “Mafalda sitio oficial de Joaquín Salvador Lavado (Quino)”, Quino, consultado el 6 de enero de 2023, <https://www.quino.com.ar>.

que las diferencias entre simulación y experimento son más sutiles de lo que algunos de los críticos de la aseveración han sugerido. Más importante, he tratado de argumentar que debemos desconectar las cuestiones acerca de la identidad de las simulaciones y los experimentos, de las cuestiones sobre el poder epistémico de las simulaciones²⁵⁸.

3.5.2. El poder epistémico de la simulación

De un artículo ya varias veces citado recojo una cita que abona a la postura precedente:

las simulaciones tanto como los experimentos nos permiten aprender algo nuevo y potencialmente sorprendente acerca de su objeto y, si ese objeto es verdaderamente representativo del sistema objetivo, también acerca del sistema objetivo en sí mismo²⁵⁹.

Siguiendo a los mismos autores, quiero situar una línea fuerte que marcan respecto a la capacidad de aportación de la simulación. Si bien no buscaré tanto determinar la identidad de las simulaciones, este tipo de consideraciones contribuye a clarificar su poder epistemológico.

... [existen] al menos tres diferencias fundamentales entre simulaciones y experimentos que son altamente relevantes para el estatus epistémico de cualquiera de las categorías.

Primero que nada, los experimentos pueden aportarnos datos empíricos nuevos, las simulaciones informáticas no²⁶⁰. Mientras que es verdad que las simulaciones informáticas entregan resultados que pueden no ser conocidos o esperados de antemano por nosotros, las simulaciones computacionales, por su misma naturaleza, solo pueden

258 Winsberg, *Science in the Age of Computer Simulation*, 137.

259 Arnold y Kästner, "Computer Simulation as Substitute for Experiment?", 5.

260 Cabe decir que esta contundente afirmación, como señalaré en breve, no es tan clara o sólida como darían a pensar los autores o, cuando menos, admite importantes matices.

producir resultados que están implicados en las premisas sobre las que se construye la simulación. Es importante aquí comprender la diferencia entre

- a) las cosas que no están lógicamente implicadas en nuestro conocimiento previo,
- b) las cosas que están lógicamente implicadas en nuestro conocimiento previo pero desconocidas a nosotros y
- c) las cosas que están lógicamente implicadas en nuestro conocimiento previo y también son conocidas por nosotros.

Para la categoría a), las simulaciones no pueden ayudarnos; solo los experimentos pueden ayudar. Para la categoría b), las simulaciones y los experimentos pueden ayudarnos. Y para la categoría c), no se requiere ninguna de las dos, pues ya sabemos. Otro modo de ponerlo sería decir que las simulaciones solo pueden aportarnos resultados que caen en el ámbito deductivo de nuestro conocimiento precedente²⁶¹.

Razonamiento interesante que enriquece la idea de que no se generan nuevos datos sino nuevas conclusiones. Pero es justo eso lo intrigante: la re-interpretación, re-procesamiento, re-esquematización de datos pre-existentes es capaz de producir nuevo conocimiento aunque esté ya lógicamente contenido en los datos originales, pero si no se hubiera trabajado de modo distinto careceríamos de ese nuevo conocimiento. Este aspecto de la experimentación en la mente lo traté ya desde un aspecto en la pg. 84 y ahora me extiendo un poco más, construyendo el argumento.

Estamos ante la misma idea de que resulta poco sensato afirmar que con una sola pasada a los datos empíricos se puede obtener todo lo que tienen que aportar y no solo admiten sino que exigen nuevos experimentos, simulaciones, etc. que desentrañen todo su contenido. Y la simulación tanto como el experimento mental, para esto, es un recurso favorable.

261 Arnold y Kästner, "Computer Simulation as Substitute for Experiment?", 5.

A pesar de la argumentación y citas que hasta ahora he ofrecido, la experiencia actual muestra que una simulación muy completa y rica, que incluya todos los factores relevantes, es susceptible de aportar nuevos datos sobre la naturaleza aun sin una observación física directa. Menciono, tan solo por referir uno de los géneros más patentes y cada vez más usados en la actualidad, de los gemelos digitales²⁶² en los que más que simulaciones, se les suele definir como modelos virtuales.

Introducidos por la NASA en 2012²⁶³, la técnica de simulación por gemelos virtuales es descrita en su presentación original como “una simulación probabilística integrada multi-física, multi-escala de un vehículo o sistema que utiliza los mejores modelos físicos disponibles, actualización de sensores, historia de la flota, etc. para reflejar la vida de su gemelo en vuelo”²⁶⁴.

Una de las muchas diferencias relevantes entre una simulación *simpliciter* y un gemelo digital, es que el segundo se puede beneficiar de un emparejamiento cronológico con el sistema objetivo que se estudia: simula virtualmente lo que sucede realmente, en sincronía. No me extiendo más y lo presento solo como matiz a la contundente afirmación de Arnold y Kästner respecto a la incapacidad de las simulaciones de aportar nuevos datos, aunque también sería necesario entrar con mayor profundidad a la descripción epistemológica del gemelo virtual: podría argüirse que se trata de un tipo sofisticado de observación directa combinada con simulación informática regida por el entramado teórico detallado del sistema objetivo y que, por tanto representa lo que ya está contenido en el modelo virtual. La

262 “What Is a Digital Twin? | IBM”, consultado el 27 de mayo de 2023, <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>.

263 Emilia Cioroica, Thomas Kuhn, y Dimitar Dimitrov, “Supporting the Creation of Digital Twins for CESs”, en *Model-Based Engineering of Collaborative Embedded Systems* (Springer, Cham, 2021), 285, https://doi.org/10.1007/978-3-030-62136-0_14.

264 Mike Schafto et al., *Modeling, Simulation, Information technology & Processing Roadmap*, Technology Area 11 (National Aeronautics and Space Administration, 2012), 7, www.nasa.gov.

misma descripción original de la NASA señala la “actualización de sensores” implicando una adquisición de datos empíricos directos que separan esta técnica de un experimento puramente mental o una simulación informática desconectada de la realidad física. Resulta patente en la poca literatura analizada al respecto (por ejemplo, en la revista *Nature*²⁶⁵) que la misma técnica aun carece de una definición más clara y, por tanto, su fiabilidad —aunque creciente— aun está inmadura.

Por cerrar esta breve digresión diría que un gemelo virtual es, en muchos aspectos, como una simulación analógica (pg. 154) llevada a un grado supremo de similitud material y con conexión en tiempo real con el objetivo de estudio. Pero expreso mi convicción de que esta modalidad merece atención por sí misma pues ofrece rasgos de una riqueza tal que invita a un estudio epistemológico más profundo.

Ahora bien, regresando a la afirmación de Arnold y Kästner, que una verdad esté lógicamente contenida en las premisas de una simulación informática puede ser una afirmación sugerente —la informática, hasta ahora y posiblemente así será siempre, carece de creatividad— pero muy estricta en el sentido de que la capacidad de cómputo puede elucidar relaciones no conocidas, provocar intuiciones no consideradas, arrojar resultados inimaginados. ¿Están lógicamente contenidos en el conocimiento que da origen a un modelo? Resultaría muy difícil negarlo pero al mismo tiempo parece ingenuo afirmar que lo que una computadora arroja es algo que de algún modo ya se sabía, aunque fuera potencialmente.

Lo que hace la simulación es extender la capacidad intelectual con una potencia que excede su fuerza natural a sitios donde, sin esa ayuda, la mente *nunca* llegaría. Me valgo nuevamente de la analogía de la palanca: la fuerza es del hombre pero sin la palanca sería de todo punto incapaz de mover los objetos que con ella

265 Fei Tao y Qinglin Qi, “Make More Digital Twins”, *Nature* 573, núm. 7775 (septiembre de 2019): 490–91, <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>.

puede. ¿Tiene sentido afirmar que la conclusión está contenida en el conocimiento previo de una simulación, si el hombre es absolutamente incapaz de educirla si careciera de la simulación? Casi parece tanto como decir que las propiedades del agua están en el oxígeno —violentemente corrosivo— y el hidrógeno —altamente explosivo— que la componen: no es así, sino que está en su combinación equilibrada.

Siguiendo el mismo razonamiento, es legítimo preguntarse, con Roush, “¿qué importancia tiene que estos experimentos tengan un valor epistémico superior si de cualquier manera no es posible o ético hacerlos?”²⁶⁶ Es decir, se puede debatir la mayor validez o atractivo de un experimento físico contra una simulación por su intervención con la realidad objetivo. Pero cuando el experimento físico resulta inviable, ya no es comparable el valor epistémico de una simulación —supuestamente inferior— contra un experimento inexistente.

Existen, por tanto, argumentos a favor de la superioridad epistemológica de los distintos métodos, cada uno con perspectiva distinta, pero desde un punto de vista pragmático científicamente (en el sentido de llegar al conocimiento de la verdad) me adhiero a la siguiente afirmación que señala que “hay también casos prácticos en los que las simulaciones tienen un alcance epistémico más allá de los experimentos. Sin embargo, en este caso las limitaciones del método experimental son más bien cuestión de restricciones prácticas”²⁶⁷. Cuando el experimento es inviable, por las muy variadas razones que pueden presentarse, entonces un experimento mental o una simulación son el único cauce para probar una hipótesis y su valor epistémico superior viene, por lo menos, del mismo hecho de que es viable mientras que el experimento físico no lo es. La diferencia es enorme, infinita: la que existe entre el ser y el no ser de un experimento determinado.

266 Sherrilyn Roush, “The Epistemic Superiority of Experiment to Simulation”, 2015, 10, <https://doi.org/10.1/Epistemic%20superiority%20of%20experiment%20to%20simulation%20-%202015%20-%20Synthese.pdf>.

267 Arnold y Kästner, “Computer Simulation as Substitute for Experiment?”, 7.

Incluso quiero llegar más allá: un experimento *nunca* es solamente el objetivo en sí mismo, como si se diseñara y ejecutara, y mucho menos se interpretara a sí mismo. Todo experimento consta de objeto, objetivo e investigador. En todo experimento la mente humana está presente y así como una re-calibración de detectores puede modificar el resultado de una observación, una re-organización de datos precedentes puede alterar la captación —la intuición— de la mente del investigador, como ya he argumentado en el Cap. 2.

Roush lo dice de modo claro: “el hecho de que la información esté presente en las suposiciones teóricas no significa que ya lo sepamos, así que incluso cuando una simulación está meramente haciendo cálculos, nos está dando conocimiento nuevo”²⁶⁸: parte integrante de todo experimento, y de modo relevante en el experimento mental y en la simulación informática, es la inteligencia humana, y su capacidad de adquirir nuevo conocimiento discurre por vías que no son tan fácilmente formulables como la determinación detallada de un modelo, analógico o informático.

Hago un símil quizá un tanto remoto pero ilustrativo: ¿por qué un hombre de negocios estudia los reportes de ventas? Si no fuera a obtener más información que la ya contenida lógicamente en esos datos, entonces cualquier persona de amplia capacidad lógica podría verlos y obtenerlos. Pero no es así: la intuición, experiencia, creatividad, capacidad de pensamiento disruptivo e inclinación al riesgo que caracterizan a un empresario le permitirán obtener nuevo conocimiento del negocio que quizá nadie más que él está en posibilidad de ver. No todo está en los datos, pues los datos sin la mente son meramente reflejos puntuales de la realidad, como observamos ya en el complemento intelectual de Brahe el observador y Kepler el matemático. Y eso no escribe nuevos conocimientos.

Añado una idea de Brown en este mismo sentido:

²⁶⁸ Roush, “The Epistemic Superiority of Experiment to Simulation”, 2.

Poincaré, en su ensayo ‘Intuición y Lógica en Matemáticas’ (1958), argumenta que la lógica por sí misma no puede aportarnos la gran riqueza de resultados matemáticos. (...) Si acaso, Poincaré está quizá siendo demasiado generoso; la lógica no es para empezar ni la fuente de las ideas, ni, en ningún sentido práctico, su justificación. (Al menos, no en una amplia variedad de casos, aunque sí es ciertamente la justificación en muchos.)²⁶⁹

Brown asienta la misma idea no dicotómica de que “esto es superior a aquello” sino que atribuye valor a un instrumento en algunos casos, pero no en todos. Siguiendo de nuevo a Roush en las tres preguntas que ofrecí páginas atrás, ¿es posible afirmar una superioridad epistémica absoluta del experimento sobre la simulación y, por ende, sobre el experimento mental? Resulta interesante explorar un poco más el papel de la similitud para valorar la ventaja epistémica en cada caso particular.

3.5.3. Similitud material y formal

Existen autores que señalan la importancia epistemológica de la similitud material entre objetivo de la investigación e instrumentación experimental, pero como señala Roush —con quien estoy de acuerdo— no parece sostenible esta postura. En su artículo sobre la superioridad epistémica del experimento sobre la simulación, indica que

Diversos autores señalan que la similitud material siempre es relevante:

Estamos más que justificados al reivindicar que para aprender algo sobre el mundo a través del experimento porque el mundo y el experimento comparten la misma cosa. En contraste, la inferencia desde el modelo experimental es mucho más difícil ya que los materiales no son iguales – no hay una ontología compartida, y por tanto

²⁶⁹ Brown, *The Laboratory of the Mind*, 70.

el poder epistemológico es menor. (Morgan 2005, 323; cf. Guala 2002, 2005; Harré 2003, 27-8.)

... pero el reclamo de que ‘la equivalencia ontológica aporta poder epistemológico’ (Morgan 2005) no ofrece orientación acerca de por qué la similitud adicional es siempre relevante para la justificación.

... la aseveración de la similitud material en sí misma requiere justificación. La similitud material no ofrece una métrica para la similitud epistémica relevante entre los sistemas de estudio y objetivo porque el establecimiento de dicha similitud en sí misma añade una capa de distancia epistémica, que podría en principio tener cualquier longitud, y la similitud material no es necesariamente más fácil de establecer que la similitud formal²⁷⁰.

Roush utiliza una terminología —ya usada en estas páginas y que ahora presento de modo explícito— que puede sumar a estas distinciones semánticas y permitirnos mayor precisión: me refiero a la distinción entre experimento con similitud material o formal.

Aun teniendo algunas limitaciones no deja de ser un modo enriquecedor para ver la distinción de metodologías: más que hablar en términos de posesión–negación, como sucede con el uso de los extremos físico y no-físico, se expresa de modo positivo en toda la escala cuando se habla de similitud material o formal. Lógicamente un experimento físico o material guarda además una similitud formal con el objeto de estudio pero la introducción de este término facilitará el desarrollo de las siguientes ideas.

El primer argumento, pues, para considerar una superioridad epistémica del experimento sobre la simulación o sobre el experimento mental es la similitud ontológica que, como concluye Roush, es una afirmación que debe ser probada. Al igual que Roush, no estoy convencido de ello: la similitud en el orden del ser es algo que comparten todos los existentes; la similitud material

270 Roush, “The Epistemic Superiority of Experiment to Simulation”, 3.

no tiene por qué aportar mayor valor epistemológico puesto que, de hecho, todos los objetos materiales la comparten.

En este sentido me parece más significativo el argumento que Roush desarrolla distinguiendo la similitud material y formal: es la similitud formal la que puede dar valor para obtener nuevo conocimiento, más que la mera similitud material. Además, el argumento que Roush enfrenta no es una similitud en la composición material, sino simplemente en la materialidad.

Roush concluye su argumento señalando que

mientras que el continuo material / formal, experimento / simulación, marca algo en nuestro uso de las palabras, el propósito de estos dos métodos es aprender cosas sobre el mundo, por lo que el reto para esta perspectiva es explicar por qué la distinción entre similitud material y formal supone cualquier diferencia epistemológica fundamental²⁷¹.

Me parece oportuno llamar la atención sobre este punto: no he pretendido una profundización semántica sino una exploración epistemológica sobre la metodología de la ciencia experimental en su empeño por conocer acerca del mundo.

La distinción entre físico o mental, similitud material o formal, simulación o experimentación no traza fronteras tan claramente definidas para todos los casos; más bien, una clara distinción parece ser la excepción. Por ejemplo, apoyado en la radical carencia de intervención con el objetivo bajo observación y a pesar de contar con una muy remota similitud material, ¿deberíamos considerar experimento no-físico uno que sucede de modo remoto o no local? Difícilmente alguien consideraría que el Gran Telescopio Canarias²⁷² resulta no-físico a pesar de que es

271 Sherrilyn Roush, "The Epistemic Superiority of Experiment to Simulation", 2015, 3, <https://doi.org/10.1/Epistemic%20superiority%20of%20experiment%20to%20simulation%20-%202015%20-%20Synthese.pdf>.

272 "Gran Telescopio CANARIAS", consultado el 4 de enero de 2023, <http://www.gtc.iac.es/>.

absolutamente incapaz de intervenir en su lejanísimo objetivo de estudio.

3.5.4. Acción directa sobre el objetivo

Otro argumento para una valoración epistemológica de experimentos mentales y simulaciones se presenta en la operación directa sobre el objetivo. Arnold y Kästner señalan que “otra diferencia importante es que algunos experimentos operan directamente sobre el sistema objetivo, mientras que las simulaciones informáticas nunca lo hacen”²⁷³.

Parece evidente, pero la afirmación así de meridiana ayuda a enfocar el punto. La no-operación directa con el sistema objetivo no niega el carácter físico de un experimento físico; es decir, en las observaciones astronómicas donde no se opera sobre el objeto (solo se observa), ¿se puede juzgar de experimento físico? Siempre se le ha considerado así; la cuestión es que la observación astronómica se encuentra en una situación de no-localidad extrema, de distancia entre observador y objetivo. Se podría decir que en ese caso —y tantos otros donde sólo se accede al objetivo mediante instrumentos de observación y detección en una situación de no-localidad— la intervención sucede sobre el instrumento, nunca sobre el objetivo. ¿Resta eso valor epistemológico al experimento? Mi opinión es que no, sino que le otorga cualidades distintas que han de valorarse de otro modo.

3.5.5. Comprobación

Por otro lado,

los experimentos pueden usarse para probar hipótesis fundamentales (*experimentum crucis*) mismos que, de nuevo, las simulaciones informáticas no pueden. Es obvio que una simulación no puede usarse para probar hipótesis fundamentales pues el resultado de la simulación

²⁷³ Arnold y Kästner, “Computer Simulation as Substitute for Experiment?”, 6.

simplemente dependería de la misma hipótesis sobre la que se construye dicha simulación²⁷⁴.

No coincido del todo con esta afirmación tan tajante: un caso como el de LIGO nos acerca al punto en el que una simulación supuso la comprobación necesaria ante un cuerpo teórico tan sólido y completo como el de la relatividad general. El premio Nobel se otorga solo en las comprobaciones experimentales, no teóricas, pero —repito— nadie dudaba del efecto que observarían y LIGO resulta más un desarrollo tecnológico en vistas a una nueva era de la astronomía (observación multi-mensaje, sobre la que no abundo) que un desarrollo científico. Para explicar de otro modo la razón a mi rechazo sobre la tajante afirmación de Arnold y Kästner antes citada, presento otro ejemplo.

En los modelos globales de clima²⁷⁵ la Tierra se representa como un modelo fragmentado. El tamaño de cada fragmento determina la resolución de la simulación; por ejemplo es tradicional dividir toda la Tierra en cuadrados de 100 km. de lado por toda la superficie, y porciones más estrechas en el eje vertical, un par de decenas de kilómetros por arriba y por abajo de la superficie de los océanos. Después, mediante simulaciones que recogen el cúmulo de leyes físicas relevantes, se estudia cada porción de la Tierra con una resolución temporal de —por ejemplo, una medida también típica— 10 min. Es decir, el sistema objetivo de clima, que es analógico, se discretiza en intervalos de 10 min. y sectores de 100 km. de lado. Luego la simulación se corre para predecir el clima.

¿De qué manera podría probarse una hipótesis fundamental con este modelo? Justamente usando el baremo habitual en este tipo de simulaciones: la predicción del presente. No se trata de una paradoja que busca ser irrisoria, sino de una técnica conocida y válida para la verificación del valor de una simulación.

274 Arnold y Kästner, 7.

275 “Climate Models | NOAA Climate.gov”, consultado el 21 de enero de 2023, <http://www.climate.gov/maps-data/climate-data-primer/predicting-climate/climate-models>.

La simulación se alimenta con los datos del pasado y se corre para ver qué tan precisamente es capaz de predecir el presente. Esto parece un juego en el tiempo, sin embargo para saber que las hipótesis subyacentes al modelo son válidas, es necesario que la simulación tenga la capacidad de producir resultados que son reales y esto puede lograrse prediciendo el presente.

Si la cercanía de la predicción es razonable y surge de pronto una nueva hipótesis, un modo de comprobarla es incorporándola a la simulación y verificar si la predicción resulta de mayor precisión. Los sistemas climáticos son de una complejidad tal que por este mecanismo se puede llegar a soportar como buena —en el ámbito falsificable estilo Popper, clásico de las ciencias— una hipótesis fundamental. Ahora bien, es cierto que no es el uso más común de las simulaciones y las hipótesis fundamentales suelen comprobarse experimentalmente. Tan solo he querido presentar este *excursus* para ilustrar que, incluso en afirmaciones aparentemente tan sólidas, resulta prudente guardar medida al hablar con tanta contundencia.

3.5.6. Verificación de resultados precedentes

Ya señalé que el inicio de toda simulación requiere una urdimbre teórica sólida, un recorrido consistente por la vía de la experiencia. Cuando el experimento es inviable y la simulación ofrece la potencia de cómputo que lo hace viable —habida cuenta que se cumple el antecedente teórico imprescindible— entonces el carácter no-físico (computacional) admite nuevos conocimientos sin nuevos datos empíricos, simplemente por la factibilidad de las operaciones de simulación. Sin simulación informática, por ejemplo, no tendríamos el conocimiento actual de la física de alta energía.

No es el ámbito de la física el único donde la simulación resulta esencial e insustituible:

el interés en las simulaciones químicas es, entre otras cosas como las consideraciones medioambientales, motivado por

el hecho de que las simulaciones permiten estudiar detalles de las reacciones químicas que no pueden obtenerse de los datos experimentales o son prácticamente inaccesibles a la experimentación. Pero también cuando los experimentos son posibles, las simulaciones pueden usarse para comprobar los resultados experimentales y su plausibilidad (Alexander et al., 2002, Wang et al., 2008)²⁷⁶.

Aquí enfrentamos una fortaleza adicional de la simulación, que es su capacidad de actuar como verificador de un experimento físico: si la teoría que se interprete de los resultados experimentales es sólida, la simulación ha de ser capaz de predecir nuevos resultados, así como es capaz de predecir el presente.

Completando la idea anterior sobre el infrecuente uso de la simulación para comprobar fundamentos teóricos, como dice Winsberg, es más útil para comprobar la hipótesis bajo escrutinio. Señala que

la epistemología de la simulación, en otras palabras, raras veces es para probar teorías básicas que pueden introducirse en la simulación, y más frecuentemente es para establecer la credibilidad de las hipótesis que son, en parte, el resultado de la aplicación de esas teorías²⁷⁷.

Una simulación, ordinariamente, se basa en fundamentos teóricos sólidos para aportar resultados que sustenten o nieguen una hipótesis.

Por tanto, la simulación puede cotejar un experimento, puede llegar a donde este no llega, puede ser viable cuando el otro es infactible; pero la simulación no se apoya en la materia, no es ontológicamente similar al objetivo, ha de tener una similitud formal, un entramado teórico sólido, un antecedente de experiencia suficiente.

²⁷⁶ Arnold y Kästner, "Computer Simulation as Substitute for Experiment?", 8.

²⁷⁷ Winsberg, "Computer Simulation and the Philosophy of Science", 836.

3.5.7. Conocimiento y evidencia

Parker también argumenta lúcidamente que la simulación es capaz de aportar información nueva sobre la naturaleza. Al señalar que la evidencia que proviene de una simulación es “de orden superior: es evidencia de que existe otra evidencia para la hipótesis h acerca del mundo”²⁷⁸ abre una línea de pensamiento que va en consonancia con otros autores (como Winsberg, con quien parece unirle una afinidad intelectual claramente fructífera).

Parker utiliza una distinción semántica —otorga título al artículo que ahora cito— que clarifica y delimita mejor lo que afirma: mientras que una simulación no obtiene nuevas *evidencias* sobre el mundo (no realiza mediciones inmediatas) es sin embargo capaz de aportar nuevos *conocimientos* sobre el mundo. Epistemológicamente, la meta es alcanzar conocimiento sobre el objetivo estudiado: si bien la evidencia proporciona conocimiento que podríamos llamar directo e inmediato (aun cuando sucede a través de complejos instrumentos), el verdadero conocimiento acerca del mundo, su funcionamiento, sus leyes, sus secretos, viene de la interpretación de la evidencia.

En la construcción que estoy realizando en estas páginas el paso de la evidencia al conocimiento como lo presenta Parker ofrece al menos dos perfiles de interés: por un lado marca una secuencia pues la simulación que aporta conocimiento parte de la evidencia; y por otro nuevamente resulta patente algo que podría considerarse superfluo señalar pero que pareciera ser el factor de compartimentalización excesiva que aqueja muchos de los autores aquí estudiados: quien adquiere conocimiento es la persona, quien interpreta los resultados de un experimento físico, mental, modelo, simulación o de cualquier otro posible tipo, es la persona. La mente es *el instrumento* inevitable que transforma una medición, una observación, una experiencia, un modelo en conocimiento. Con palabras de Parker,

²⁷⁸ Parker, “Evidence and Knowledge from Computer Simulation”, 1522.

si bien es verdad que los modelos de simulación no aportan información sobre el mundo que va más allá de lo que ya está implícito en los supuestos, los agentes epistémicos particulares —incluidos también los científicos e ingenieros que usan modelos de simulación— pueden adquirir conocimiento del mundo auténticamente nuevo por la vía de la simulación²⁷⁹

y enfatizo el modo que tiene de expresar el papel de los “agentes epistémicos particulares”.

Reconociendo que una simulación no proporciona *evidencia de primer orden*²⁸⁰, resulta sensato aceptar que sí aporta un conocimiento tal que pueda ser tomado como evidencia para sustentar una nueva hipótesis, o lo que Parker llama *evidencia de orden superior*. Sin pretender entrar en la profundidad que Parker utiliza para argumentar, esta evidencia de orden superior guarda una relación estrecha con la aportación de nuevo conocimiento al tener la capacidad de señalar al investigador la existencia de otra evidencia que pueda sustentar la hipótesis que se quiere demostrar. Saber que existe una laguna específica, en una dirección concreta, en el cuerpo de evidencia de un experimento o simulación es ya un conocimiento real del mundo.

Considero relevante regresar al comentario de Parker respecto al “agente epistémico” y explorar aunque sea un poco la riqueza de esta intuición cuya importancia me parece grande cuando se quiere defender la unidad metodológica que provoca el ser pensante.

3.5.8. El agente epistémico

Cuando el resultado de la simulación muestra que en el cuerpo original de evidencia existía información que el investigador no era consciente de poseer, entonces está realmente aportando una nueva información que —aunque se tuviera— realmente no se

279 Parker, 1522.

280 Parker, 1535.

conocía ni se estaba en posibilidad de conocer de no haber sido por el tratamiento a través de una simulación. Es la acción del investigador, a la luz del procedimiento experimental que haya realizado, la que educa un conocimiento latente y lo hace explícito. Afirmar que ya estaba ahí o no, me resulta inconsecuente ante la verdad de que, de no seguirse el procedimiento que provoca su solución en el agente epistémico, ese nuevo conocimiento no existiría.

El agente epistémico puede además, con los resultados de una simulación, adquirir una cualidad nueva que le permitirá descubrir aspectos y relaciones nuevas, no contenidas en el planteamiento de la hipótesis ni en el diseño de la recopilación de evidencias. Parker describe muy bien como este cambio en la persona es enriquecedor al señalar que “en algunos casos, es tan valioso como si se tratara de algo auténticamente nuevo — dado que el agente se hace consciente de nuevas premisas para su razonamiento y, así, nuevos espacios para la acción”²⁸¹.

Abrir puertas nuevas, presentar alternativas de investigación, manifestar vacíos de conocimiento y, por supuesto, resaltar comportamientos o relaciones desconocidos hasta ahora son aportaciones “psicológicas” (Parker lo enfatiza con entrecorillado y yo repito su gesto) que no deben ser despreciadas puesto que el instrumento supremo para todo experimento depende de su propia psique para funcionar adecuadamente.

Resulta oportuno abordar una cuestión que repetidamente ha surgido a lo largo de estas páginas acerca de la superioridad, distinción o extraordinariedad epistémica del experimento mental o de la simulación dentro de la metodología de la ciencia experimental. Si bien ya lo he comentado en su momento — citando además la voz de algunos autores— quiero asentar mi postura al respecto. Para ello me remito a una cita de Frigg y Reiss que Durán recoge en uno de sus escritos:

281 Parker, 1528.

es importante anotar que Friggs y Reiss no objetan la novedad de la simulación informática en la práctica científica o ingenieril, ni su importancia en el avance de la ciencia, sino más bien que las simulaciones provocan pocas —si acaso— cuestiones filosóficas. En sus propias palabras, ‘los problemas filosóficos que surgen en conexión con las simulaciones no son específicos de las simulaciones y la mayoría de ellos son variantes de problemas que se han discutido con anterioridad en otros contextos. Esto no significa que las simulaciones no producen nuevos problemas propios de ellas. Estos problemas específicos son, sin embargo, mayormente de naturaleza matemática o psicológica, no filosófica’ [16, 595]²⁸².

Me resulta una postura con la que puedo adherirme de modo pleno pues los procesos de adquisición de la verdad y conocimiento del mundo son esencialmente iguales en todos los métodos, con mayor o menor grado de relevancia en sus distintos puntos (más observación, más reflexión, más comprobación física, mayor grado de argumentación o de recurso a la imaginación). En cambio como señala con acierto Durán, la apreciación de qué valor ha de darse a la búsqueda de solución de un problema específico, con un método específico (o combinación de ellos) tiene implicaciones y exigencias lógicas, matemáticas, sociales, psicológicas, etc. en donde podemos resaltar —por ejemplo— las ya reseñadas condiciones extrínsecas e intrínsecas que juegan en la experimentación por cualquier vía que se utilice.

3.5.9. Condiciones de valor

Ahora bien, ¿es razonable afirmar que todas las simulaciones aportan conocimiento nuevo sobre el mundo? Ya hablé de las condiciones de todo experimento, muchas de las cuales se trasladan a las simulaciones y por eso la respuesta es

282 Juan Manuel Duran, *Computer Simulations in Science and Engineering*, 10, consultado el 2 de febrero de 2023, <https://springerlink.up.elogim.com/book/10.1007/978-3-319-90882-3>.

evidentemente negativa. Entonces, ¿ha de afirmarse la absoluta superioridad epistémica de un experimento sobre una simulación? Tampoco, como ya he argumentado antes.

El innegable e insustituible valor epistémico de la simulación informática se hace patente “cuando el cuerpo de evidencia de primer orden para la hipótesis, y/o el conocimiento antecedente requerido para la interpretación de la evidencia de primer orden, es grande, complejo y distribuido a través de múltiples agentes”²⁸³ y —sigue diciendo Parker y ahora solo resumo su idea— aunque un solo científico poseyera todo el conocimiento necesario para realizar una simulación a mano, ejecutar el trabajo y concluir las implicaciones del resultado es simplemente imposible (Parker es más discreta al señalar que es “prácticamente infactible”).

La conclusión de Parker en este razonamiento me parece brillante y la suscribo plenamente. No solo afirma que la simulación informática es un aumento de la capacidad intelectual del agente epistémico, sino que también supone un sitio social en donde el conocimiento se puede acumular de modo práctico, facultad que aporta nueva riqueza a las intuiciones, relaciones y conclusiones obtenidas de un experimento. Dice Parker que

en dichos casos, los modelos de simulación informática no solo sirven para aumentar el poder de cómputo de los seres humanos sino que también cumplen como sitios de integración de conocimiento comunitario, donde pueden explorarse las implicaciones de (una destilación del) conocimiento colectivo. En situaciones como estas, puede suceder que todo científico individual en la comunidad puede obtener conocimiento auténticamente nuevo de que h ²⁸⁴ a través de la simulación, porque ninguno de ellos

283 Parker, “Evidence and Knowledge from Computer Simulation”, 1534.

284 Cabe señalar el modo corto de redactar usado aquí: cuando afirma “que h ” sin explicar qué es lo que sucede con h , simplemente está usando la manera informática en que se suele decir “si x ” para señalar “que x es verdadero” obviando la sentencia completa.

individualmente sabe suficiente para que h esté suficientemente garantizada como conocimiento²⁸⁵.

La opacidad acusada por Parker²⁸⁶ y otros, resultado de la complejidad habitual de los algoritmos informáticos y de los sistemas como un todo²⁸⁷, no resta valor a los resultados por el hecho de que la persona no verifique cada paso de la simulación (tarea imposible) cuando el sistema —tanto en su comprensión holística como en cada una de sus partes— tiene un soporte de confiabilidad basado en la evidencia de sus mismos resultados.

De este modo me acerco aun más al punto en donde responder acerca del valor epistemológico de la simulación o del experimento mental no resulta una respuesta unívoca y total. Tanto el experimento físico como el mental —o con terminología de Roush, aquel que guarda similitud material o solamente formal con su objetivo— como la simulación informática ocupan un sitio determinado por numerosos factores. Entre estos, el momento de desarrollo de determinado estudio no es irrelevante y la mente del agente epistémico es el factor cohesivo en el viaje a través del mapa metodológico de la ciencia experimental.

Antes de cerrar este capítulo en el que he transitado por la vía de las matemáticas como lenguaje ideal, las representaciones y modelos como requisito para la simulación, y un estudio de la simulación misma desde varios puntos de vista y con las enriquecedoras aportaciones de distintos autores, quiero realizar un ejercicio para poner en práctica las consideraciones aquí

285 Parker, "Evidence and Knowledge from Computer Simulation", 1534.

286 Parker, 1535.

287 Parker cita a Winsberg quien en distintos momentos, al hablar de la opacidad, se refiere al conocimiento que viene de la simulación como un "*motley affair*" o asunto abigarrado por la variopinta procedencia de los factores implicados en una simulación: no es solo la hipótesis a comprobar sino también los planteamientos teóricos que dan pie al sistema operativo, a los componentes electrónicos, al lenguaje de simulación, etc. Todo esto añade opacidad, pero no por ello resta validez, así como uno no acude constantemente al metro oficial cada vez que use una regla: sabe, por evidencia, que es fiable y cree en sus mediciones.

recogidas. Me apoyaré en el ya varias veces mencionado experimento del EHT.

Narra Katie Bouman²⁸⁸ que al preparar la fundamentación matemática e informática para interpretar los datos que provendrían de la detección de los radiotelescopios del EHT, era necesario asegurar que el sesgo de la comprobación no afectara de manera importante a los equipos de interpretación. La diferencia entre los datos que se obtienen y la imagen que se publica es enorme, el recorrido informático necesario para pasar de la evidencia al conocimiento necesitaba asegurar una sobresaliente similitud formal con la realidad natural: tomar en cuenta las deformaciones en los datos producidas por la distancia, los obstáculos, los artefactos en la detección, etc. resultaba una tarea inmensa.

Uno de los modos que usaron para asegurar la similitud formal entre los modelos y el objetivo de estudio fue mediante la interpretación de imágenes sintéticas, con un mecanismo similar a la predicción del presente utilizada en los modelos meteorológicos pero, en este caso, sin que el investigador conozca el presente. Es decir, si se entregaba a los equipos que harían la interpretación, los datos que esperaban obtener para producir la imagen de un hoyo negro, lo más probable sería que todos lo localizaran.

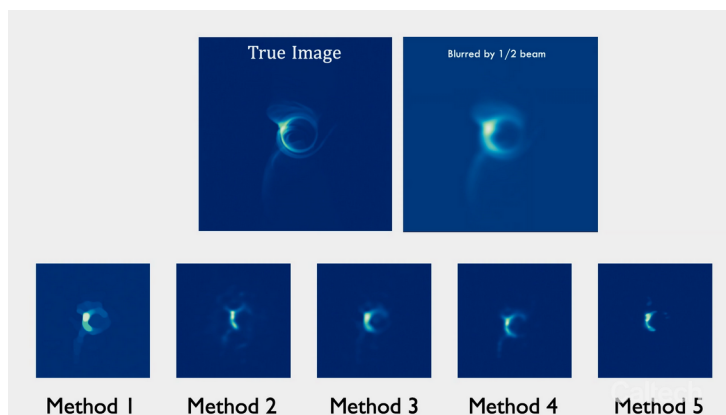


Fig. 11a: Imagen para prueba de los algoritmos del EHT²⁸⁹.

²⁸⁸ *Imágenes de lo invisible: tomar la primera imagen de un agujero negro* - Katie Bouman - 6/7/2019, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=glfON286APE>.

²⁸⁹ *Imágenes de lo invisible*.

En cambio, entre las pruebas que llevaron a cabo, les entregaron la información de un difuso mono de nieve: si los modelos de interpretación de imagen eran acertados, localizarían esa figura. Sobra decir que no todos lo lograron, algunos encontraron un deforme hoyo negro, mostrando que esa simulación aun carecía de la similitud formal necesaria y adolecía de un importante sesgo.

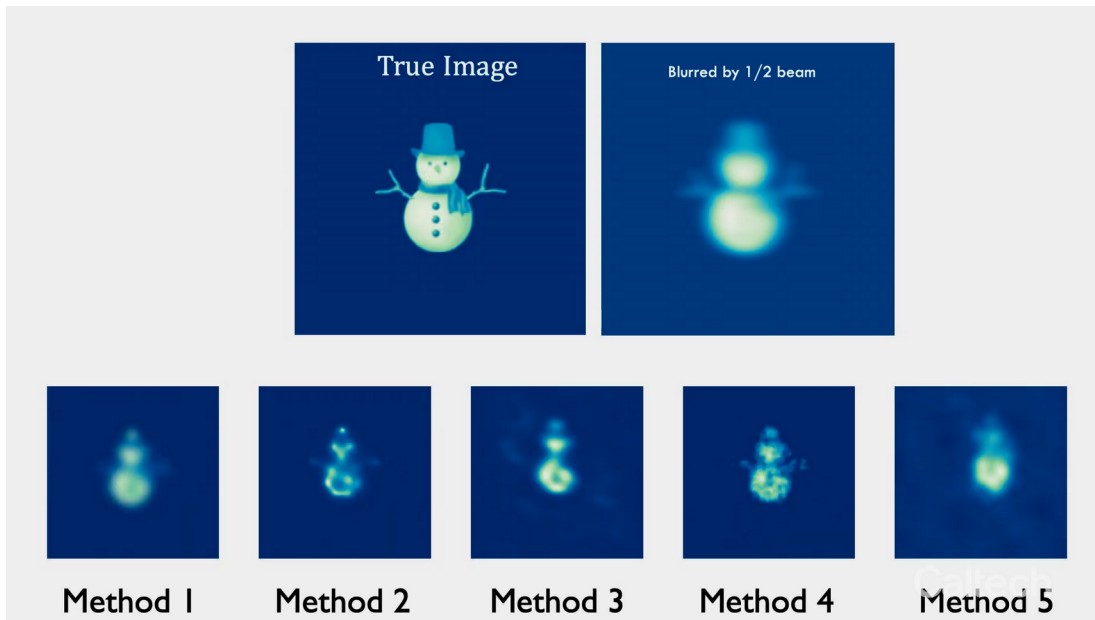


Fig. 11b: Imagen que busca eliminar el sesgo de comprobación²⁹⁰.

La obtención de la imagen de M87 lograda por el EHT traza un recorrido casi completo sobre lo que he querido plasmar en este tercer capítulo. La observación es evidencia, no conocimiento; la discretización de la realidad de un hoyo negro lo abre a la posibilidad de simulación; la no-localidad extrema hace sumamente complicada la observación e imposible la interacción; la dispersión geográfica requerida por el instrumento es imposible sin la informática; la colaboración intelectual extensísima no resulta en proximidad entre los investigadores. Podría seguir enumerando cualidades, queda claro que la simulación informática, en este caso, es una clara extensión de un experimento que, desde su inicio, sucede en completa ausencia de contacto con el objetivo y en la mayor parte de su recorrido,

²⁹⁰ *Imágenes de lo invisible.*

también inaccesible en muchos puntos del alcance del intelecto humano, incluso coordinado, de muchas personas.

Sin un entramado teórico desarrollado, la modelación matemática precisa, y la simulación informática sólida, este logro habría sido imposible. ¿Es superior de modo absoluto la simulación sobre la experimentación? No. En este caso, ¿lo es? Evidentemente sí, pues sin ella —absoluta e indefectiblemente— no existiría el nuevo conocimiento.

Cap. 4: Conclusiones

A través del cap. 1 hice un recorrido contextual en la interacción del hombre con la naturaleza mediante el método científico experimental. Con el cap. 2 procuré elaborar razonamientos sobre el modo de funcionar del laboratorio de la mente en el ejercicio del experimento mental.

El cap. 3 supone el núcleo de esta tesis al abordar la simulación informática como una herramienta más en el mapa metodológico de la ciencia experimental. Este tercer paso ha puesto de manifiesto —postura que he perfilado y defendido en distintos momentos— la inadecuación de pretender colocar cada una de estas herramientas en compartimientos perfectamente caracterizados y diferenciados sino más bien he enfatizado el papel cohesivo y unificador —por demás ineludible— de la mente humana en la metodología de las ciencias experimentales.

Cierro este trabajo de investigación sintetizando tres aspectos que ya he desarrollado, pero que ahora presento de modo más sistemático y definido:

- a) Una taxonomía que recopila tanto las aportaciones de autores variados como la mía propia.
- b) Una propuesta de mapa metodológico para la adquisición de conocimiento en las ciencias experimentales.
- c) El resultado de navegar por este mapa al considerar la metodología de la ciencia experimental.

4.1. Taxonomía

La intención inicial de esta investigación consistía en presentar una clasificación del experimento mental y sus distintas modalidades; sin embargo la literatura examinada, mi propia comprensión del material estudiado y la atinada orientación de mi directora de tesis, me inclinan por hacer una muy breve taxonomía

del experimento mental que incluya la simulación informática como parte integrante.

El sentido de esta taxonomía es, por un lado, secundar la propuesta y ejemplo de autores como Norton, Brown y Sorensen, que para cualquier explicación se apoyan en ella; y por otro ofrecer un contraste entre el planteamiento de caracterización específica de los tipos de experimentos, con su ubicación más flexible y abierta en un mapa metodológico.

4.1.1. Posturas de autores significativos

Contamos con la oferta de clasificación que han presentado distintos autores, que abordaré sin excesiva argumentación o análisis y que, por otro lado, ya ha quedado implícitamente presentado en los cap. 1 y 2.

Para empezar, copio una síntesis que ofrecen Aguilar y Romero respecto a algunas cualidades del experimento mental que abre la puerta a la clasificación. No contiene todos los elementos que yo considero relevantes pero permite una comparación inicial:

En términos generales puede decirse que:

(...)

iv) Entre las funciones y propósitos de los experimentos mentales se destaca:

a) probar que ciertas teorías o conceptos envuelven contradicciones;

b) proporcionar evidencia de respaldo a una teoría o un concepto;

c) ilustrar una posición abstracta o compleja;

d) detectar la vaguedad de un concepto y sus casos dudosos de aplicación (Brendel, 2003). Pero también se puede decir que a partir de los experimentos mentales se realizan construcciones que se constituyen en condiciones iniciales necesarias para la construcción de

un marco teórico, tal como sucede con el espacio absoluto y el tiempo absoluto en Newton²⁹¹.

Añaden también Aguilar y Romero:

Se puede decir entonces que, si bien la experimentación mental es supremamente importante para el hombre de ciencia profesional, es también importante y necesario para el desarrollo psíquico del individuo y para aquel estudiante que aprende Ciencias²⁹².

Kuhn presenta una dificultad, o cuando menos una consideración relevante, para cualquier intento de taxonomía:

La característica esencial de los paradigmas es que inducen diferentes taxonomías. La pretensión de una taxonomía científica es establecer una partición del campo en clases naturales que sean proyectables; esto es, con cuya ayuda se puedan formular leyes, siendo capaz asimismo de soportar inducciones²⁹³.

Copio lo que Brown dice cuando, respecto a los experimentos mentales, se pregunta:

¿Son tan solo una colección curiosa y variada de exhibiciones deslumbrantes de gimnasia mental, cada una única en su propio mérito, o hay algún tipo de patrón? La primera tarea de cualquier análisis sobre el experimento mental ha de ser la construcción de un esquema de clasificación²⁹⁴.

Brown también señala que “los experimentos reales a veces prueban (es decir, confirman o refutan) conjeturas científicas; a veces ilustran teorías o simulan fenómenos naturales; y otras veces descubren o provocan nuevos fenómenos”²⁹⁵.

291 Aguilar M. y Romero, “A propósito de los experimentos mentales”, 172.

292 Aguilar M. y Romero, 173.

293 Kuhn, *Estructura de las revoluciones*, 83.

294 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 32.

295 Brown, 32.

De modo muy compacto, Brown apunta hacia una diversidad de finalidades del experimentador que influirán en el diseño e interpretación, a la vez que entremezcla consecuencias o resultados específicos.

Bokulich y Frappier afirman que

encontramos lo que ha venido a ser conocido como ‘binomio experimento mental — anti-experimento mental’. Estos se definen como cualesquiera dos experimentos mentales que llevan a conclusiones opuestas. Una subespecie particularmente interesante de estos, para nuestra discusión presente, son los pares de experimentos mentales que involucran el mismo escenario [la misma narrativa inicial] y sin embargo tienen análisis que llevan a conclusiones opuestas. Un ejemplo clásico de este caso es el experimento mental del cubo de agua de Newton²⁹⁶.

Aunque no coincido con la interpretación que dan al experimento de Newton (que estiman como demostrativo de la existencia del movimiento absoluto), presentan como experimento opuesto la interpretación de Ernst Mach en el sentido contrario: no queda demostrado el movimiento absoluto sino el movimiento respecto a las estrellas lejanas. Pero lo que me interesa extraer de esta cita es, nuevamente, un punto de clasificación que pueda tomar en consideración para construir el esquema de clasificación.

Aureli Caamaño recopila, en una apretada clasificación, varios géneros taxonómicos de distintos autores²⁹⁷:

- Woolnough y Allsop (1985): Experiencias, ejercicios prácticos, investigaciones.
- Gott, Welford y Foulds (1988): experimentos ilustrativos, informativos, de observación (con interpretación), uso de

²⁹⁶ Bokulich y Frappier, “On the Identity of Thought Experiments”, 4.

²⁹⁷ Aureli Caamaño, “Experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos e investigaciones: ¿una clasificación útil de los trabajos prácticos?”, s/f, 8.

habilidades básicas, investigaciones (clasificadas a su vez en función del tipo y número de variables que intervienen).

- Albadalejo y Caamaño (1992): experiencias, experimentos ilustrativos (actividades para ejemplificar principios, ilustrar la relación entre variables o mejorar la comprensión de determinados conceptos), ejercicios prácticos (procedimentales y corroborativos de teoría), experimentos para contrastar hipótesis, investigación (para resolver problemas teóricos o prácticos).
- Caamaño (2003): experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos, investigaciones.

Aguilar y Romero expresan algunas ideas de interés para esta clasificación señalando las siguientes “Funciones y características del experimento mental”²⁹⁸: algunos experimentos mentales permiten la profundización de teorías, otros se realizan porque es imposible ejecutar el escenario de la experimentación en el mundo real. Igualmente, los experimentos mentales ayudan a explicar y aclarar los estados abstractos de las cosas, facilitando así el proceso de comprensión. Otros sirven como ejemplo en el análisis conceptual²⁹⁹.

Brown introduce una especie más que resulta relevante y ya he mencionado pasajeramente con anterioridad:

hay otro tipo de experimento que tiene lugar en el pensamiento, pero no es un experimento mental genuino en el sentido a que me refiero. En psicolingüística, por ejemplo, se nos puede pedir que consideremos si acaso una oración, digamos, ‘las incoloras ideas verdes duermen furiosamente’, es gramatical. Hacemos introspección para encontrar la respuesta. Comprensiblemente, a esto con frecuencia se le llama experimento mental. Pero me parece que no es un experimento mental en modo alguno. Al contrario, parece

298 Entresaco los textos relevantes, la cita no está completa ni es textual.

299 Aguilar M. y Romero, “A propósito de los experimentos mentales”, 172.

un experimento real en donde el objeto del experimento, y no el método, es el pensamiento³⁰⁰.

Esto es, en mi opinión, una valiosa discriminación respecto a qué es un experimento mental: no todo lo que sucede exclusivamente en la mente puede calificarse de experimento mental.

“Los experimentos mentales de Stevin, Newton y Einstein son ejemplos de lo que llamo experimentos mentales conclusivos”³⁰¹. Brown ofrece con este juicio un elemento más para la taxonomía. En su clasificación señala experimentos destructivos (a su vez divididos en directos, conjeturales y mediados), constructivos (que pueden ser conclusivos o conjeturales) y platónicos³⁰² que sitúa en ambos espacios constructivo y destructivo. Finalmente, presenta un caso adicional de experimento que denomina modal³⁰³ que menciono simplemente para completar la aportación de Brown pero que considero poco relevante³⁰⁴.

Desde largo tiempo atrás se ha seguido la pretensión o búsqueda del *experimentum crucis*:

se han reconocido y documentado algunos experimentos cruciales (aquellos que son capaces de discriminar con particular nitidez entre ambos paradigmas) antes siquiera de que se hubiese inventado el nuevo paradigma. Este tipo de programas tienen muchas posibilidades de tener éxito si el nuevo paradigma muestra una precisión cuantitativa sorprendentemente mejor que la de su competidor más viejo³⁰⁵.

300 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 3.

301 Brown, 7.

302 Brown, 43.

303 Brown, 11.

304 Hablando de un experimento sobre el tiempo absoluto explica: “solo se trata de argumentar a favor de que *podría haber evidencia* de tiempo absoluto... Es un argumento modal, un tanto de especialidad entre los filósofos. Hay casos en donde las nociones de posibilidad y necesidad son medulares, aunque solo estén implícitas.”

305 Kuhn, *Estructura de las revoluciones*, 316.

Al hablar de modelos, la enumeración de Mäki puede contribuir a la taxonomía:

los modelos no son contruidos y examinados para el placer personal de uno mismo, sino mayormente para alcanzar y formar las expectativas de la audiencia. Los modelos habilitan la comunicación, los modelos ayudan a transmitir información, los modelos amplían el acuerdo, y los modelos se usan para persuadir a otros a revisar la intensidad de sus creencias³⁰⁶.

Nuevamente, el ya multicitado Brown ofrece elementos para la clasificación, ahora hablando del objetivo que puede buscar un experimento mental: minar una teoría concreta.

Muchos de los grandes experimentos mentales asociados con la mecánica cuántica son intentos de minar el principio de incertidumbre [de Heissenberg], o de modo más general, la interpretación ortodoxa del formalismo cuántico conocido como la interpretación de Copenhague. El gato de Schrödinger y EPR³⁰⁷, (...) son dos de los más famosos³⁰⁸.

Más aun³⁰⁹, señala el mismo autor, que quiere “apuntar a la existencia de una clase distinta de experimento mental, a saber, los experimentos de contrapensamiento³¹⁰”³¹¹.

Entresacando de la riqueza que ofrece Brown en sus escritos, tenemos también los experimentos mentales negativos, que solo desbancan una teoría. Refiriéndose al experimento galileano sobre las bolas en caída que ofrece Aristóteles comenta que

306 Mäki, “Models and locus”, 53.

307 El experimento mental o paradoja de Einstein – Podolsky – Rosen, que no detallaré aquí por no ser relevante y abrigar una complejidad que exigiría una extensión injustificada en este estudio.

308 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 23.

309 Brown, 48.

310 *Counter thought experiment*.

311 Brown, *The Laboratory of the Mind*, 62.

la estructura de estos experimentos mentales es común. Ponemos las condiciones y vemos qué sucede. Pero encontramos que las cosas no ocurren como predice la teoría de Aristóteles. La conclusión a la que llegamos es que Aristóteles está equivocado. Mucho de los experimentos mentales más famosos de Galileo, como hemos visto y veremos de nuevo, tienen esta forma. Y algunos de los de Einstein también, como cuando anteriormente lo describimos persiguiendo un rayo de luz para ver qué apariencia tendría el frente de onda electromagnética. Le llevó a un absurdo. Estos experimentos mentales negativos son con frecuencia muy efectivos para decirnos lo que es falso, pero no nos dicen lo que es verdadero³¹².

Kuhn señala que un experimento mental puede tener como objetivo eliminar la confusión existente sobre un punto, y esto no requiere datos empíricos adicionales³¹³. Esto podría parecer otro modo de llamar a un experimento que se propone ilustrar una situación, pero tiene un objetivo particular pues no es solo ampliar la comprensión sino positivamente eliminar un obstáculo en la comprensión de un fenómeno o teoría.

Dirigido al proceso mental del científico, Kuhn detalla que un tipo importante de

experimento mental funciona al confrontar al científico con una contradicción o conflicto implícito en su modo de razonar. Reconocer la contradicción aparece entonces como un propeutéutico esencial para su eliminación. Como resultado del experimento mental, se desarrollan conceptos claros que remplazan a los confusos que se venían usando³¹⁴.

Finalmente, un modo más de enfocar el esquema de clasificación es con base en los motivos que incitan a realizar un experimento bajo una modalidad metodológica específica: la razón que lleva a

312 Brown, 134.

313 Kuhn, "Essential Tension, Cap 10", 242.

314 Kuhn, 261.

hacer experimento mental en vez de físico, una simulación discreta en lugar de una analógica, etc.

4.1.2. Consideraciones para la clasificación

Como se puede apreciar fácilmente, no existe —ni lejanamente— un consenso respecto a una taxonomía que abarque al menos los experimentos mentales, mucho menos si se desea incluir con mayor amplitud la variedad metodológica posible en las ciencias experimentales. Desde temprano en el proceso de esta investigación resultó evidente esta idea que he procurado hacer explícita en distintos momentos: la hiper-clasificación, un empeño por detallar las cualidades precisas de cada modalidad experimental, si bien ayuda a comprender mejor las posibilidades en cada estilo, produce como resultado una separación en compartimientos conceptuales que —parafraseando una conocida expresión popular— presta demasiada atención a las hojas y ocasiona que se deje de percibir su organización y complemento en la realidad de un bosque que supone una unidad llena de diversidad.

La taxonomía que presento a continuación copia o emula muchos rasgos presentados por los autores precedentes. Busco una clasificación que, sin cerrar los ojos a la realidad experimental, facilite la percepción del rol de una mente abierta, crítica y especulativa en la búsqueda de la verdad y el papel que juega en todo el proceso.

Persigo una taxonomía que manifieste todas las potencias del experimento mental en donde progresivamente he mostrado que ha de considerarse a la simulación informática dentro del mismo mapa, quizá más cercano al mental que al físico. Los géneros que presentaré ocasionan que las especies se puedan repetir en una categoría u otra: no me parece lesivo a la claridad o amplitud de la propuesta, ni es el objetivo de la investigación situar con precisión cada modalidad. La misma realidad —es bien sabido— puede considerarse desde distintos ángulos y ofrecer aristas y colores

variados: en algunas perspectivas serán parecidas pero en otras resaltarán nuevos perfiles y propiedades. Es lo que pretendo.

4.1.3. La clasificación

A manera de ilustración, en algunos de los detalles he incluido un experimento que puede servir de modelo representativo, entre los mencionados en esta investigación.

- I. Motivación epistemológica del experimentador.
 - A. Sustitución. (Objetos en caída de Galileo).
 - B. Complemento (LIGO).
 - C. Ilustración (Stevin).
 - D. Explicación o corroboración (EHT).
 - E. Afirmación de un postulado (cubo de Newton respecto al movimiento relativo, no al espacio absoluto).
 - F. Negación de un postulado³¹⁵ (Pasteur, respecto a un posible origen bacteriano de la rabia).
 - G. Sustitución de un postulado (Copérnico y Galileo).
 - H. Eliminación de la confusión (Einstein y el principio de equivalencia).
- II. Factibilidad: razón para elegir una metodología concreta.
 - A. Factibilidad espacial (EHT, LIGO, Gran Telescopio Canarias).
 - B. Factibilidad temporal (simulación meteorológica).
 - C. Viabilidad económica.
 - D. Complejidad instrumental (LHC).
 - E. Riesgo social o ambiental.
 - F. Viabilidad ética (la exploración de Facebook).
 - G. Limitación sensorial (LIGO, Herschel y la luz infrarroja).
 - H. Limitación de cómputo (trazos orbitales, problema de los tres cuerpos).
 - I. Dispersión de la base teórica en distintos agentes epistémicos (EHT, LIGO).

³¹⁵Tan solo menciono —no está presente en el desarrollo de la tesis, pero resulta especialmente representativo— el experimento de Michelson y Morley por el que se comprobó la no-existencia del éter luminífero.

- III. Sustento teórico o paradigma vigente.
 - A. Entramado teórico completo (LIGO).
 - B. Existencia positiva de dudas sobre el fundamento teórico.
 - C. Punto de quiebre: la teoría o el paradigma no resultan sostenibles (Newton y Einstein, Galileo y Aristóteles).
 - D. Planteamiento de un nuevo fundamento paradigmático (Schrödinger, Heisenberg: la interpretación de Copenhague, Pasteur y el origen microbiano de la enfermedad).
- IV. Modalidad de ejecución.
 - A. Individual (Newton, Herschel, Pasteur).
 - B. Colaboración presencial (Bohr y Einstein).
 - C. Colaboración diferida, virtual o asíncrona (Brahe y Kepler, EHT, LIGO).
- V. Planteamiento abierto o cerrado.
 - A. Se tiene claridad respecto al objetivo perseguido (casi todos los mencionados).
 - B. Existe una actitud de exploración respecto al desenlace que pueda devenir (Kepler en la búsqueda del modelo orbital acertado).
 - C. Apertura total, simple relación de ideas, enlace libre de datos y conceptos.

Como señalé antes, no he querido ofrecer esta aportación como conclusión ya que puede tomar matices y formas distintas de acuerdo a lo que se quiera resaltar con esta taxonomía. Lo que quiero poner de manifiesto —como ya mencioné antes— es la vía de la categorización estricta, como la que ahora presento, en contraste con un planteamiento más abierto en donde cada situación ocupa territorios variados, matices distintos, situaciones fluidas dentro de un mapa metodológico.

4.2. Mapa metodológico

Me resulta poco deseable o factible pretender una distinción estricta, delimitada, incluso dual o de opuestos, entre experimento mental con o sin simulación, y físico con o sin instrumentación, por la sencilla razón —lo señalo aquí de modo extremadamente sintético— de la presencia del trabajo mental en todo experimento. Por este motivo desarrollo ahora la hipótesis que he prefigurado y perfilado a lo largo de esta investigación.

El-Skaf e Imbert realizan un ejercicio similar con bastante detalle y sustento, que describen de modo provocativo al acometer su estudio: “en general, mientras han seguido desarrollándose estudios que comparan la SC, EM y E³¹⁶, la literatura ofrece más un campo de batalla que un territorio en desarrollo”³¹⁷. Con esto expresan que la pretensión de caracterizar de modo preciso los experimentos físicos, mentales y simulaciones, más han encontrado posiciones opuestas y contradictorias —tantas veces combativas— que alianzas mutuamente enriquecedoras que edifiquen un camino constructivo.

Regreso por tanto a la expresión de Galison acerca del “mapa metodológico habitual” y pretendo ahora ensayar un trazo de ese mapa buscando que muestre las regiones de un territorio común y no las cicatrices de una zona de guerra. Resultará un poco audaz concentrar los factores en uno o pocos diagramas sin embargo me parece que puede ayudar a la claridad de lo que deseo expresar; empezaré por la descripción de sus componentes.

Reitero mi convicción acerca de que el intento por delimitar de modo acotado y definido el ámbito y eficacia de cada uno de los espacios ocupados por uno de los métodos de la ciencia experimental puede resultar en limitación de la visión del

316 “CS, TE and E” en el original. Las siglas significan Simulación Computacional, Experimento Mental y Experimento, y he usado esas iniciales traducidas en la cita del texto.

317 Rawad El-Skaf y Cyrille Imbert, “Unfolding in the Empirical Sciences: Experiments, Thought Experiments and Computer Simulations”, *Synthese* 190, núm. 16 (noviembre de 2013): 3453, <https://doi.org/10.1007/s11229-012-0203-y>.

experimentador. Es gráfico lo que El-Skaf e Imbert ofrecen en las conclusiones del citado artículo cuando señalan que

mientras que la SC, los EM y los E no necesariamente son complementarios en el sentido de que se usan para diferentes tipos de tareas epistémicas, aun así pueden ser maneras epistemológicamente complementarias de realizar la misma tarea³¹⁸,

es decir, cada uno de ellos puede aportar al mayor conocimiento del mundo desde la trinchera de su método y alcance de manera que dicho conocimiento se enriquezca con la aportación de unos y otros modos de alcanzar partes de la verdad y es la razón por la que, más que compartimientos estancos, estos métodos son susceptibles de plasmarse en un mapa por el que transitan las ciencias experimentales.

4.2.1. El eje de la materialidad

Los extremos resultan fáciles de categorizar. Quemar hidrógeno en una atmósfera de oxígeno para producir agua es innegablemente un experimento físico. Imaginar un universo carente de estrellas en el que solo tenemos dos esferas unidas por un hilo es radicalmente mental y de todo punto imposible de realizarse físicamente.

Pero al estudiar el papel de la inteligencia en la experimentación podemos encontrar que el físico no lo es totalmente y que el mental también parte de la experiencia sensible al igual que el físico. Es la inteligencia la que diseña, ejecuta e interpreta todo experimento físico: resalto el papel de la interpretación puesto que un experimento no comprueba teorías sino hechos y será el investigador quien, usando su inteligencia, establezca las teorías.

La finalidad de un experimento es alcanzar un conocimiento verdadero del mundo: eso no lo arroja ningún instrumento, sino

318 El-Skaf y Imbert, 3471.

que es conclusión de la inteligencia y por tanto antes de que eso suceda, el experimento no ha terminado.

Un experimento mental como el de las esferas de Newton parte de experiencias físicas, no inmediatas sino remotas: el investigador conoce el comportamiento de los cuerpos en revolución, el efecto de la fuerza centrífuga, las leyes que gobiernan la tensión, etc. Así como no todo experimento parte de datos inmediatos (estrictamente hablando, ninguno lo hace pues el momento de la interpretación siempre está cronológicamente separado de la observación y, por tanto todo experimento usa evidencias del pasado) el experimento mental tampoco lo hace.

De este modo establecemos el **primer eje**: tomando en cuenta el papel omnipresente y cohesivo de la inteligencia, un experimento puede contener mayor o menor materialidad, incluso cruzar una frontera más definible donde desaparece por completo el componente físico, pero nunca desaparece el componente mental más que accidentalmente.

Este primer eje no recorre indistintamente desde la experimentación física hasta la mental sin pasos intermedios. Es necesario, a la luz de los análisis ofrecidos en la presente investigación, introducir etapas que jugarán un papel mayor o menor en el experimento y cuya clasificación puede ser categorizada pero no tan fácilmente colocada en un compartimiento delimitado: el extremo de la inmaterialidad completa va seguido de la modelación o representación —todavía mental— que abre la puerta a la simulación informática, metodología en donde la materialidad es accidental pues no guarda similitud alguna, más allá de la ontológica, con el objetivo de estudio.

Después de los elementos informáticos para la simulación, con una composición notablemente física y más directamente aplicada al objetivo de estudio, está la instrumentación de detección que no necesariamente es local o interactúa con el objetivo. Tal es el caso del telescopio astronómico. En el extremo más físico de la escala

encontramos la instrumentación de intervención, como puede ser un electroimán, el fuego, un agitador químico, una fuente energética, inyección de sustancias, etc.

Representado a manera de escala continua, con fronteras difusas y posibilidad de existir en distintas partes de la escala, se podría ver así:

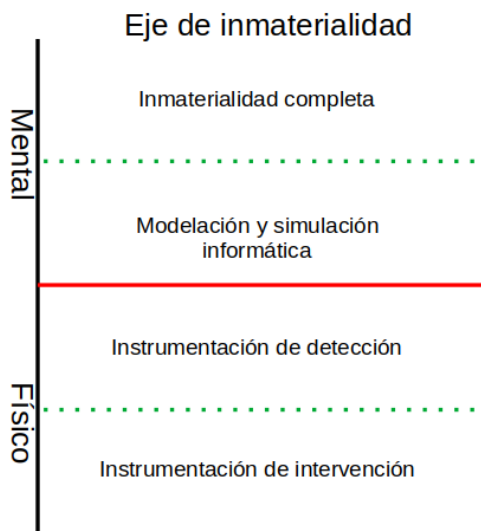


Fig. 12. Eje de inmaterialidad de un experimento.

Un experimento como la combustión de hidrógeno estaría de lleno en la parte inferior pero, ¿se puede afirmar que no contiene una componente mental? En el enfoque que he dado a este análisis, lo contiene como toda acción humana. Así, en vez de “representar” el experimento de la combustión de hidrógeno como absolutamente físico (figura 13a), será más acertado entenderlo como distribuido en la escala (figura 13b).

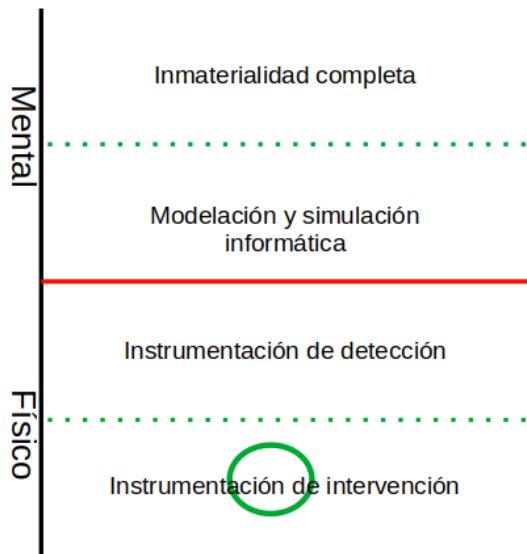


Fig. 13a. Experimento físico.

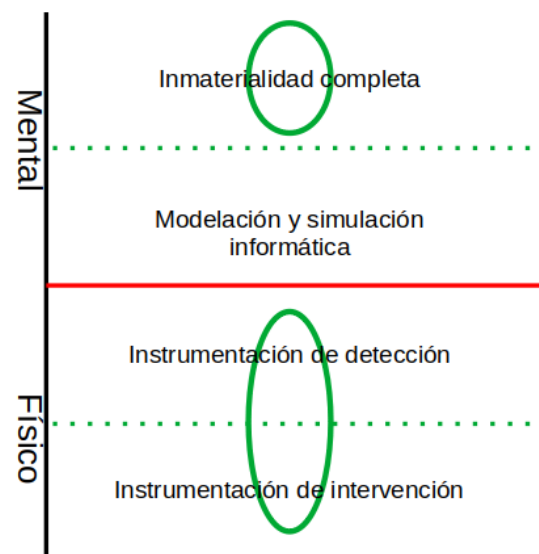


Fig. 13b. Experimento físico con componente mental

¿Por qué ocupa tres zonas en la escala? Por un lado, la innegable componente física debe ser registrada; igualmente la intervención de la mente también se encuentra presente. Pero además el registro de la producción de agua en la combustión, si se quiere algo aunque sea mínimamente cuantitativo, requiere de un termómetro que expande la capacidad sensorial del hombre y una micro-báscula que supera la sensibilidad táctil del investigador. Por tanto, no se trata solo de la instrumentación en sí misma (quemador, materiales, etc.) sino de una extensión a las capacidades sensibles materiales del hombre.

Expongo este simple razonamiento pues en una visión antropológica completa nunca debe olvidarse que el hombre tiene una componente inmaterial que se manifiesta —entre otras— en su inteligencia. Si la capacidad corporal se extiende legítimamente más allá de sus límites naturales mediante instrumentos de medición e intervención, el planteamiento resultaría incompleto si se niega la capacidad de extensión al poder intelectual del investigador.

Establecido ese primer eje, en el que pretendo evitar el encasillamiento de un experimento en una sola categoría, añado uno que se suma con naturalidad a ese mismo gráfico: el tiempo.

Entonces, el **segundo eje** será el paso del tiempo a lo largo del proceso experimental. Ordinariamente, como ya he descrito, un experimento consta de tres etapas razonablemente determinadas: preparación o diseño, ejecución e interpretación. Estas tres etapas pueden mostrarse más bien difusas en sus bordes, no ser muy determinadas o incluso varias de ellas estar presentes en el mismo momento. Sin embargo en todo experimento físico tenemos la inexorable realidad del paso del tiempo, a razón —valga la expresión— de un segundo por segundo: no podemos alterarlo, al menos en las componentes físicas de un experimento.

Resulta necesario volver a una de las cualidades del experimento mental: la intemporalidad y la ausencia de una cronología estricta. Aun así, aunque el experimento mental pueda suceder “de modo instantáneo”, retroceder, avanzar, detenerse o iterar, de cualquier manera en el proceso mental la sucesión del antes al después sucede para pasar de causas a efectos, de eventos a consecuencias.

La simulación informática juega distinto en este eje: al igual que el experimento mental no se encuentra necesariamente sujeta al paso del tiempo unidireccional y constante. Puede saltar, retroceder, iterar. No puede ser instantánea, como sucede con el experimento mental y no es analógica sino discreta, con una resolución determinada por el diferencial de tiempo elegido para la simulación paso a paso.

Estas maneras de visualizar el paso del tiempo en las distintas modalidades no impiden su representación uniforme en el mapa que estoy dibujando. Al gráfico anterior basta con añadir el descriptivo “tiempo” al eje horizontal (figura 14a). Más aun, es posible representar —algo que ayudará a la inclusión de elementos en este mapa— las tres etapas temporales de un experimento (figura 14b).

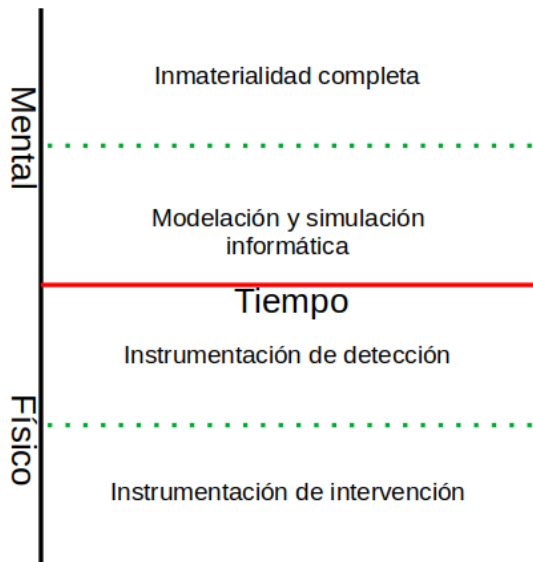


Fig. 14a. El eje del tiempo.

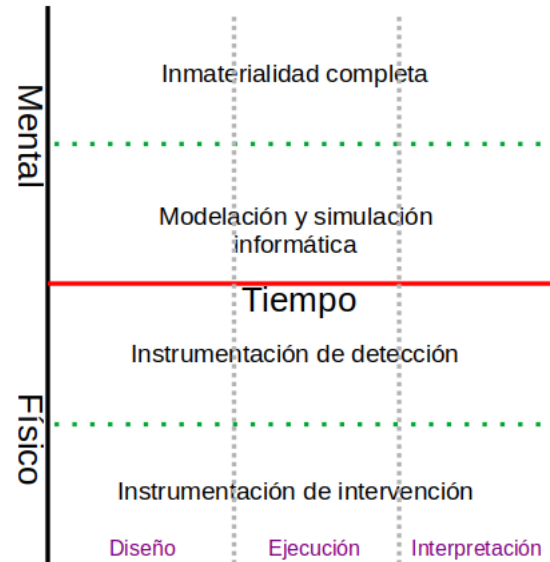


Fig. 14b. Las etapas temporales en un experimento.

La situación dentro del mapa metodológico en que se encuentre un experimento en un determinado momento de su desarrollo, le dota de cualidades que representaré en un **tercer eje** que resultará compuesto de diversas características.

La apertura de diseño experimental, cuando el instrumento es totalmente mental, está limitada solo por la hipótesis en estudio y el entramado teórico subyacente. De este modo se concluye una primera característica: a menor materialidad, mayor apertura a la creatividad del experimentador.

Cuando se requiere un instrumento material en la ejecución del experimento resulta en una valoración específica de factores experimentales. Un equipo sofisticado, específico para un experimento, significa una reducida flexibilidad al momento de la ejecución, mientras que un diseño que gravita más hacia el extremo mental o inmaterial facilita la modificación del diseño incluso con el experimento en curso. Este es un segundo factor: la

flexibilidad durante el experimento, mayor entre menos material sea el modo de ejecución.

Una tercera característica que no presenta un comportamiento tan lineal como los dos anteriores es el costo. Sin duda un experimento mental es ordinariamente más económico que uno apoyado en instrumentación física, pero en medio de estos extremos tenemos tanto la instrumentación de detección como la simulación informática, ambos pueden tener costos significativamente más elevados que los de una instrumentación de intervención y no exhiben un comportamiento tan claramente caracterizable. De este rasgo solo se puede decir que los extremos ofrecen una diferencia consistente pero los intermedios no.

Al hablar del segundo eje, el del tiempo, señalé que se comporta distinto en cada situación de la escala entre material e inmaterial. Ahora puedo añadir que en el extremo material la sucesión cronológica es estricta, en el extremo inmaterial es absolutamente libre llegando incluso a lo instantáneo, y el paso de un extremo al otro muestra una gradualidad que ofrece rasgos distintos en cada etapa, pero en cualquier caso en la medida en que el experimento se “desmaterializa” la sujeción al paso natural del tiempo es cada vez menor. Esto ofrece una cuarta característica.

De esta manera podemos añadir cuando menos estas cuatro características adicionales al mapa. El costo, como describí antes, no puede caracterizarse por completo pero en sus extremos es factible dar una orientación clara.

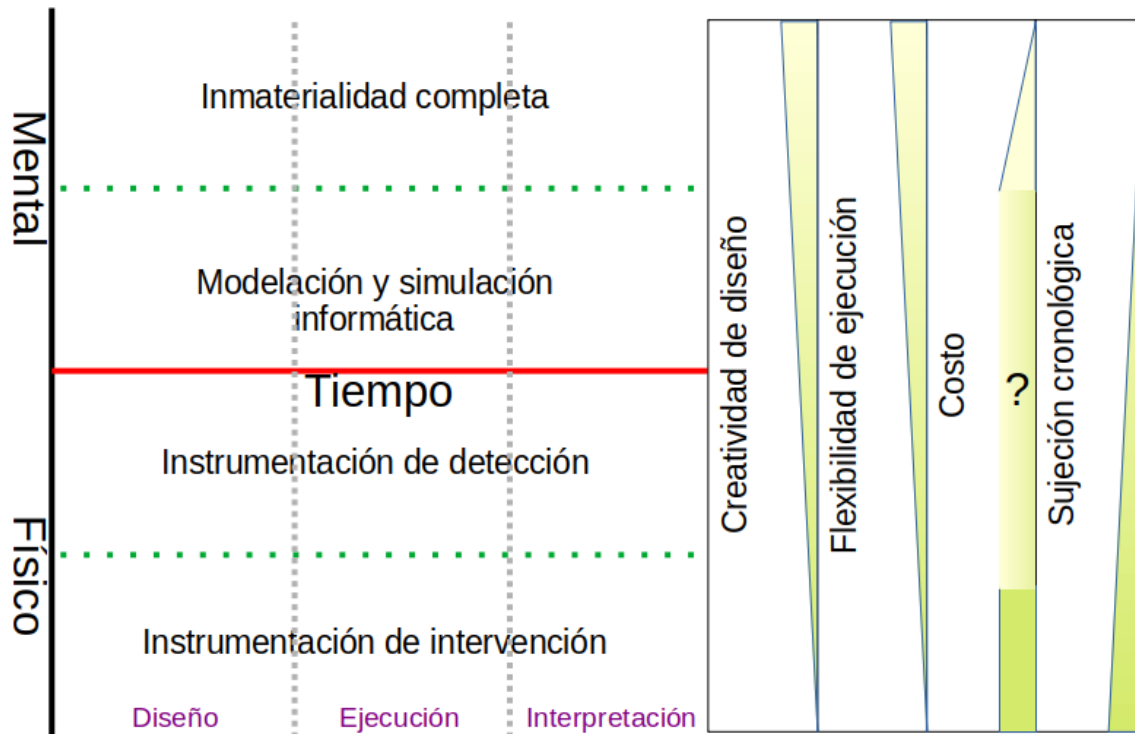


Fig. 15. Mapa metodológico.

Sería viable seguir añadiendo algunas cualidades más del experimento, como por ejemplo la incidencia de las condiciones extrínsecas, la relevancia de la precisión narrativa, etc., pero en aras de no producir una complejidad que aporte poco a la hipótesis que estoy ofreciendo, aquí detengo el añadido de características al mapa.

Para mostrar un poco mejor lo que quiero representar en este mapa, graficaré sobre él una consideración —no la única, bastante discutible— de un experimento entre los utilizados en estas páginas.

El EHT es un experimento que nace de un entramado teórico muy completo en cuanto a la ciencia subyacente e incluso con un conocimiento de la tecnología necesaria bastante bien determinado, pero al mismo tiempo se trataba de una aplicación tecnocientífica nunca antes ensayada. Desarrollar la tecnología necesaria no suponía una nueva instrumentación de detección: se apoyaría en observatorios ya existentes, sin necesidad de hacer modificación alguna sobre su capacidad de detección. La

diferencia vendría del modo de recopilar, correlacionar e interpretar la información.

Así, el trabajo de preparación fue eminentemente mental y de desarrollo de la herramienta informática que habría de realizar la conversión de un cúmulo ingente de información, en información coherente y susceptible de ser interpretada para lograr el resultado esperado.

Por eso, en la gráfica siguiente, he plasmado las siguientes etapas:

1. En el diseño el trabajo es mental y de desarrollo del programa informático de interpretación. Durante esta etapa la creatividad de los investigadores era máxima, exigía de ellos innovación y modos nuevos para lograr el resultado. La flexibilidad era muy alta pues si bien estaban limitados por los instrumentos que usarían, se encontraban todavía en una posición que permitiría mutar la operación experimental. El costo del experimento en esta etapa no fue bajo por la enorme colaboración intelectual que supuso el experimento, pero en comparación con los costos de los equipos de detección que utilizarían en la siguiente etapa experimental, se trataba de algo más pequeño. En la sujeción cronológica se presenta un contraste notable: durante el diseño los investigadores eran dueños del manejo temporal en el sentido de que podían esperar, iterar, reflexionar, volver sobre sus pasos, etc., cosa que — de manera notable— absolutamente no sucedería durante la ejecución.

2. Durante la ejecución, sin abandonar una esmerada atención (trabajo intelectual), los instrumentos de detección (los radiotelescopios) recopilaron los datos de observación y la infraestructura informática hizo acopio de la información. Este trabajo de detección se extendió por una semana y con ello terminó el trabajo estricto de medición. El costo se elevó notablemente al utilizar los equipos distribuidos en todo el mundo, la flexibilidad se tornó en casi nula y el momento de creatividad ya había pasado. Una de los retos tecnológicos mayores vino dado por la precisión de la cronología que el

experimento requería: sin entrar en detalles, era necesario saber *exactamente* a qué momento en el tiempo correspondía cada uno de los datos recogidos con la observación.

3. La interpretación supuso el momento más difícil de todo el experimento. Si bien podría decirse que “la información estaba ahí”, como mencioné antes, los datos empíricos no son conocimiento sino reflejo puntual de una realidad. Siguió el laborioso esfuerzo, lleno de ensayos e iteraciones, de transformar los datos en un resultado coherente hasta finalmente llegar a la imagen del horizonte de evento de un hoyo negro.

Podríamos representar el territorio ocupado por el EHT en el mapa metodológico más o menos de la siguiente manera (que podría afinarse aun más, pero basta para ofrecer un ejemplo):

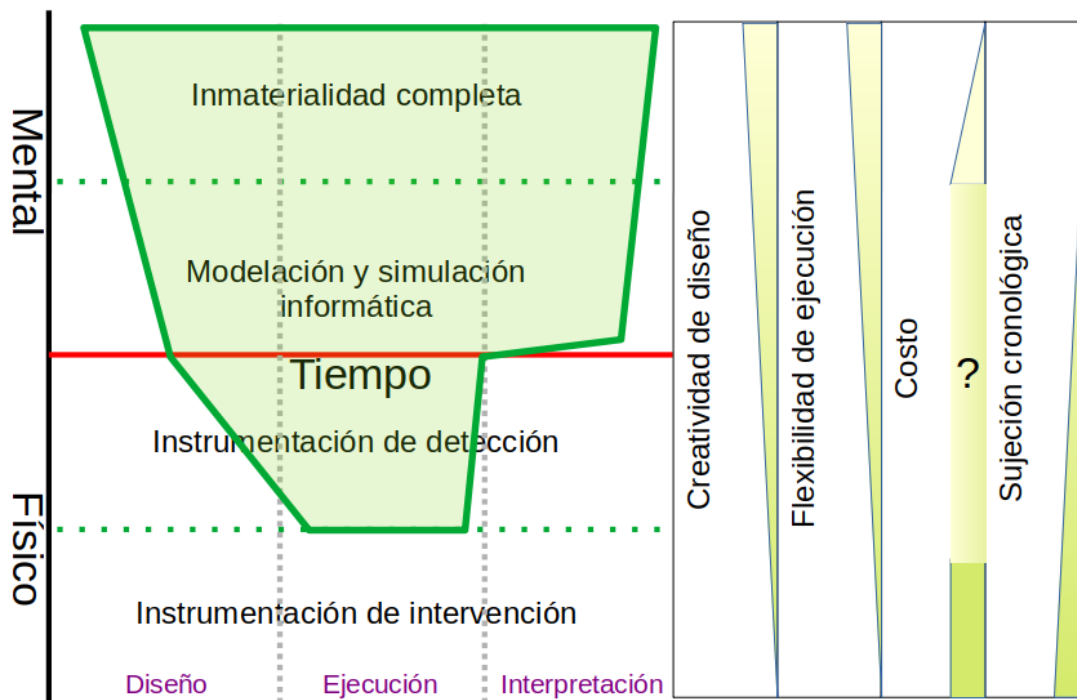


Fig. 16. El EHT graficado en el mapa metodológico.

¿Contiene este mapa todo lo que puede decirse respecto a las herramientas con que cuenta un investigador de ciencias experimentales? Lógicamente la respuesta es negativa. No obstante lo que pretendo es salir de las casillas polarizantes o

excluyentes tan presentes en la literatura sobre el experimento mental y la simulación informática, donde con demasiada frecuencia se pretende mostrar la superioridad absoluta de un instrumento, o la determinación prístina de una situación en una determinada caracterización.

Voy claramente más con el aprovechamiento de la idea de Galison: la metodología de las ciencias experimentales se parece más a un mapa que a un casillero. Ahora bien, este mismo mapa presenta una deficiencia que pone de manifiesto la riqueza de la metodología experimental. Es decir, el mismo mapa permite distintas formas de representación así como —por ofrecer una analogía— existen maneras diversas de representar la geografía terrestre³¹⁹: mediante un globo, un planisferio, una proyección cilíndrica de Miller, una transversal de Mercator, o las más especializadas y menos comunes de Mollweide, Goode, etc. Todas representan de modo útil y realista el territorio de la Tierra, pero cada una enfatiza una cualidad distinta, para lo que resulta útil. El siguiente modo de concebir el mapa tiene un eje principal distinto que provoca una inversión en las gráficas.

4.2.2. El eje del potencial epistémico

En las descripciones precedentes el determinante gráfico principal ha sido la materialidad puesto que es la primera característica que he considerado en todo el estudio. Sin embargo, así como a medida que he expuesto las cualidades de cada modalidad metodológica he procurado resaltar —concluyendo en la parte final del cap. 3— el valor epistemológico: es este precisamente el indicador que puede modificar la totalidad del mapa.

A continuación ofrezco una representación gráfica (un modelo, lo cual es casi una auto-referencia) del mapa metodológico pero con base en el poder epistémico de cada modalidad experimental.

319 GISGeography, “50 Map Projections Types: A Visual Reference Guide [BIG LIST]”, GIS Geography, el 3 de febrero de 2019, <https://gisgeography.com/map-projection-types/>.

¿En donde estriba la posibilidad de ofrecer una gradación epistémica en las distintas modalidades? Después de describir el experimento físico y el mental he construido sobre ellos con las “ampliaciones” o “extensiones”: añadidos propios de las ciencias experimentales que tienen la potencia de extender la capacidad cognitiva más allá de los límites naturales del hombre, tanto en lo físico como en lo intelectual.

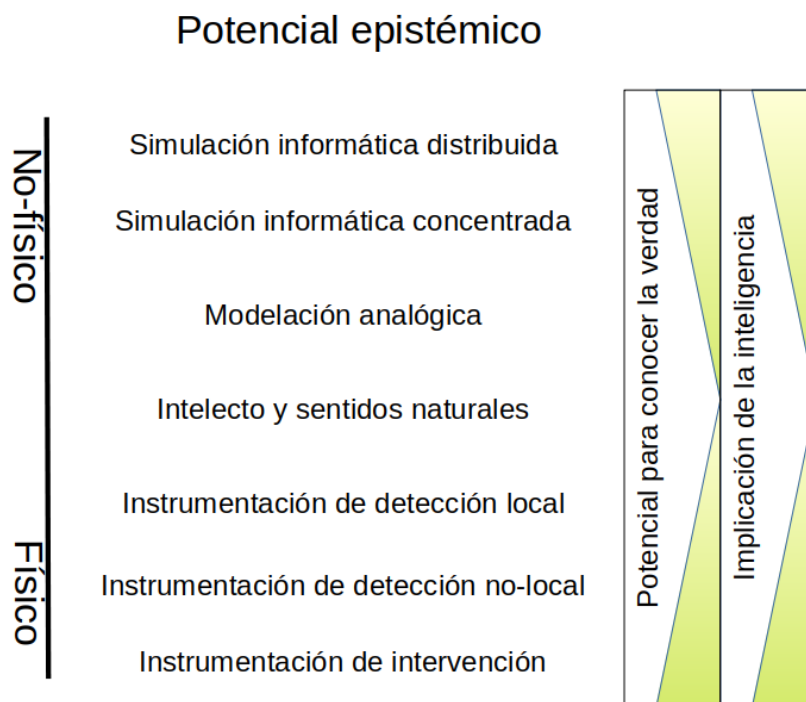


Fig. 17. Con el potencial epistémico como principal determinante.

Este modo de ver el mapa metodológico lleva a dos conclusiones que parecen bastante evidentes y que he plasmado en la figura anterior.

En primer lugar, extender el potencial tanto de colaboración intelectual, cómputo, memoria, etc. mediante la ampliación informática como de la capacidad de detección por encima de los sentidos del hombre, y de interacción más allá de sus límites físicos, tiene como consecuencia la posibilidad de llevar el descubrimiento que lleve a un conocimiento del mundo —como reiteradamente ha mostrado la historia— más allá de lo que el hombre es capaz con sus capacidades naturales.

En segundo término la ampliación instrumental, en cualquiera de los dos extremos, no convierte en inútil o innecesario el papel de la inteligencia sino que sucede al contrario. Este ha sido un ideal pedagógico largo tiempo deseado (y pocas veces logrado en la educación básica y superior): que al desocupar el trabajo de la mente de las tareas rutinarias mediante el uso de la informática, la inteligencia sería capaz de elevarse a niveles superiores y así desentrañar verdades más profundas, antes vedadas a las cualidades naturales. Considero que en el desarrollo ordinario de las ciencias experimentales esto sí sucede, como muestran numerosos ejemplos históricos.

Menciono dos muy simples: el uso de las tablas de logaritmos superó los cálculos manuales; el uso de la calculadora superó las tablas; el uso de la computadora superó la calculadora; el resultado hasta hoy es que un investigador puede ahora aplicar su intelecto a la porción superior de las matemáticas cuando antes gastaba su tiempo y potencial en operaciones básicas.

De igual modo los instrumentos de Brahe para astrometría superaron la vista al natural; el telescopio superó los instrumentos de Brahe; la fotografía extendió la capacidad ocular; la computación admitió la manipulación de imágenes ocultas, y en este caso la línea también sigue abierta a nuevos avances que ahora permiten al investigador ni siquiera usar sus ojos para estudiar las estrellas. En ambos casos la mente está ahora utilizando su potencial en sitios de mayor elevación a donde no habría llegado de no contar con esas ampliaciones.

¿Cómo aparecería el EHT ahora graficado sobre el mapa regido por el poder epistémico? Nuevamente es una visión parcial y sujeta a diversas interpretaciones y representaciones, pero ofrezco un resultado que bien pudiera servir para la base de un diálogo acerca de la epistemología de cada una de las modalidades experimentales.

Resultaría sobresaliente en su contenido informático distribuido y en la instrumentación de detección no-local, a la vez que se aprecia

nulo en la modelación analógica, la detección local y la intervención.

El objetivo de esta gráfica es enfatizar el hecho de que, gracias al uso de las extensiones de las capacidades naturales del hombre — instrumentación de detección y simulación informática— la capacidad del experimento no-físico y no por eso mental, permite un conocimiento del mundo que no se encuentra al alcance de las capacidades naturales del hombre.

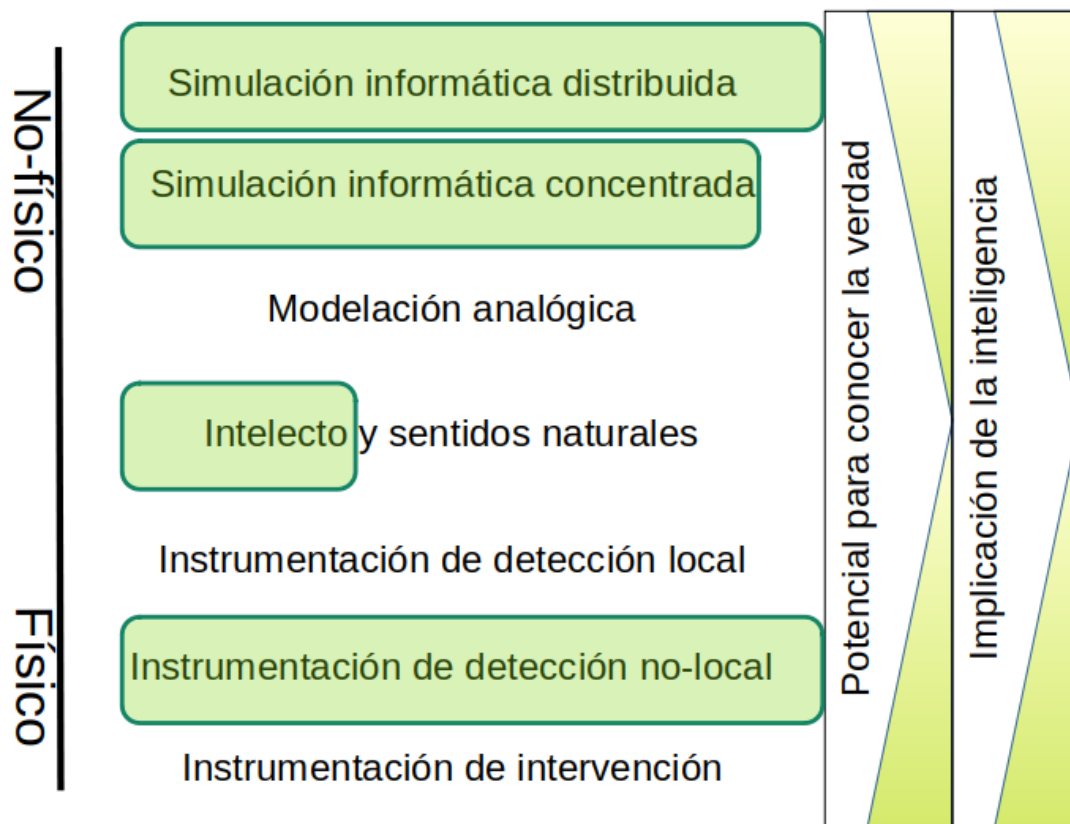


Fig. 18. El EHT sobre el mapa metodológico basado en el potencial epistémico.

Esta reflexión quedaría incompleta si no enfatizara un punto primordial: estoy hablando del poder epistémico en las ciencias experimentales. Las disciplinas más ricamente especulativas como la filosofía, o con una dosis más fuerte de recurso a la reflexión como son las humanidades en general, pueden verse notablemente debilitadas cuando se trata de materializar

innecesariamente su método de adquisición de conocimiento. Una porción importante de lo que he dicho hasta ahora es inaplicable a las humanidades: estoy enfocando un tema científico desde un enfoque filosófico, pero no estoy hablando de la filosofía.

4.2.3. Diagrama del método experimental

La expresión gráfica precedente enfoca el sitio del experimento mental y la simulación informática en el mapa metodológico de la ciencia experimental, pero bajo la óptica de un experimento concreto.

Tal como en la geografía es posible —incluso deseable— contar con distintas representaciones de la realidad territorial, y así como he señalado que una de las cualidades de un modelo es la reducción y la idealización, así también el mismo mapa que he presentado se adscribe a esas mismas condiciones.

Por este motivo, como una muestra más de la descripción cualitativa que he practicado en las páginas precedentes, ahora presentaré una nueva alternativa de mapeo sobre el método de la ciencia experimental, pero desde un punto de vista más operativo. El diagrama de flujo es una herramienta tradicional en el análisis de operaciones y dibujar algunos contenidos de esta tesis bajo esta forma gráfica puede contribuir a una mejor representación —con una similitud formal complementaria, no omniabarcante— del mapa metodológico.

A continuación, presento tres diagramas de flujo que, enfatizando distintos aspectos y, por así decirlo, desde distancias variadas (con mayor o menor nivel de detalle) modelan la ciencia experimental en su variedad metodológica. Aclaro que seré un tanto libre en el rigor del uso simbólico de los diagramas y no me atenderé del todo al significado ordinario de cada figura: he buscado que resulte inequívoco el mensaje que estoy plasmando. En todos los casos utilizo elementos que he desarrollado y explicado en esta investigación.

El primero marca una secuencia cronológica, con las etapas tradicionales del desarrollo de un experimento. Lo que pretendo resaltar en este es el papel del agente epistémico en cada etapa. Es una representación más bien general de un experimento.

Refiere esencialmente a la sección 1.3, que considero una de las más profusas y con mayor aportación en la preparación argumental que desemboca en los cap. 3 y 4.

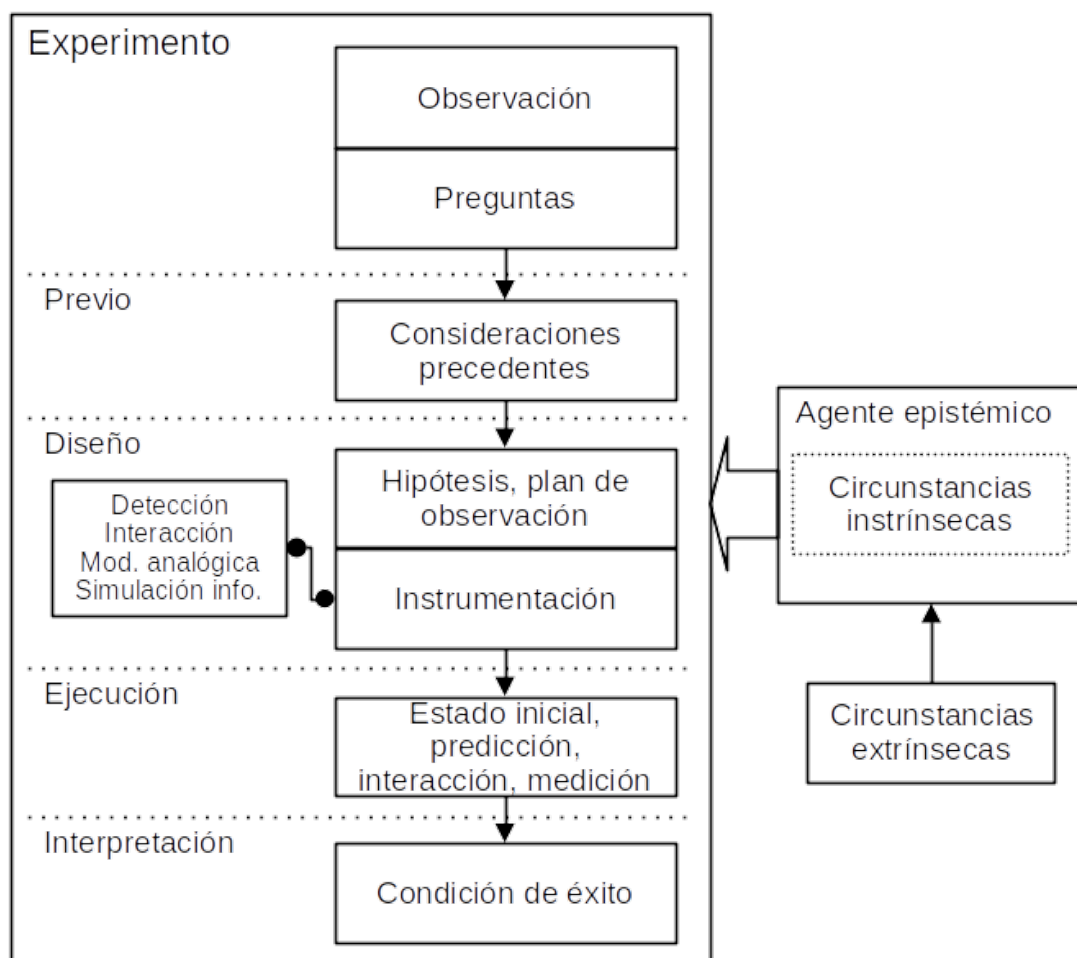


Fig. 19. Desarrollo de un experimento.

Esta segunda representación refiere a la sección 2.4, que también resulta más detallada. Esta simplificación busca mostrar los componentes de un experimento mental, resaltando la influencia del diseño en el agente, del agente en los instrumentos, y de las condiciones del agente en todo el experimento. Esto es otro modo de representar —de la sección 1.3.2.— las circunstancias intrínsecas y extrínsecas.

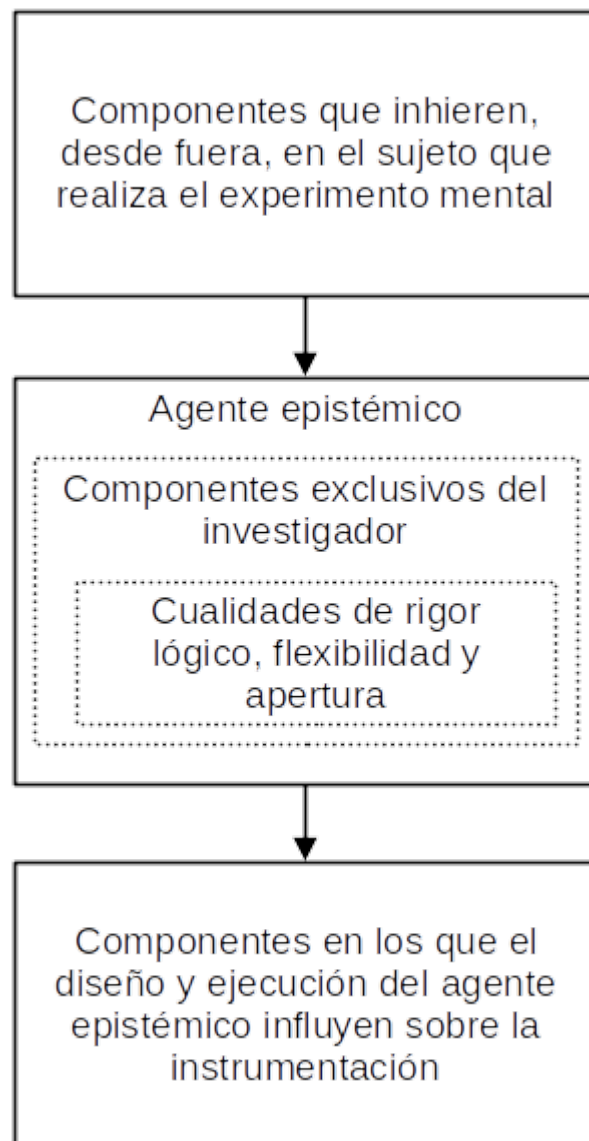


Fig. 20. Componentes del experimento mental y su incidencia.

El tercer diagrama sitúa, de modo muy resumido, el sitio de la simulación informática y del experimento mental en el proceso experimental.

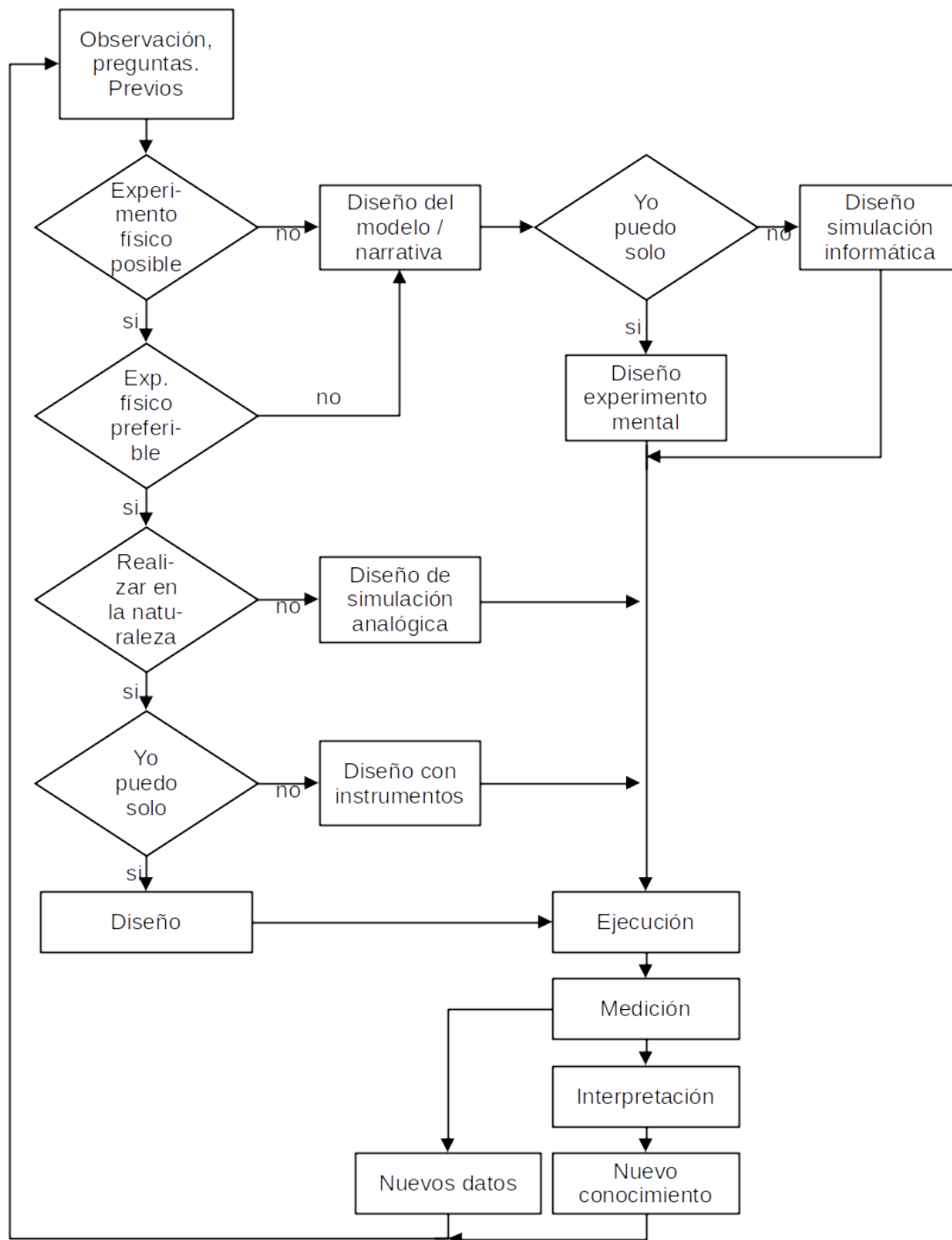


Fig. 21. Árbol de decisión en el recorrido experimental.

Con las primeras dos representaciones busco particularmente resumir las secciones 1.3 y 2.4, extensas como resultado de la investigación. En la tercera intento responder al planteamiento central de esta investigación, pero de modo gráfico a través de un modelo que busca guardar una similitud formal con el proceso de la ciencia experimental. Este tercero evidentemente no abarca todo lo contenido en la presente investigación, solo pretende dar los elementos más generales para ubicar al experimento mental y la simulación informática en uno de sus posibles lugares. La realidad conlleva numerosas decisiones adicionales. La representación como diagrama de flujo unida al mapa metodológico del resto de esta sección se complementan para dar una mejor idea de las conclusiones a las que he llegado.

4.3. Navegar por el mapa metodológico

¿Cómo desplazarse a través de estos mapas metodológicos?

El itinerario de las páginas precedentes recoge tanto los resultados de la investigación sobre numerosas fuentes documentales, como mi propia evolución en cuanto a la comprensión reflexiva sobre el método de la ciencia experimental. El perfil interdisciplinar del programa doctoral en esta Universidad ha resultado un impelente de relevancia para procurar una apertura no solo a las ciencias naturales y a la filosofía sino que he procurado recoger —si bien de modo necesariamente limitado— las aportaciones de la psicología, la historia, la antropología y algunos toques de otras ramas del saber.

Así, ha sido posible considerar las implicaciones psicológicas que afectan una disciplina aparentemente tan sistemática y objetiva como la ciencia experimental al hablar de los condicionamientos intrínsecos y extrínsecos; o también tomar en cuenta elementos de un experimento que fortalecen su identidad y replicabilidad como la importancia de una narrativa sólida y consistente; incluso pasar por encima de —en el estudio de los conceptos de observación, experiencia y experimentación— esas otras formas de alcanzar

conocimiento como el diálogo y la discusión, sin dejar fuera las cualidades de la persona especialmente en la forma de hábitos intelectuales y virtudes fundamentales.

A la luz del desarrollo presentado en este trabajo, en el que he podido descubrir y explorar áreas que no solo me resultaron desconocidas y novedosas sino que noté ausentes en la literatura examinada, mi postura es que no puede determinarse que un método es superior a otro de modo absoluto sino que el investigador valora su realidad para determinar el curso a seguir. Digamos que desde el punto de partida, en el diseño de su experimento, determina los componentes metodológicos por dónde quiere moverse —dentro de este mapa— en cada parte de su investigación. Más aun, si bien lo que tradicionalmente se denomina experimento mental encuentra unos rasgos bastante identificables, supone un error considerar el experimento físico como si estuviera carente de componentes fuertemente mentales.

Como ya he mostrado, cada autor tiende a atribuir mayor valor a un método sobre otro, en ocasiones de manera absoluta y en descalificación de otra modalidad. La literatura está plagada de contrastes, dicotomías, campos de batalla. La identificación y caracterización precisa ayuda a reconocer las potencialidades y deficiencias de cada método pero su presentación como conflictos en busca de preponderancia ocasionan un alejamiento de la percepción real de su riqueza.

A la luz del proceso de pensamiento que nos ha llevado hasta este punto, presento algunas conclusiones que abarcan dos posibilidades: una toma de postura sobre las posiciones encontradas en algunos casos, y aportaciones que no he encontrado —o al menos así descritas— en la bibliografía estudiada.

4.3.1. El continuo en el mapa metodológico

La identificación de elementos y condiciones en cada una de las modalidades experimentales muestran que la similitud al hablar

de una y otra es muy grande. Existen sin embargo, algunas cualidades que aconsejan el uso de una metodología concreta en algunas situaciones, o una combinación de ellas: a veces, a manera de complemento epistémico (cada una construye hacia la verdad desde un ángulo distinto), a veces a manera de sustituto (cuando un método, incluso siendo deseable, es inviable). En la medida que un investigador se encuentra abierto a la posibilidad de navegar en este mapa metodológico, contará con recursos adicionales que le permitan llegar más lejos y más profundo en su investigación. Mi posición es que cada postura ofrece características de interés que aportan fuertemente al estudio y la radicalización puede lesionar la claridad acerca de la caracterización de la metodología experimental en todas sus modalidades y la riqueza que este camino puede aportar al conocimiento.

4.3.2. Instrumentación como extensión por ambos extremos

El distintivo más evidente para movernos por la gama de posibilidades de la ciencia experimental es la presencia de instrumentos experimentales, que pueden adoptar esencialmente tres formas: para la detección, para la interacción y para el cómputo, relación o procesamiento. Este último tipo tiene la característica de ser no-específico en su materialidad puesto que la especificidad en una determinada situación experimental viene mayormente otorgada por la plasmación del intelecto del investigador en el programa que es ejecutado por ese instrumento. Mientras que los instrumentos de detección e interacción nos alejan en apariencia del experimento mental, el instrumento de cómputo nos coloca en el extremo opuesto de la escala: como una extensión del experimento mental, a pesar del hecho de contar con un elemento innegablemente material.

Así como la instrumentación de detección o de interacción suponen una extensión a las capacidades físicas naturales del hombre, del mismo modo la modelación y simulación informática supone una ampliación de las cualidades intelectuales del

investigador. Respondiendo de modo directo a la pregunta presentada por varios autores, como el caso de Roush³²⁰, adopto la posición de que no suponen en sí mismas categorías distintas sino que conforman un continuo en el elenco de recursos del hombre que hace ciencia.

4.3.3. Base teórica sólida

Existen situaciones en las que una u otra metodología es exigida por el sistema objetivo: razones de viabilidad en distintos aspectos pueden inclinar a una preponderancia de experimento físico u ofrecer como única alternativa una simulación apoyada en una modelación matemática con elementos idealizantes. En cualquiera de los casos, es requisito una base teórica consistente que oriente el diseño del experimento y la hipótesis a probar. Sin embargo, el experimento físico puede orientarse con más decisión a la comprobación de hipótesis básicas, con fundamentos teóricos aun en desarrollo, mientras que los mentales y las simulaciones requieren —en caso de no fundamentarse en teorías bien conocidas, o incluso en falsificaciones deliberadas— de una atención especial a las debilidades teóricas y conciencia, o al menos hipótesis, hacia dónde pueden desviarse los resultados como consecuencia de esa debilidad.

4.3.4. El papel de la inteligencia

El papel de la mente es mucho más amplio de lo que se suele plantear. Es decir, el experimento es llevado a cabo —con o sin instrumento material— por un agente epistémico. La mente es esencial incluso en un experimento patentemente físico. Este papel de la mente que lo impregna todo merece una consideración distinta pues hablar de un experimento mental como si en el físico la mente jugara menos o poco, resulta fácilmente lesivo de la comprensión plena sobre el valor epistémico del experimento en la mente o en el instrumento informático.

320 Roush, "The Epistemic Superiority of Experiment to Simulation".

La categorización de las condiciones intrínsecas y extrínsecas que pueden afectar el diseño, desarrollo e interpretación de cualquier experimento resalta la íntima unidad entre la mente y cualquier desarrollo experimental.

Termino este trabajo con una consideración que me parece inquietante. Paul Humphreys señala que “las simulaciones informáticas pueden generar conocimiento que resulta inaccesible por otros medios, porque involucra las propiedades emergentes de los sistemas complejos”³²¹.

Dos cosas me llaman poderosamente la atención sobre este texto. Para detallar la segunda, explico con algo de profusión la primera. ¿De qué habla Humphreys?

Los sistemas complejos son aquellos que se caracterizan por estar compuestos por múltiples elementos interconectados que interactúan entre sí de maneras no lineales y dinámicas. Algunas de las propiedades emergentes de los sistemas complejos son:

1) Autoorganización: los sistemas complejos tienen la capacidad de organizarse y reorganizarse a sí mismos sin la necesidad de una dirección externa.

2) Adaptabilidad: los sistemas complejos pueden cambiar y adaptarse a nuevos entornos y situaciones, lo que les permite sobrevivir y evolucionar.

3) Coevolución: los elementos de un sistema complejo pueden evolucionar en conjunto y adaptarse mutuamente, generando una complejidad creciente.

4) Retroalimentación: los sistemas complejos pueden recibir información de su entorno y ajustar su comportamiento en consecuencia, lo que les permite mantener un equilibrio dinámico.

321 Humphreys, *Extending Ourselves*, 36.

5) Emergencia: los sistemas complejos pueden dar lugar a nuevas propiedades y comportamientos que no se pueden predecir a partir de las propiedades de los elementos individuales.

En resumen, las propiedades emergentes de los sistemas complejos se refieren a las características que surgen a nivel del sistema y que no pueden ser explicadas por las propiedades de los elementos individuales que lo componen. Estas propiedades son fundamentales para entender el comportamiento de los sistemas complejos y su capacidad para adaptarse y evolucionar en entornos cambiantes³²².

Es decir, la capacidad de auto-organización de un sistema natural o informáticamente simulado es susceptible de producir resultados nuevos e inesperados, como señala el n. 5 precedente. No se trata de una conclusión lógica de la información previamente contenida, sino de una emergencia epistémica, un surgimiento de nuevo conocimiento donde parecía no estar presente.

El **segundo** punto guarda estrecha relación con el texto que copié en cursiva: ese texto no es una cita de autor alguno ni tampoco lo escribió el redactor de esta tesis. A fines del año 2022 se puso a disposición del público una poderosa herramienta de IA³²³, proveniente de una iniciativa llamada *OpenAI*³²⁴. Esta herramienta, que se llama *ChatGPT*³²⁵, es un modelo de lenguaje a manera de conversación que

está pre-entrenado en grandes cantidades de datos para generar texto en lenguaje natural. Los modelos GPT se han utilizado para una variedad de tareas relacionadas con el

322 Pocas líneas más adelante aclaro por qué esta cita no refiere a autor alguno.

323 Inteligencia artificial, en inglés es AI.

324 "OpenAI", OpenAI, consultado el 21 de febrero de 2023, <https://openai.com/>.

325 "ChatGPT", consultado el 21 de febrero de 2023, <https://chat.openai.com>.

lenguaje, como la traducción de idiomas, la respuesta a preguntas y la finalización de texto

como la herramienta se explica a sí misma. El texto en cursiva responde a la petición siguiente: “describe brevemente las propiedades emergentes de los sistemas complejos” y el resultado que he copiado es la totalidad de la primera respuesta que entregó la IA.

Me pareció de interés cerrar este estudio simplemente señalando la existencia de esta nueva modalidad de simulación informática. En prácticamente toda la argumentación y literatura que he abordado durante estas consideraciones, me he referido a la simulación informática como el resultado ejecutivo de un modelo que reduce, idealiza, falsifica y representa en lenguaje matemático una realidad del mundo físico. El advenimiento de la IA supone casi una reflexión de la técnica, puesto que ya no es la informática extendiendo a la inteligencia para llegar más lejos, sino que es la informática simulando la inteligencia misma, extendiendo así su alcance sobre los modelos que se le presenten.

Simular a la inteligencia produce el instrumento no específico más poderoso hasta ahora concebido y es de suponer que el poder epistémico que de aquí se seguirá permitirá —ya está sucediendo— llegar a descubrimientos y conocimientos nuevos que exceden de todo punto la capacidad de la razón natural del hombre. Es producido por el hombre, entrenado por el hombre, pero en aspectos como capacidad de relación extensa, amplitud de base de conocimiento y otras similares, supera a la inteligencia y abre nuevas puertas de conocimiento.

No es absolutamente lógica, como se trasluce en la cita de Humphreys, pero tampoco es pensar, pues carece de abstracción y más bien se apoya en una inmensa acumulación de particulares: se trata de una muy buena simulación, reductiva en aspectos esenciales pero inmensamente amplificada en otros con un resultado que parece pensamiento, parece creatividad, abre puertas al conocimiento nuevo, educa las propiedades emergentes

de sistemas complejos, ofrece una mirada que abre a la reconsideración novedosa. Pero no está dotado de intuición o de reflexión: no es inteligencia. Es una simulación artificial de la inteligencia.

Bohr, en mi opinión, fue muy acertado al exigir de Einstein que pensara y no solo fuera lógico. Ambas son formas de enfrentar con fruto la adquisición de conocimiento. Ambas son necesarias y patentes en el método de la ciencia experimental cuando el agente epistémico navega por los territorios complementarios del mapa metodológico de la ciencia experimental.

Bibliografía

- Abbott, B. P., R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, et al. "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger". *Physical Review Letters* 116, núm. 6 (el 11 de febrero de 2016): 061102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- Adler, Mortimer. *The Syntopicon: An Index to the Great Ideas*. 2nd ed. Vol. II. 2 vols. Great Books of the Western World: A Chronology of the Great Authors. Chicago, USA: Encyclopaedia Britannica, 1990.
- Aguilar M., Yirsén, y Ángel E. Romero. "A propósito de los experimentos mentales: una tentativa para la construcción de explicaciones en ciencias". *Revista científica* 1, núm. 13 (el 19 de agosto de 2011). <https://doi.org/10.14483/23448350.613>.
- Alexandrini, Pappi. *Mathematicae collectionis*. Traducido por Federico Commandino, 1308.
- Aquino, Tomás de. "Quaestiones disputatae de veritate, q. 2-4", 1274. <https://www.corpusthomisticum.org/qdv02.html>.
- — —. "Suma Teológica". Traducido por Hernán J. González. Suma teológica, versión web, 1274. <https://hjj.com.ar/sumat/>.
- Arnold, Eckhart, y Johannes Kästner. "When Can a Computer Simulation Act as Substitute for an Experiment? A Case-Study from Chemistry". Preprint, el 4 de julio de 2013. http://eckhartarnold.de/papers/2013_Simulations_as_Virtual_Experiments/Simulations_as_Virtual_Experiments.html.
- Asimov, Isaac. *Momentos estelares de la ciencia*. Madrid: Alianza, 2008.
- Asociación de Academias de la Lengua Española. "Diccionario de la lengua española". «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Consultado el 21 de agosto de 2021. <https://dle.rae.es>.
- Bacon, Francis. *Novum Organum; Or, True Suggestions for the Interpretation of Nature*. Project Gutenberg. Consultado el

22 de mayo de 2022.

<http://www.gutenberg.org/ebooks/45988>.

Ball, Robert S. *Great Astronomers*. Versión Kindle., 1895.

Bar, Moshe. *Mindwandering: how your constant mental drift can improve your mood and boost your creativity*. First edition. New York: Hachette Go, 2022.

Barrio Marin, Facundo Alejandro. “Desarrollo del papel de la experiencia y del experimento en la historia de la ciencia moderna”. *instname:Universidad FASTA*, 2012.

<http://redi.ufasta.edu.ar:8080/xmlui/handle/123456789/549>.

BBC News. “Facebook Emotion Experiment Sparks Criticism”. el 30 de junio de 2014, sec. Technology.

<https://www.bbc.com/news/technology-28051930>.

Benedicto XVI, Papa. “Discurso al mundo de la cultura”. Consultado el 22 de mayo de 2022.

https://www.vatican.va/content/benedict-xvi/es/speeches/2006/september/documents/hf_ben-xvi_spe_20060912_university-regensburg.html.

“Biografía de Arthur Stanley Eddington”. Consultado el 1 de diciembre de 2022.

<https://www.biografiasyvidas.com/biografia/e/eddingon.htm>.

Boge, Florian J. “Why Trust a Simulation? Models, Parameters, and Robustness in Simulation-Infected Experiments”. Preprint, 2021. <http://philsci-archive.pitt.edu/19318/>.

Bokulich, Alisa, y Mélanie Frappier. “On the Identity of Thought Experiments: Thought Experiments Rethought”. Published Article or Volume. *The Routledge Companion to Thought Experiments*. Routledge, 2017. <http://philsci-archive.pitt.edu/14375/>.

Brennan, Pat. “Our Milky Way Galaxy: How Big Is Space?” *Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. Consultado el 24 de mayo de 2023.

<https://exoplanets.nasa.gov/blog/1563/our-milky-way-galaxy-how-big-is-space>.

- Brown, James Robert. *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*. 2nd ed. Philosophical Issues in Science. New York: Routledge, 2011.
- — —. “Thought Experiments Since the Scientific Revolution”. *International Studies in the Philosophy of Science* 1, núm. 1 (septiembre de 1986): 1 a 15.
<https://doi.org/10.1080/02698598608573279>.
- Brumfiel, Geoff. “Neutrinos Not Faster than Light”. *Nature*, el 16 de marzo de 2012. <https://doi.org/10.1038/nature.2012.10249>.
- — —. “Particles Found to Travel Faster Than Speed of Light”. *Scientific American*, el 22 de septiembre de 2011.
<https://www.scientificamerican.com/article/particles-found-to-travel/>.
- Buzzoni, Marco. “Pierre Duhem and Ernst Mach on Thought Experiments”. *HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science* 8, núm. 1 (el 1 de marzo de 2018): 1–27. <https://doi.org/10.1086/695720>.
- Caamaño, Aureli. “Experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos e investigaciones: ¿una clasificación útil de los trabajos prácticos?”, s/f, 8.
- “Cambrian Explosion | Paleontology | Britannica”, el 12 de abril de 2023. <https://www.britannica.com/science/Cambrian-explosion>.
- CERN. “The Large Hadron Collider”, el 21 de febrero de 2023.
<https://www.home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.
- “ChatGPT”. Consultado el 21 de febrero de 2023.
<https://chat.openai.com>.
- Cho, Adrian. “Reality Doesn’t Exist until You Measure It, Quantum Parlor Trick Confirms”. *Science*, el 20 de julio de 2022. <https://www.science.org/content/article/reality-doesn-t-exist-until-you-measure-it-quantum-parlor-trick-confirms>.
- Cioroai, Emilia, Thomas Kuhn, y Dimitar Dimitrov. “Supporting the Creation of Digital Twins for CESs”. En *Model-Based Engineering of Collaborative Embedded Systems*, 283–94.

- Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62136-0_14.
- “Climate Models | NOAA Climate.gov”. Consultado el 21 de enero de 2023. <http://www.climate.gov/maps-data/climate-data-primer/predicting-climate/climate-models>.
- Comellas, José Luis. *Historia sencilla de la ciencia*. Madrid: Rialp, 2009.
- Connolly, William E. “Experience & Experiment”. *Daedalus* 135, núm. 3 (julio de 2006): 67–75. <https://doi.org/10.1162/daed.2006.135.3.67>.
- Corsi, Giovanna, y Rossella Lupacchini. *Deduction, Computation, Experiment Exploring the Effectiveness of Proof*. 1st ed. 2008. Berlin; Springer, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-88-470-0784-0>.
- Duran, Juan Manuel. *Computer Simulations in Science and Engineering*. Consultado el 2 de febrero de 2023. <https://springerlink.up.elogim.com/book/10.1007/978-3-319-90882-3>.
- Elgin, Catherine Z. “Models as Felicitous Falsehoods”. *Principia: An International Journal of Epistemology* 26, núm. 1 (el 1 de junio de 2022). <https://doi.org/10.5007/1808-1711.2022.e84576>.
- — —. “True Enough”. *Philosophical Issues* 14 (2004): 113–31.
- El-Skaf, Rawad. “The Function and Limit of Galileo’s Falling Bodies Thought Experiment: Absolute Weight, Specific Weight and the Medium’s Resistance”. Preprint, mayo de 2018. https://www.pdcnet.org/pdc/bvdb.nsf/purchase?openform&fp=croatjphil&id=croatjphil_2018_0018_0001_0037_0058.
- El-Skaf, Rawad, y Cyrille Imbert. “Unfolding in the Empirical Sciences: Experiments, Thought Experiments and Computer Simulations”. *Synthese* 190, núm. 16 (noviembre de 2013): 3451–74. <https://doi.org/10.1007/s11229-012-0203-y>.
- “Event Horizon Telescope array on world map”. Consultado el 27 de mayo de 2023. <http://bhpire.uawebhost.arizona.edu/wp->

content/uploads/2018/07/resizeEHTarray_Marrone-copy.png.

Event Horizon Telescope Consortium. "Event Horizon Telescope". Consultado el 28 de enero de 2023.

<https://eventhorizontelescope.org/>.

— — —. "Press Release (April 10, 2019): Astronomers Capture First Image of a Black Hole". Consultado el 6 de febrero de 2023.

<https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>.

Fine Art America. "Herschel Infrared Light Experiments by Science Photo Library". Consultado el 27 de mayo de 2023.

<https://fineartamerica.com/featured/herschel-infrared-light-experiments-science-photo-library.html>.

Galilei, Galileo. "De Motu", 1687. <https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/library/61DNE4D2/index.meta>.

GISGeography. "50 Map Projections Types: A Visual Reference Guide [BIG LIST]". GIS Geography, el 3 de febrero de 2019.

<https://gisgeography.com/map-projection-types/>.

Goldsmith, Barbara. *Marie Curie, genio obsesivo*, 2022.

Goleman, Daniel. *La inteligencia emocional*, 2016.

"Gran Telescopio CANARIAS". Consultado el 4 de enero de 2023.

<http://www.gtc.iac.es/>.

Guitton, Jean. *El trabajo intelectual: consejos a los que estudian y los que escriben*. Madrid: Rialp, 2010.

— — —. *Mi testamento filosófico*. Traducido por Beatriz Gerez Kraemer. Madrid: Ediciones Encuentro, 1998.

Hawking, Stephen. *A Brief History of Time*. 10th Anniversary edition. New York: Bantam, 1998.

Horgan, John. *The End of Science: Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*. Helix Books. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub., 1996.

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=953811>.

- “Howard Gardner’s Theory of Multiple Intelligences | Center for Innovative Teaching and Learning”. *Northern Illinois University*, Instructional guide for university faculty and teaching assistants. Consultado el 23 de julio de 2022. <https://www.niu.edu/citl/resources/guides/instructional-guide/gardners-theory-of-multiple-intelligences.shtml>.
- Humphreys, Paul. *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. Oxford, New York: Oxford University Press, 2007.
- Imágenes de lo invisible: tomar la primera imagen de un agujero negro - Katie Bouman - 6/7/2019*, 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=glfON286APE>.
- Isaacson, Walter. *Einstein: His Life and Universe*. 1st edition. New York: Simon & Schuster, 2007.
- Isaacson, Walter, y Francisco Ramos. *Einstein: su vida y su universo*. Barcelona: Debolsillo, 2010.
- Kramer, Herbert J. “GAIA”. *Catalog. Satellite Missions*, el 2 de diciembre de 2013. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/gaia>.
- Kuhn, Thomas S. “A Function for Thought Experiments”. En *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*. University of Chicago Press, 1978. <https://doi.org/10.7208/9780226217239>.
- — —. *La estructura de las revoluciones científicas*. 4a ed. México: Fondo de Cultura Económica, 2013. <https://www.fondodeculturaeconomica.com/Ficha/9786071608253/F>.
- Le Bihan, Soazig. “Partial Truth versus Felicitous Falsehoods”. *Synthese* 198, núm. 6 (junio de 2021): 5415–36. <https://doi.org/10.1007/s11229-019-02413-4>.
- Leblanc, Maurice. *Eight Strokes of the Clock*. Read Books Ltd., 2015. <http://www.myilibrary.com?id=811191>.
- Lenhard, Johannes. “Thought Experiments and Simulation Experiments: Exploring Hypothetical Worlds”, 2016. <http://philsci-archive.pitt.edu/12350/>.

- “LHC at CERN, depiction on photograph”. Consultado el 27 de mayo de 2023.
https://mediastream.cern.ch/MediaArchive/Photo/Public/2008/0807031/0807031_01/0807031_01-A4-at-144-dpi.jpg.
- “LIGO Hanford”. Consultado el 27 de mayo de 2023.
https://www.ligo.caltech.edu/system/avm_image_sqls/binaries/52/jpg_original/HiResHanford_5.jpg?1465343234.
- LIGO Lab | Caltech. “LIGO Lab | Caltech | MIT”. Consultado el 12 de marzo de 2023. <https://www.ligo.caltech.edu/>.
- “Louis Pasteur - Vaccine Development | Britannica”, el 13 de diciembre de 2022.
<https://www.britannica.com/biography/Louis-Pasteur/Vaccine-development>.
- Mach, Ernst, y Erwin Hiebert. “On Thought Experiments”. En *Knowledge and Error: Sketches on the Psychology of Enquiry*, 134–47. Vienna Circle Collection. Dordrecht: Springer Netherlands, 1897. https://doi.org/10.1007/978-94-010-1428-1_11.
- Mäki, Uskali. “Models and the locus of their truth”. *Synthese* 180, núm. 1 (mayo de 2011): 47–63.
<https://doi.org/10.1007/s11229-009-9566-0>.
- Malik, Saira. “Observation Versus Experiment: An Adequate Framework for Analysing Scientific Experimentation?” *Journal for General Philosophy of Science* 48, núm. 1 (el 1 de marzo de 2017): 71–95. <https://doi.org/10.1007/s10838-016-9335-y>.
- Manktelow, Kenneth Ian. *Thinking and Reasoning: An Introduction to the Psychology of Reason, Judgment and Decision Making*. 1. publ. London: Psychology Press, 2012.
<https://ebookcentral.up.elogim.com/lib/updf-ebooks/detail.action?docID=958354>.
- Morris, William Edward, y Charlotte R. Brown. “David Hume”. En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta, Summer 2022. Metaphysics Research Lab,

- Stanford University, 2022.
<https://plato.stanford.edu/archives/sum2022/entries/hume/>.
- NASA. "In Depth | 1P/Halley". NASA Solar System Exploration. Consultado el 24 de mayo de 2023.
<https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/comets/1p-halley/in-depth>.
- — —. "In Depth | Sun". NASA Solar System Exploration. Consultado el 24 de mayo de 2023.
<https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth>.
- — —. "PGDA - Mars Gravity Field: GMM-3". Consultado el 28 de mayo de 2023. <https://pgda.gsfc.nasa.gov/products/57>.
- Nersessian, Nancy J. "In the Theoretician's Laboratory: Thought Experimenting as Mental Modeling". *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1992 (1992): 291–301.
- Newton, Isaac. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Editado por William Thomson y Hugh Glasgow. 3ª. Londres: Guil. & Joh. Innys, Regiae Societatis Typographos, 1726.
- NobelPrize.org. "All Nobel Prizes 2017". Consultado el 22 de marzo de 2023. <https://www.nobelprize.org/all-nobel-prizes-2017/>.
- Norton, John D. "Are Thought Experiments Just What You Thought?" *Canadian Journal of Philosophy* 26, núm. 3 (1996): 333–66.
<https://doi.org/10.1080/00455091.1996.10717457>.
- OpenAI. "OpenAI". Consultado el 21 de febrero de 2023.
<https://openai.com/>.
- Parker, Wendy S. "Does Matter Really Matter? Computer Simulations, Experiments, and Materiality". *Synthese (Dordrecht)* 169, núm. 3 (2009): 483–96.
<https://doi.org/10.1007/s11229-008-9434-3>.
- — —. "Evidence and Knowledge from Computer Simulation". *Erkenntnis* 87, núm. 4 (2022): 1521–38.
<https://doi.org/10.1007/s10670-020-00260-1>.

- — —. “Getting (Even More) Serious about Similarity”. *Biology & Philosophy* 30, núm. 2 (marzo de 2015): 267–76.
<https://doi.org/10.1007/s10539-013-9406-y>.
- — —. “Reanalyses and Observations”. *Bulletin of the American Meteorological Society* 97, núm. 9 (2016): 1565–72.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00226.1>.
- Parménides. *El poema doctrinal de Parménides*. Traducido por Miguel Zubiría. Universidad de Cuyo. Mendoza, Argentina, 2016.
https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/7654/elpoemadocrinalparmenides.pdf.
- Perovic, Slobodan, y Allan Franklin. “Experiments in Physics”. Editado por Edward N. Zalta. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, el 27 de febrero de 2015.
<https://plato.stanford.edu/entries/physics-experiment/>.
- Philippe, Jacques. *Llamados a la vida*. Madrid: Rialp, 2008.
- Pieper, Josef. *El ocio y la vida intelectual*. 1a ed. Madrid: Rialp, 1962.
https://www.academia.edu/6445088/JOSEF_PIEPER_El_ocio_y_la_vida_intelectual.
- Ptolemaeus, Claudius. *Almagest*. Alejandría, 150d. C.
<https://bertie.ccsu.edu/naturesci/Cosmology/Ptolemy.html>.
- Quino. “Mafalda sitio oficial de Joaquín Salvador Lavado (Quino)”. Consultado el 6 de enero de 2023.
<https://www.quino.com.ar>.
- Quora. “Imagen Tomada de: What Is the Best, Modern Explanation for the Results of Newton’s Bucket Experiment?” Consultado el 28 de mayo de 2023.
<https://www.quora.com/What-is-the-best-modern-explanation-for-the-results-of-Newtons-bucket-experiment>.
- ResearchGate. “Galileo’s Thought Experiment (Quoted from Miller, 2000).” Consultado el 28 de mayo de 2023.
https://www.researchgate.net/figure/Galileos-thought-experiment-quoted-from-Miller-2000_fig2_273520874.

- Rosling, Hans, Ola Rosling, y Anna Rosling Rönnlund.
Factfulness: ten reasons we're wrong about the world--and why things are better than you think. First edition. New York: Flatiron Books, 2018.
- Roush, Sherrilyn. "The Epistemic Superiority of Experiment to Simulation", 2015. <https://doi.org/10.1/Epistemic%20superiority%20of%20experiment%20to%20simulation%20-%202015%20-%20Synthese.pdf>.
- Saam, Nicole J. "What Is a Computer Simulation? A Review of a Passionate Debate". *Journal for General Philosophy of Science* 48, núm. 2 (junio de 2017): 293–309.
<https://doi.org/10.1007/s10838-016-9354-8>.
- Samant. "Uraniborg - 3D Render". Consultado el 6 de febrero de 2023.
<https://www.renderosity.com/gallery/items/2097189/uraniborg>.
- Schafto, Mike, Mike Conroy, Rich Doyle, Ed Glaessgen, Chris Kemp, Jacqueline LeMoigne, y Lui Wang. *Modeling, Simulation, Information technology & Processing Roadmap*. Technology Area 11. National Aeronautics and Space Administration, 2012. www.nasa.gov.
- Schrödinger, Erwin. "Die Gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik". *Die Naturwissenschaften* 23, núm. 48 (noviembre de 1935): 807 a 812.
<https://doi.org/10.1007/BF01491891>.
- Skow, Bradford. "On the Meaning of the Question 'How Fast Does Time Pass?'" *Philosophical Studies* 155, núm. 3 (2011): 325–44. <https://doi.org/10.1007/s11098-010-9575-3>.
- Sobel, Dava. *The glass universe: how the ladies of the Harvard Observatory took the measure of the stars*. New York, New York: Viking, 2016.
- Sorensen, Roy A. *Thought Experiments*. Vol. 17. Oxford University Press, 1992.
<http://course.sdu.edu.cn/G2S/eWebEditor/uploadfile/20121224164821178.pdf>.

- Steigerwald, Bill. "New Mars Gravity Map". Text. NASA, el 16 de marzo de 2016.
<http://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/mars-gravity-map>.
- Stevin, Simon. *Mathematicorum hypomnematum de statica*. Vol. Tomus Quartus. Lugodini Batavorum, 1605.
- Strevens, Michael. *Depth: An Account of Scientific Explanation*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 2011.
- Tao, Fei, y Qinglin Qi. "Make More Digital Twins". *Nature* 573, núm. 7775 (septiembre de 2019): 490–91.
<https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>.
- "The Origin of Life on Earth, Explained | University of Chicago News". Consultado el 24 de mayo de 2023.
<https://news.uchicago.edu/explainer/origin-life-earth-explained>.
- TheFreeDictionary.com. "empírico". Consultado el 1 de diciembre de 2022. <https://es.thefreedictionary.com/emp%C3%ADrico>.
- "Thermodynamics | Laws, Definition, & Equations | Britannica", el 15 de mayo de 2023.
<https://www.britannica.com/science/thermodynamics>.
- Vera Zorrilla, Gonzalo. "El experimento mental del cubo de Sir Isaac Newton". Universidad Panamericana, 2021.
- "What Is a Digital Twin? | IBM". Consultado el 27 de mayo de 2023. <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>.
- Winsberg, Eric. "A Tale of Two Methods". *Synthese* 169, núm. 3 (2009): 575–92.
- — —. "Computer Simulation and the Philosophy of Science". *Philosophy Compass* 4, núm. 5 (septiembre de 2009): 835–45.
<https://doi.org/10.1111/j.1747-9991.2009.00236.x>.
- — —. "Computer Simulations in Science". En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta y Uri Nodelman, Winter 2022. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2022.
<https://plato.stanford.edu/archives/win2022/entries/simulations-science/>.

- — —. “Models of Success versus the Success of Models: Reliability without Truth”. *Synthese* 152, núm. 1 (2006): 1–19.
- — —. *Science in the Age of Computer Simulation*. Chicago; University of Chicago Press, 2010.
<https://doi.org/10.7208/9780226902050>.