

La ciencia ante la complejidad: comprensión en simulaciones.

Rut del cielo García-Casal Quevedo.

Universitat de Barcelona. Facultat de Filosofia.

Tutor: Josep Macià

Asignatura: Trabajo fin de grado.

Curso: 2023-2024.

Resumen:

Actualmente, a grandes rasgos, se mantienen dos posturas acerca de la función de la comprensión. Para algunos autores la comprensión resulta derivada de la explicación e irrelevante para el papel explicativo. En cambio, otros autores destacan la centralidad de la comprensión en la elaboración de explicaciones. El objetivo de este trabajo es mostrar cómo en el estudio de fenómenos complejos, que actualmente está mediado en su faceta teórica por el uso de simulaciones, la idea estándar sobre comprensión (aquella en que se excluye el papel de la comprensión en el desarrollo explicativo) resulta insuficiente para dar cuenta cómo, de facto, se obtiene comprensión del estudio de los fenómenos complejos. Para ello se ofrece como ejemplo el caso de las simulaciones cosmológicas. Se argumenta que aquellos que reconsideran el papel de la comprensión pueden recoger mejor las nuevas exigencias de la ciencia contemporánea, que está estrechamente relacionada con el estudio de fenómenos complejos.

Índice:

1. Introducción.	3
2. Dos visiones de la comprensión.	5
3. Complejidad frente a la ciencia clásica: insuficiencia de los estándares de explicación y comprensión tradicionales.	9
4. Comprensión en simulaciones cosmológicas.	13
5. Conclusión.	16

Número de caracteres: 36.137

1. Introducción.

A mediados del siglo XX, uno de los temas que adquirió una relevancia central en los filósofos de la ciencia fue la explicación. El debate sobre la explicación comienza con el método deductivo nomológico de Carl Hempel. En dicha concepción de la explicación, el hecho a explicar (explanandum) es deducido de otros tipo de hechos donde reside el argumento explicativo (explanans). El explanans está constituido por una o más leyes junto a una serie de condiciones iniciales, de las cuales se deduce el explanandum. Resumidamente, la explicación se produce debido a que el explanans contiene razones que hacen esperable el explanandum¹.

Una de las condiciones de Hempel para que la deducción constituya una explicación, es que aquello que constituye el explanans ha de ser verdadero. Tal condición es expresada como “condición de adecuación empírica”: «Las proposiciones que constituyen el explanans han de ser verdaderas » (Hempel 1965, p. 248).

Que el explanans ha de ser verdadero quiere decir que las afirmaciones que constituyen el explanans han de tener algún tipo de corrección factual, lo que en la práctica implica que estén bien confirmadas (Hempel 1965).

Dicho requisito de verdad es heredado en las distintas concepciones posteriores sobre la explicación, como señala Jebeile en Jebeile & Kennedy (2015), el cual se materializa en la exigencia de precisión representativa² en las teorías y modelos explicativos.

En la práctica, la mayoría de explicaciones en la ciencia constituyen explicaciones basadas en modelos. Estas son explicaciones en las cuales el explanans apela a las propiedades o comportamientos que exhibe un modelo idealizado y que explican los rasgos que presenta el explanandum (Magnani & Bertolotti 2017).

¹ Esta esperabilidad del explanandum dado el explanans se hace necesaria en el método deductivo nomológico, y altamente esperable en el modelo Inductivo estadístico que reformula Hempel para aquellas explicaciones que no son necesarias, pero sí altamente probables. En estas también se mantiene la condición empírica.

²En términos generales, los modelos y teorías son representaciones de aspectos del mundo los cuales constituyen su sistema objetivo. Así, la precisión representativa refiere al grado de similitud que la representación guarda con lo real. De qué manera, o qué significa que los modelos y teorías representan es una cuestión extensa que no se tratará.

Dado que un modelo idealizado se entiende como una representación imprecisa, incompleta, y en algunos casos deliberadamente falsa, de su sistema objetivo respectivo, estas “falsedades” que suponen las idealizaciones entran en conflicto con la exigencia de verdad del explanans, es decir, de su representación precisa en la explicación.

Actualmente, existen dos posturas distintas acerca del papel que adquiere la idealización en el ámbito de la explicación. Estas dos posturas, que se desarrollarán con mayor detalle a lo largo de esta sección, son la "visión tradicional" o estándar de la explicación, y la "visión no tradicional" que se opone a la anterior. Dicha distinción es propuesta por Batterman (2009).

La "visión tradicional" sostiene que el papel explicativo está vinculado a la representación precisa de la estructura causal relevante del explanandum³ (e.g. Strevens, 2008), en contraste, la "visión no tradicional" argumenta que las idealizaciones aportan un componente esencialmente explicativo (e.g. Jebeile & Kennedy, 2015; Batterman, 2009; Bokulich, 2018).

Desde la visión tradicional, las idealizaciones presentes en los modelos explicativos científicos no son explicativamente relevantes. Las idealizaciones tienen un papel pragmático en la medida en que hacen el modelo más accesible al científico y distinguen entre los detalles causalmente determinantes del proceso y los detalles no determinantes. Mientras que el componente explicativo del modelo queda recogido en su representación verídica de los detalles causalmente relevantes para el explanandum, la idealización hace permanecer en silencio los detalles no relevantes los cuales omiten o representan falsamente. (Strevens, 2008).

Como señala Bokulich (2018), esta postura está muy ligada a una visión óptica de la explicación. A grandes rasgos, aquellos que sostienen que la explicación ha de partir de una representación precisa de los hechos del explanans, contemplan la explicación en sí misma como una realidad objetiva, es decir, ajena al sujeto que trata con la explicación. La explicación en este sentido es de carácter óptico al hablar sobre una relación empírica entre hechos tipo explanans y hechos tipo explanandum. La explicación trata de representar esta relación entre hechos, de ahí que el componente explicativo esté vinculado a la verdad y a la representación precisa del mundo.

³ La representación precisa de la estructura causal relevante excluye la idealización, dado que la idealización constituye una representación imprecisa o la ausencia de representación de determinados rasgos.

Esta visión de explicación como representación precisa de la estructura causal, dada la presencia de las idealizaciones en la práctica científica, lleva a algunos autores a defender la virtud epistémica de las idealizaciones en la medida en la que pueden de-idealizarse, es decir, ir incorporando mayor complejidad al modelo, haciéndolo más realista. El modelo es explicativo a pesar de las idealizaciones, si estas pueden de-idealizarse⁴.

Desde la visión no-tradicional, contrariamente, se defiende el papel esencial de las idealizaciones en el proceso explicativo. Jebeile y Kennedy (Jebeile & Kennedy 2015) defienden que, ciertamente, uno de los papeles que juegan las idealizaciones es el de omitir los detalles causalmente irrelevantes, pero no el único. Defienden un papel más activo de las idealizaciones en la explicación que va más allá de entender las idealizaciones por su potencial simplificador. Para ello Jebeile y Kennedy ejemplifican cómo la des-idealización no siempre resulta explicativamente virtuosa. Jebeile y Kennedy muestran cómo mediante la actividad comparativa del modelo idealizado con el des-idealizado puede derivarse una explicación, que no puede extraerse meramente de la des-idealización del modelo. Así, la explicación no surge de la representación precisa del modelo, sino de la relación entre el modelo idealizado y el modelo realista, lo cual dota a la idealización de un papel explicativo donde el modelo des-idealizado por sí solo no sería suficiente.

Esto ya apunta a la explicación como una actividad relacional, más que como un producto objetivo, dado que la explicación, como indican, no es algo intrínseco al modelo, sino que depende también del agente que compara ambos modelos.

Ver la explicación como un producto relativo (contexto dependiente) supone dejar de entender la explicación como realidad objetiva, como producto óntico.

En el contexto de este debate, algunos autores tratan de arrojar luz respecto al rol de las idealizaciones en el medio explicativo reconsiderando el papel que juega la comprensión en el proceso de explicación de un fenómeno. Se explora así la relación existente entre comprensión y verdad. Mientras que unos autores asocian la comprensión como un subproducto de la explicación, irrelevante para el papel explicativo, otros van a destacar su centralidad en la elaboración de las explicaciones.

⁴ Un resumen de estos argumentos puede verse en Batterman (2009).

El objetivo de este trabajo es mostrar cómo los intereses científicos actuales están ampliamente relacionados con el estudio de fenómenos complejos, para lo cual, los estándares epistemológicos⁵ de “explicación” y “comprensión” resultan insuficientes y limitantes. En cambio, se pretende señalar que las posiciones que reconsideran el papel de la comprensión en el contexto explicativo pueden recoger mejor las nuevas exigencias de la ciencia contemporánea. Dichas nuevas exigencias están estrechamente relacionadas con la incertidumbre presente en el estudio de fenómenos complejos.

2. Dos visiones de la comprensión.

La comprensión en Hempel había sido relegada a un sentimiento, carente de valor epistémico objetivo para la explicación, dado que, de acuerdo con los propósitos del positivismo lógico, se trataba de dar una teoría de explicación objetiva carente de aspectos subjetivos. La comprensión, como estado cognitivo del sujeto, se valora como epistémicamente irrelevante para la explicación objetiva del fenómeno, adquiriendo el papel de mera sensación subjetiva.

Algunos autores actuales como Khalifa (2017) heredan esta visión. Manteniendo una postura objetivista de la explicación, la comprensión queda excluida de la tarea explicativa. Así, la comprensión queda asociada con el conocimiento de una explicación correcta, es decir, un subproducto de la explicación (Lawler, Khalifa, & Shech 2023).

Otros autores como Henk de Regt resignifican el papel de la comprensión, desafiando esta visión objetiva de la comprensión (de Regt 2009). De Regt indica que la comprensión tiene un papel central en la construcción de explicaciones y no puede reducirse únicamente a la sensación psicológica que produce poseer una explicación. Esta “nueva” comprensión está relacionada con un papel pragmático de la comprensión necesario para la explicación, y necesario para la comprensión del fenómeno (de Regt 2017, 2023).

La relación explicativa entre explanans y explanandum, como se ha mencionado, en la práctica no es tan directa, sino que está mediada por modelos. (de Regt 2023).

A través del modelo, el científico trata de ajustar el fenómeno que es representado en el modelo a teorías y argumentos más amplios.

⁵ Con “estándares epistemológicos” se hace referencia a aquellos estándares ligados a una exigencia de verdad e independencia del papel del sujeto en la elaboración de conocimiento, como se muestra por ejemplo con la visión tradicional de explicación.

Como señala Regt, «los modelos idealizados no surgen de la nada: tienen que ser contruidos» (de Regt 2023, p. 22, traducción propia⁶). Los modelos consisten en la aplicación de la teoría al caso concreto que se quiere explicar⁷, donde la construcción requiere de habilidades del sujeto así como de inteligibilidad de la teoría, dos aspectos centrales que caracterizan el papel de la comprensión pragmática (de Regt 2009).

Resumidamente, las explicaciones están en la práctica científica mediadas por modelos. Esto quiere decir que el explanandum (es decir, el sistema concreto de estudio) se deriva de argumentos más amplios que constituyen el explanans, como por ejemplo, la teoría disponible acerca del ámbito de estudio del explanandum. En la construcción de dichos modelos Regt señala que se exhiben una serie de habilidades y de bienes epistémicos que constituyen el núcleo de lo que él entiende por comprensión pragmática.

Así, para poder desarrollar una explicación es necesario, siguiendo a Regt, que las teorías sean inteligibles. Una teoría es inteligible si dispone de ciertas virtudes⁸ que permiten el desarrollo de las habilidades del sujeto, es decir, si las teorías concuerdan o están adaptadas a las capacidades del sujeto, posibilitando el uso de la teoría por el sujeto. Algunos ejemplos de habilidades a las que refiere Regt incluyen la capacidad para realizar inferencias de la teoría, formular idealizaciones, o producir modelos que proporcionen visualización de la teoría.

Siguiendo a Regt, la inteligibilidad de la teoría es un aspecto pragmático, pues está vinculada a la capacidad del sujeto de usar la teoría. Así, la inteligibilidad es un aspecto relativo, depende del sujeto epistémico y del contexto. Esto no hace la inteligibilidad arbitraria, un criterio que sostiene para evaluar la inteligibilidad es: «Una teoría científica T (en una o más de sus representaciones) es comprensible para los científicos (en el contexto C) si ellos pueden reconocer las consecuencias cualitativamente características de T sin realizar cálculos exactos» de Regt (2009, p. 594).

⁶ En adelante todas las citas presentadas serán traducciones propias.

⁷ Como comenta Humphrey en (Humphrey 2004a, p.59), en la práctica, las teorías son una unidad demasiado grande y abstracta para ser útiles. Así, es extremadamente raro que se aplique una teoría completa a la descripción de los estados o la predicción de un caso concreto. Es por ello que se seleccionan partes de interés de dicha teoría. Esta selección se lleva a cabo en los modelos, junto a la representación específica y detallada del sistema de estudio que ofrece el modelo. Así, en el modelo se infiere el estado concreto de un sistema de la teoría disponible relevante para el caso.

⁸ La inteligibilidad puede referir a una variedad de virtudes. Más que una virtud, es un indicativo o criterio evaluativo de virtuosidad. Una teoría inteligible es una teoría que puede usarse, y esto puede depender de distintos aspectos virtuosos de la teoría. (de Regt 2009).

Luego poder realizar inferencias cualitativas sin entrar en cálculos cuantitativos, es un indicativo de que la teoría es inteligible al sujeto, y en este sentido, hay comprensión pragmática, dado que esto implica que el sujeto es capaz de usar la teoría (de Regt 2009).

La idea básica de la postura de Regt, es que la explicación no puede llevarse a cabo sin comprensión, dado que es crucial que el sujeto sea capaz de usar la teoría, que en la práctica se materializa en la construcción de modelos. Esto quiere decir, que la explicación no puede llegar a producirse si no tenemos en cuenta tales habilidades que median en la aplicación de la teoría, luego la explicación precisa de dichas habilidades. Este planteamiento se aleja de la visión óptica de la explicación, siendo la explicación una actividad relativa a un sujeto y un contexto.

Otra de las consecuencias relevantes de esta postura, es que la comprensión pragmática no precisa de ser factiva⁹.

Un aspecto a tener en cuenta es que Regt no está tratando de anular la comprensión factiva del fenómeno. Una explicación verdadera produce una comprensión factiva del fenómeno. Pero la explicación no es un hecho objetivo, sino que se produce, y para ello requiere de teorías inteligibles y de habilidades del sujeto, donde interviene la comprensión no factiva¹⁰.

En contraposición a esta postura de la comprensión pragmática, autores como K. Khalifa (Khalifa 2012) sostienen que tratar la cuestión de la comprensión con respecto a la explicación es redundante, dado que comprender un fenómeno no constituye más que el conocimiento de una explicación correcta de dicho fenómeno. La vinculación entre explanans y explanandum consiste simplemente en más conocimiento, conocimiento de las causas. En (Khalifa 2012) trata de desmontar las distintas defensas aportadas sobre el papel pragmático de la comprensión.

La comprensión para Khalifa queda recogida en cualquier teoría de explicación: «Resumidamente, la literatura actual sobre la comprensión puede ser reemplazada por las ideas actuales sobre la explicación sin lugar a pérdidas» (Khalifa 2012, p.21).

⁹ Traducción del inglés 'factive'. El término 'factivo' indica que el contenido de la proposición implica la verdad. La comprensión factiva está intrínsecamente ligada a la veracidad del contenido.

¹⁰ La comprensión no factiva, por contraposición a la comprensión factiva, es aquella cuyo contenido no precisa de estar basado en la verdad. En el caso de Regt, la comprensión no factiva (la comprensión pragmática) no está basada en contenido proposicional, sino en habilidades del sujeto, como por ejemplo, la capacidad de realizar idealizaciones. En la medida en que las idealizaciones constituyen falsedades, la comprensión pragmática se entiende como independiente de la verdad.

Khalifa argumenta que tanto comprensión como conocimiento de una explicación son estados mentales, mientras que la explicación, en cambio, refiere a hechos extramentales. La comprensión sería el conocimiento de estos mecanismos extra-mentales, según Khalifa.

Para Khalifa, el conocimiento de cualquier explicación no proporciona comprensión, sino que ha de ser conocimiento de una explicación correcta. Para ello, Khalifa señala que la explicación ha de ser verdadera. Esta vinculación de comprensión con conocimiento¹¹ implica que la comprensión ha de ser factiva.

Según Regt, el mero conocimiento proposicional del explanans no explica, y el conocimiento que se adquiere sobre cómo se subsume el explanandum en el explanans depende de habilidades, y dado que una habilidad difiere del conocimiento proposicional¹², resulta un rasgo novedoso no contemplado por lo general en las teorías sobre la explicación (de Regt 2023). Además, como se ha mencionado, Regt señala que si se sostiene que la comprensión no es más que conocimiento de una explicación correcta, la comprensión ha de ser verdadera y por tanto, también los modelos y teorías que constituyen la explicación han de ser verdaderas o aproximadamente verdaderas. El problema para Regt reside en que la verdad es un requisito muy fuerte.

En esta sección se han mostrado dos posturas acerca del papel de la comprensión científica en las explicaciones.

La postura de Khalifa (2017) se mantiene apegada a las ideas más tradicionales de explicación y comprensión científica que asocian comprensión con estados mentales del sujeto no relevantes para la explicación. Desde esta postura Khalifa señala que la comprensión no es más que el conocimiento proposicional obtenido a partir del conocimiento de una explicación verdadera. En este sentido, se asocia la comprensión al conocimiento y por lo tanto se trata con una comprensión factiva. Es decir, lo que produce comprensión está ligado a la verdad. La explicación se mantiene así como algo independiente del sujeto, como un hecho objetivo.

La postura alternativa planteada por Henk de Regt (2009, 2023), señala un papel de la comprensión científica que resulta esencial para el desarrollo de la explicación, y por lo tanto, para la obtención de comprensión del fenómeno. Este papel consiste en lo que llama

¹¹ En el contexto de este debate, es de consenso que el conocimiento implica verdad.

¹² El intelectualismo sostiene que sí, pero el debate con Khalifa excluye el intelectualismo (de Regt 2023)

“comprensión pragmática” y en la medida en que este tipo de comprensión involucra aspectos contextuales como las habilidades del sujeto y la inteligibilidad de la teoría, desafía la visión objetivista de la postura de Khalifa. Además, dado que la comprensión pragmática está estrechamente relacionada con habilidades que involucran idealizaciones (falsedades) u aspectos que no pueden reducirse a contenido proposicional, esta no precisa de ser factiva.

En la siguiente sección se pretende señalar cómo en el estudio de lo complejo (objeto de estudio central en la ciencia contemporánea) la exigencia tradicional de comprensión como conocimiento de una explicación verdadera (materializada siguiendo a Hempel en la condición de adecuación empírica), no puede dar cuenta de las características propias del objeto de estudio (que es complejo) así como de su metodología. Ambos presentan opacidad epistémica, lo que constituye una incertidumbre que desafía el requisito de verdad de los estándares epistémicos.

3. Complejidad frente a la ciencia clásica: insuficiencia de los estándares de explicación y comprensión tradicionales.

Mi objetivo es argumentar que hacer de la verdad (o justificación de la verdad del contenido proposicional que constituye la comprensión) un requisito para alcanzar la comprensión y la explicación resulta insuficiente para abordar los fenómenos de interés en la ciencia contemporánea. Resulta igualmente insuficiente para tratar con la metodología de acceso a dichos fenómenos. Así, en esta sección, se busca destacar que las demandas de la postura estándar de explicación y comprensión son adecuadas para el modelo de la ciencia clásica, pero que comienzan a entrar en conflicto ante el estudio contemporáneo de lo complejo, siendo altamente ineficientes como epistemología actual del estudio de lo complejo. A este respecto, la comprensión pragmática de Henk de Regt parece ser más adecuada para la epistemología actual de lo complejo, ya que refuerza la importancia del sujeto y amplía la comprensión al flexibilizar sus exigencias en términos de verdad. Esto enlaza con que la idealización en la metodología de estudio de lo complejo es, por lo general, necesaria. Así como es necesario tener en cuenta la centralidad del sujeto a la hora de tomar decisiones acerca de su modelo, dada la incertidumbre que presenta el estudio de los fenómenos complejos.

Heylighen, Cilliers y Gershenson (Heylighen et al. 2005) exponen los rasgos distintivos del pensamiento científico clásico, con Newton como su referente. Tal como lo presentan, esta

postura se basa en buscar descomponer la realidad en partes más sencillas para su estudio. El "principio de conservación de distinciones" propuesto por Heylighen (Heylighen 1990) resume tal enfoque. El principio refiere al incentivo de buscar distinguir propiedades, estados y componentes de un sistema de manera objetiva e invariable, tanto para cualquier observador como a lo largo del tiempo. Esto implica una relación entre causas y efectos estable y aislable, donde tanto sus componentes como sus interacciones están bien determinadas, constituyendo un sistema cerrado. Así, la ciencia clásica opera descomponiendo las partes del sistema de estudio en sus partes más simples, o elementales. Algunos ejemplos son el modelo del gas ideal o el modelo atómico de Bohr. El enfoque mecanicista clásico asume que todos los cambios son causados por el movimiento de dichos componentes y regidos por leyes deterministas (Heylighen et al. 2005).

Cómo opera la ciencia clásica concuerda bien con la visión explicativa óptica. Disciplinas posteriores como la mecánica cuántica entran en contradicción con este principio. Por ejemplo, el principio de indeterminación establece que un electrón puede comportarse como partícula y como onda, pero no pueden observarse ambas propiedades simultáneamente, pues son contradictorias (ejemplo presentado por Gershenson & Heylighen, (2005, p. 3)). Tal y como señalan, esto es un rasgo esencial constitutivo de lo complejo: la no determinabilidad de sus partes y sus interacciones.

Los fenómenos de la ciencia clásica, debido a la determinabilidad de sus interacciones, su dinámica constante, predecible y la homogeneidad de sus propiedades, son tratables mediante métodos analíticos. Existe una solución analítica para un fenómeno si este puede explicarse o determinarse en qué estado se encuentra mediante una ecuación que proporcione una respuesta exacta del estado del fenómeno

En la práctica, los problemas de la realidad tratables con métodos analíticos son muy limitados. Un ejemplo paradigmático de esta limitación es que las ecuaciones de movimiento en la teoría newtoniana de la gravedad pueden resolverse de forma analítica para dos cuerpos, mientras que para tres cuerpos o más la solución es analíticamente irresoluble (Turner, Hanel, & Klimek 2018). La realidad está constituida mayoritariamente por sistemas complejos analíticamente intratables. Las soluciones analíticas en la realidad son más bien la excepción que la regla. (Humphrey 2004a).

Los fenómenos complejos son constituidos por múltiples elementos cuyas interacciones producen un comportamiento de conjunto que no puede derivarse del comportamiento de sus componentes. Esto no quiere decir que el fenómeno complejo no sea producido por sus partes, sino que del estudio aislado de sus partes no se podría llegar al comportamiento de conjunto. Aislar sus interacciones supone anular el fenómeno, que no puede entenderse sino de forma holística. (Heylighen et al. 2005). Así, los fenómenos complejos se caracterizan por mostrar al menos dos niveles de comportamiento, uno, el de su micro-comportamiento (las interacciones de sus elementos); y otro, su macro-comportamiento. El macro-comportamiento se entiende como un fenómeno emergente, es decir, como el efecto agregado de sus interacciones que no puede entenderse como mera suma de las partes (el conjunto es mayor que la suma de las partes). A la hora de estudiar el fenómeno emergente, no puede entenderse aislando sus partes como en la ciencia clásica.

En los sistemas de la ciencia clásica (altamente idealizados) la estructura de sus elementos y sus interacciones están determinadas, constituyen por tanto un sistema cerrado donde sus interacciones están restringidas a las de los elementos definidos en el sistema.

Contrariamente, los sistemas complejos son abiertos a su entorno, lo que los hace susceptibles de múltiples interacciones no controladas. Esto implica que la dinámica de sus interacciones sea a menudo sensible a variaciones mínimas en sus condiciones iniciales, donde pequeños cambios individuales quedan recogidos en la interacción derivando en grandes efectos inesperados que a su vez, se suman generando nuevos efectos no previstos (retroalimentación) (Gershenson & Heylighen 2005). Dicha variabilidad de sus interacciones los hace imprevisibles, no siendo posible hacer predicciones exactas, sino probabilísticas (Turner, Hanel, & Klimek 2018).

La emergencia y la retroalimentación son elementos constitutivos de la opacidad epistémica que caracteriza a la complejidad.

Un proceso es epistémicamente opaco, tal y como lo postula Humphrey (2009) cuando ciertos detalles relevantes del proceso quedan inaccesibles al agente epistémico. Esto contradice el estándar clásico de explicación, ya que impide el acceso completo a la estructura real, que es fundamental para la verdad del explanans. Y en la visión tradicional de explicación, si no hay explicación (pues no hay constatación empírica de la verdad del explanans), tampoco puede haber comprensión.

Someter la ciencia a los estándares clásicos equivale a excluir el estudio de lo complejo y lo epistémicamente opaco, que conforma la mayoría de fenómenos relevantes¹³.

A menudo, a pesar de que la mayoría de ecuaciones no pueden resolverse de forma analítica, pueden resolverse de forma aproximada, utilizando métodos numéricos.¹⁴ En las últimas décadas el desarrollo computacional ha revolucionado la metodología científica, permitiendo acceder a problemas complejos antes inaccesibles¹⁵. En muchas disciplinas, la mayoría del esfuerzo teórico reciente ha ido al desarrollo de modelos basados en la resolución aproximada de ecuaciones y ejecutados por computadores. Esta clase de modelos numéricos son llamados simulaciones.

Las simulaciones, al estar basadas en recursos computacionales, presentan una capacidad de cálculo que no puede alcanzar la mente humana. Por tanto, el proceso que se lleva a cabo en las simulaciones (el cálculo, las inferencias que se realizan de la teoría) resulta epistémicamente opaco. El sujeto puede acceder a las condiciones de entrada (estado inicial del sistema en el modelo) y a las condiciones de salida (los resultados de la ejecución del cálculo) pero no tiene acceso a cómo se derivan los resultados de las condiciones de entrada. Así, no es trivial comprobar que el proceso que lleva a cabo la simulación corresponda al proceso del sistema objetivo. Como Humphrey expresa, « [...] es el comportamiento del sistema el que está siendo simulado y no hay una preocupación explícita acerca de si los procesos que generan el comportamiento están modelados con precisión » (Humphrey 2004, pág. 108).

Así, la opacidad epistémica en el estudio de lo complejo se presenta en dos sentidos distintos. Por un lado, la opacidad epistémica propia del fenómeno (que es complejo), donde no se pueden aislar aspectos causalmente relevantes dada la necesidad de su estudio holístico.

Por otro lado, también existe opacidad epistémica debido a la metodología empleada en las simulaciones, ya que estas no permiten acceder al proceso mediante el cual se derivan los efectos del sistema simulado de interés.

¹³ Con esto quiero hacer notar que no se tratan de casos aislados que por su excepcionalidad no se adecúan a los requisitos de los estándares epistémicos, sino que son la norma, lo que conforma lo real. Si se pretende excluir de estudio todo lo que no se adapte a esos criterios (de verdad y adecuación empírica) se pierde el estudio de la mayor parte de la realidad.

¹⁴ Un método numérico ofrece una solución aproximada a una ecuación.

¹⁵ Ver, por ejemplo, (Thurner, Hanel, & Klimek, 2018, p. 26).

La visión estándar de explicación y comprensión, al exigir representación precisa (es decir, adecuación empírica) y por tanto, verdad, resulta incompatible con la opacidad epistémica presente en el estudio de lo complejo. Por ello, sugiero que la opacidad epistémica inherente al estudio de lo complejo, y cada vez más presente en las disciplinas, parece motivar estándares de explicación y comprensión alejados de la objetividad y la verdad, entendida como justificación de la representación precisa del fenómeno (el criterio de adecuación empírica de Hempel).

Los fenómenos complejos limitan el conocimiento cuantitativo y exacto, pero dada su centralidad en la ciencia contemporánea es necesario adaptar los requisitos de qué constituye una buena explicación y qué proporciona comprensión a las nuevas metodologías científicas. Como apunta Regt si tomamos la comprensión como conocimiento de una explicación correcta, (junto al requisito hempeliano de adecuación empírica de la explicación), «no nos queda mucha comprensión (si hacemos de la verdad un requisito)» (de Regt 2023, p 18, paréntesis añadidos).

Según Khalifa (Khalifa 2017), una explicación en la que no se contengan todos los detalles causalmente relevantes (una explicación que contiene idealizaciones), es simplemente una explicación menos completa. La comprensión para Khalifa es derivativa de la explicación, por lo tanto, una explicación menos completa (idealizada) produce un grado de comprensión menor. Es decir, Khalifa entiende que la comprensión constituye un fenómeno gradual.

Para Khalifa, «un grado de comprensión mínima », sería equivalente a la creencia de una explicación aproximadamente verdadera (2017).

Incluso si se admite a Khalifa que el grado de comprensión que proporcionan las simulaciones (comprensión objetiva, proporcionada por una explicación *quasiverdadera*) constituye una comprensión mínima,¹⁶ en la práctica, a la hora de construir tal explicación aproximadamente verdadera, en el caso de las simulaciones no puede ignorarse la necesidad de una comprensión pragmática, cualitativa y aproximada a la hora de acercarnos al modelado del fenómeno en cuestión.

¹⁶ Aunque el problema central de las simulaciones no es tanto la presencia de idealizaciones como la opacidad epistémica inherente a ellas. Un modelo puede ser muy preciso en su representación del fenómeno y epistémicamente opaco simultáneamente. Realismo y opacidad epistémica son compatibles.

Esto ha sido señalado por autores como Lenhard (2006) o J. Jebeile (2020), que destacan el papel de la comprensión pragmática inherente al modelado de las simulaciones y que se detalla en la siguiente sección.

En esta sección se ha examinado la limitación de los estándares clásicos de explicación y comprensión frente a los fenómenos complejos en la ciencia contemporánea. Se argumenta que exigir verdad (materializada en el correlativo fáctico de la representación de los modelos) como requisito para la comprensión y la explicación es insuficiente para abordar estos fenómenos, dada la opacidad epistémica que exhiben. Se muestra que la comprensión pragmática, propuesta por Henk de Regt, ofrece una alternativa más adecuada en el estudio de fenómenos complejos al reconocer una comprensión más flexible en términos de verdad, ligada más al conocimiento cualitativo que al cuantitativo, y que recoge el papel del sujeto en la elaboración de modelos explicativos. Además, dicha comprensión pragmática da cuenta del papel del sujeto ante las simulaciones, metodología empleada para el estudio de lo complejo.

4. Comprensión en simulaciones cosmológicas.

Para mostrar por qué y de qué forma es relevante la comprensión en el estudio de lo complejo, utilizaré las simulaciones cosmológicas¹⁷ de formación de galaxias como estudio de caso. La formación de galaxias es un ejemplo de disciplina indisociable de lo complejo. La formación de galaxias depende de múltiples fenómenos complejos y no lineales, que además abarcan varias escalas temporales y espaciales¹⁸. Son relevantes fenómenos¹⁹ desde la entrada de gas a gran escala que alimenta la galaxia, pasando por el colapso gravitatorio de nubes de gas para formar estrellas, hasta fenómenos de pequeña escala como las rápidas reacciones nucleares en el interior de las estrellas (Crain & van de Voort 2023).

Como señala Jacquart (2020) modelar este tipo de sistemas requiere considerar las interacciones complejas de todos estos fenómenos, haciendo indispensable el uso de simulaciones. Ya que la mayoría de fenómenos astrofísicos son mucho más lentos que la vida

¹⁷ Una simulación cosmológica es una simulación de una región del Universo, donde las galaxias “surgen” de las condiciones iniciales determinadas por las teorías del Universo temprano (y medidas empíricamente en p.e. el fondo cósmico de microondas) (Crain & van de Voort, 2023).

¹⁸ Distintas escalas temporales y espaciales quiere decir que el proceso (la formación de galaxias) alberga distintos registros de medida de tiempo y espacio en los fenómenos implicados.

¹⁹ Los detalles que se dan a continuación pretenden ser ilustrativos. No es necesario que se tenga conocimiento del tipo de fenómenos que intervienen en las simulaciones cosmológicas como los que se ejemplifican.

humana, las observaciones solo pueden mostrar “imágenes”, capturas momentáneas de un proceso temporal. Las simulaciones adquieren un gran valor para la adquisición de conocimiento científico, ya que permiten modelar la evolución temporal de sistemas²⁰ (muestran “vídeos” del proceso).

La comprensión toma un papel clave en el estudio de la formación de galaxias. A continuación se argumentará qué papel adquiere la comprensión en el modelado de simulaciones cosmológicas, y en qué sentido resulta relevante.

En el plano microscópico, a grandes rasgos la formación de galaxias puede describirse por las leyes de la gravedad y la dinámica de gases. Ya que los recursos computacionales son finitos, las simulaciones cosmológicas sólo pueden resolver estas ecuaciones aproximadamente, con un determinado límite de resolución²¹ espacial y temporal. Esto implica la existencia de procesos a pequeña escala que afectan al conjunto de la galaxia que la simulación no es capaz de reflejar, permaneciendo por debajo de la resolución. Un ejemplo de un proceso de pequeña escala en una galaxia es la explosión originada por la muerte de estrellas masivas (supernovas). Tales explosiones pueden calentar el gas de la galaxia, dificultando la formación de más estrellas. Las primeras simulaciones de galaxias no recogían este proceso por lo que acababan formando galaxias con muchas más estrellas que las galaxias observadas (lo que se conoce como problema de sobreenfriamiento, Balogh et al. 2001). Esto señala la necesidad que requiere lo complejo de un estudio tanto del conjunto como de sus partes en la construcción de su modelo, pero resulta materialmente imposible modelar con precisión todos estos fenómenos.

Estos fenómenos de pequeña escala pueden ser incluidos “a mano” en la simulación, utilizando modelos simples construidos por el simulador (modelos subred) para reflejar el efecto del fenómeno no capturado en las escalas resueltas por la simulación. Construir modelos subred no es tarea fácil, ya que estos fenómenos a pequeña escala frecuentemente no están exentos de complejidad. A diferencia de muchos de los modelos clásicos, este modelado no está únicamente basado en una descripción cuantitativa y microscópica (representación

²⁰ Esto constituye una de las características propias y novedosas de la simulación: es posible realizar modelos dinámicos, donde se representan la evolución de los procesos en el tiempo (Humphrey, 2004b).

²¹ La resolución refiere al nivel de precisión al que una simulación es capaz de modelar detalles. La resolución espacial así, refiere al tamaño mínimo de las estructuras que se pueden representar en la simulación, mientras que la resolución temporal refiere a la duración mínima en que pueden representarse los procesos. Cuanto mayor es la resolución espacial, mayor grado de detalle puede alcanzarse en la representación del proceso, pudiendo capturar mejor fenómenos a escalas más pequeñas.

detallada), sino que depende en gran medida de la comprensión cualitativa del investigador sobre el fenómeno complejo (que es en parte opaco) y sobre su interacción con el su entorno, visto el fenómeno como sistema abierto y no cerrado. Por ejemplo, en el caso de modelos subred de supernovas, en vez de modelar en detalle el complejo proceso, desde las reacciones nucleares y la explosión de la estrella, hasta el choque y empuje del material eyectado contra el medio intergaláctico para generar vientos, simplemente se modela el efecto final a gran escala: se añade cierta velocidad o energía térmica al gas que rodea a la estrella (Dalla Vecchia & Schaye 2008).

Por tanto, la comprensión del investigador es clave en la creación de modelos subred, ya que es necesario dar cuenta de cómo funciona el comportamiento del fenómeno complejo a pequeña escala, así como reflejar de qué forma dicho comportamiento impacta en el proceso simulado. Para ello es necesario juzgar de qué forma simplificar el fenómeno de pequeña escala y encapsular su efecto en un modelo (subred). También es necesario juzgar cómo afecta el modelo al conjunto, es decir, realizar inferencias de su impacto.

Como señala Regt (2009, p. 589) «...uno desarrolla la capacidad de hacer juicios sobre cómo proceder sin un algoritmo» Uno aprende a realizar las idealizaciones y las inferencias correctas en la práctica.

El objetivo de las simulaciones no es (únicamente) producir explicaciones y predicciones precisas, más bien, ganar intuiciones sobre el comportamiento cualitativo de los fenómenos. La simulación proporciona datos, pero es trabajo del científico analizarlos e identificar relaciones de correlación y causalidad. Siguiendo el ejemplo anterior, las simulaciones mostraban que el gas podía enfriarse de forma muy eficiente, permitiendo la formación eficiente de estrellas. Realizando una exploración del espacio de modelos/parámetros (p.e. incluyendo y excluyendo las supernovas), se pudo descubrir que las supernovas son una solución simple para calentar el gas de la galaxia, limitar la formación de estrellas y formar galaxias con masas y tamaños más realistas (Jacquart 2020).

El investigador también debe entender los límites de su simulación, hasta dónde y para qué propósitos puede confiar en ella. Cuales son las debilidades de su modelos, qué errores puede introducir las aproximaciones de la simulación. En qué resultados puede confiar y en cuáles no (Jacquart 2020).

Lenhard (2006) señala que la simulación, permaneciendo incomprensible en la forma en que se derivan los resultados obtenidos de la teoría (incomprensible teóricamente) ofrecen comprensión en la medida en que permite controlar el fenómeno y realizar intervenciones (tal y como se ha mencionado antes, en la exploración de modelos)²². Las simulaciones también pueden ofrecer predicciones y ofrecer orientación en el diseño de artefactos que luego posibilitan un mejor acceso empírico al fenómeno (Lenhard 2006).

Como señala Jebeile (2020) una forma de obtener inteligibilidad de la simulación (de poder realizar inferencias cualitativas), es mediante la familiarización del científico con el modelo, aprendiendo anticipar comportamientos cualitativos del modelo. El aprendizaje del modelo se da en la medida en la que el sujeto usa el modelo, es decir, variando aspectos y explorando su funcionamiento, tal y como se ha mencionado en el caso de la astrofísica.

La manipulación de la simulación equivale a realizar preguntas exploratorias, variación de parámetros, de condiciones iniciales, de modelos subred (en el caso de la astrofísica). La comprensión puede darse con la manipulación del modelo. Por ejemplo, experimentando al variar modelos subred, parámetros del modelo o condiciones iniciales. Esto refleja el carácter no proposicional (y no factivo) de la comprensión que se precisa previamente a la obtención de una explicación.

5. Conclusión.

En contraste con la visión clásica de la ciencia, la cual busca descomponer los fenómenos en partes más simples y tratarlos mediante métodos analíticos precisos, las preocupaciones de la ciencia actual están enfocadas en el estudio de fenómenos complejos. Los fenómenos complejos presentan opacidad epistémica y dadas sus características no pueden ser capturados con la metodología tradicional de la ciencia. El empleo de una metodología distinta, como las simulaciones, resulta un desafío para los criterios epistemológicos tradicionales al restringir el acceso del sujeto a los pasos en los que se desarrolla el proceso simulado.

Es por esto que se argumenta la necesidad de revisar los estándares de explicación y comprensión tradicionales. Henk de Regt propone un criterio de comprensión pragmático, no objetivo, sino relativo a un contexto determinado y a las habilidades de un sujeto concreto.

²²No obstante, la capacidad de exploración está limitada por los recursos computacionales finitos. Además, desde el punto de vista ético, las simulaciones de gran capacidad tienen un alto consumo energético lo que las hace poco sostenibles (Magnani & Bertolotti, 2017).

Aquí argumento cómo su postura sobre la comprensión pragmática que se precisa para la producción de explicaciones responde al proceso de modelado de las simulaciones de fenómenos complejos.

En este proceso de modelado mucha de la incerteza implicada se recoge en parámetros. La decisión de qué parámetros introducir y cómo modelarlos, recaen sobre la capacidad de juzgar del sujeto.

Por el contrario, señalo que la visión de la comprensión como conocimiento proposicional, exigente de verdad, no puede lidiar con el desconocimiento inherente involucrado tanto en los fenómenos complejos como en las simulaciones, y que es necesario tener en cuenta para acceder a conocimiento sobre el fenómeno.

El ejemplo que presento del modelado de la explosión de supernovas en la formación de galaxias muestra como la comprensión pragmática es indispensable para la construcción del modelo, de donde podemos extraer inferencias cualitativamente valiosas sobre la relevancia de los procesos que intervienen en el fenómeno de interés.

Bibliografia

Batterman, R. W. (2009). Idealization and Modeling. *Synthese*, 169(3), 427-446.

Bokulich, A. (2018). Searching for Non-Causal Explanations in a Sea of Causes. In A. Reutlinger & J. Saatsi (Eds.), *Explanation Beyond Causation: Philosophical Perspectives on Non-Causal Explanations*. Oxford: Oxford Academic. DOI: 10.1093/oso/9780198777946.003.0008

Cartwright, N. (2002). *From Causation to Explanation and Back*. Department of Philosophy, Logic and Scientific Method, London School of Economics, and Department of Philosophy, University of California-San Diego.

Crain, R. A., & van de Voort, F. (2023). Hydrodynamical simulations of the galaxy population: Enduring successes and outstanding challenges. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 61, 473.

Dalla Vecchia, C., & Schaye, J. (2008). Simulating galactic outflows with kinetic supernova feedback. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 387(4), 1431-1444. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13322.x>

de Regt, H. W. (2009). The epistemic value of understanding. *Philosophy of Science*, 76(5), 585-597.

de Regt, H. W. (2023). Can scientific understanding be reduced to knowledge?. En I. Lawler, K. Khalifa, & E. Shech (Eds.), *Scientific understanding and representation: Modeling in the physical sciences* (pp 18-32). Routledge.

Gershenson, C., & Heylighen, F. (2005). How can we think the complex? Centrum Leo Apostel, Vrije Universiteit Brussel, Krijgskundestraat 33. B-1160 Brussels, Belgium. Recuperado de <http://www.vub.ac.be/CLEA>

Hempel, C. G. (1965). *Aspects of scientific explanation and other essays in the philosophy of science*. The Free Press.

Humphreys, P. (2004a) . Computational Science. *In Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. New York. Oxford Academic. DOI: 10.1093/0195158709.003.0003

Heylighen, F., Cilliers, P., & Gershenson, C. (2005). Complexity and philosophy. *Evolution, Complexity and Cognition*, Vrije Universiteit Brussel, Philosophy Department, University of Stellenbosch.

Humphreys, P. (2004b) . Computer Simulations. *In Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. New York. Oxford Academic. DOI: 10.1093/0195158709.003.0004.

Humphreys, P. (2009). The Philosophical Novelty of Computer Simulation Methods. *Synthese*, 169(3). DOI: 10.1007/s11229-008-9435-2.

Jacquart, M. (2020). Observations, Simulations, and Reasoning in Astrophysics. *Philosophy of Science*, 87(5). DOI: 10.1086/710544

Jebeile, J., & Kennedy, A. G. (2015). Explaining with Models: The Role of Idealizations. *International Studies in the Philosophy of Science*, 29(4), 383-392.

Khalifa, K. (2012). Inaugurating understanding or repackaging explanation? *Philosophy of Science*, 79(1), 15-37. Retrieved from The University of Chicago Press on behalf of the Philosophy of Science Association.

Lawler, I., Khalifa, K., & Shech, E. (Eds.). (2022). Scientific Understanding and Representation: Modeling in the Physical Sciences. *Routledge studies in the philosophy of mathematics and physics* (Edición ilustrada). Taylor & Francis Group

Lenhard, J. (2006). Surprised by a Nanowire: Simulation, Control, and Understanding. *Philosophy of Science*, 73(5), 605-616.

Magnani, L., & Bertolotti, T. (Eds.). (2017). Springer Handbook of Model-Based Science. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30526-4>

Turner, S., Hanel, R., & Klimek, P. (2018). Introduction to the theory of complex systems. Oxford, UK: Oxford University Press. ISBN 9780198821939.

Wilkenfeld, D. A. (2017). MUDdy understanding. *Synthese*, 194(4), 1273-1293.