



Observaciones y simulaciones en las prácticas astronómicas

Maximiliano Bozzoli*

Xavier Huvelle*

Resumen

El rol que ocupa la computación en los laboratorios astronómicos actuales es crucial. Uno de sus frentes más importantes se vincula con el diseño, construcción y uso de simulaciones. Los resultados alcanzados por estas últimas se comparan con aquéllos obtenidos a través de las observaciones tradicionales. Este contraste permite diferentes maneras de validación externa. Parte de la comunidad astronómica emplea simulaciones para generar conocimientos. Desde este enfoque, los datos simulados se encuentran en el mismo estatus epistémico que aquéllos adquiridos por la vía observacional clásica. Es posible realizar simulaciones de observaciones concretas, como así también de objetos, propiedades y ciertos procesos astrofísicos. Estas últimas contienen datos observacionales, como condiciones iniciales y de contorno, permitiendo la selección y el ajuste de parámetros físicos en las diferentes etapas del modelado del fenómeno bajo investigación. A diferencia de las simulaciones de las observaciones, las cuales restringen notablemente el espacio de soluciones posibles, esta otra clase de simulaciones presentan parametrizaciones que poseen un alto grado de libertad. Ello puede conducir a resultados simulados correctos, pero no concordantes con las observaciones, es decir, a inferencias verificables pero no chequeables empíricamente. Aquí, se intentará dilucidar qué clase de conocimientos astronómicos son generados y en qué contextos.

* Centro de Investigaciones de la Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba (CIFYH, UNC) – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

* Centro de Investigaciones de la Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba (CIFYH, UNC) – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Palabras clave: Modelos, observación, simulación, validación, astronomía

Abstract

Computing plays a crucial role in today's astronomical laboratories. One of its most important areas is related to the design, construction and use of simulations. The results obtained by them are compared with those obtained through traditional observations. This contrast allows different ways of external validation. Part of the astronomical community uses simulations to generate knowledge. From this perspective, simulated data have the same epistemic status as those acquired through classical observations. It is possible to carry out simulations of specific observations, as well as of objects, properties and certain astrophysical processes. The latter contain observational data, such as initial and boundary conditions, allowing the selection and adjustment of physical parameters at different stages of modelling the phenomenon under investigation. Unlike simulations of observations, which significantly restrict the space of possible solutions, simulations of phenomena present parameterisations that have a high degree of freedom. This can lead to simulated results that are correct but not consistent with observations, i.e. to inferences that are verifiable but not empirically testable. Here, we will try to analyse what kind of astronomical knowledge is generated and in what contexts.

Keywords: Models, observation, simulation, validation, Astronomy

I. Introducción

A partir del desarrollo considerable que ha sufrido el concepto de observación en las últimas décadas de la astronomía, el rol que ocupa la computación en los laboratorios astronómicos se ha tornado imprescindible. Uno de sus frentes más notables está ligado a la implementación de tecnologías informáticas en la automatización de los sistemas instrumentales vigentes. Más allá de la parafernalia de elementos tecno-científicos asociados a las prácticas actuales, otro de los frentes más importantes se relaciona con el diseño, construcción y uso de simulaciones computacionales. Los resultados alcanzados por estas últimas se comparan, de alguna u otra

forma, con aquéllos obtenidos a través de las observaciones tradicionales. Este contraste permite diferentes maneras de validar externamente a las simulaciones (Guillemot, 2010; Reiss, 2019; Bozzoli y Paz, 2023).

Al margen de las estrategias de validación disponibles, parte de la comunidad astronómica sostiene que el empleo de las simulaciones permite generar conocimientos. Desde este enfoque, los datos simulados se encuentran en el mismo estatus epistémico que aquéllos adquiridos por la vía observacional clásica. De esta manera, es posible realizar simulaciones de observaciones concretas (Wilson, 2017). La reproducción de estas últimas, permite la elaboración de catálogos sintéticos (virtuales o simulados) de galaxias, por ejemplo. En este sentido, el modelo de simulación considera no sólo el modelo del fenómeno astrofísico en cuestión, sino también un modelo de observación específico. Este último recoge aspectos inherentes a un hecho o situación observacional particular, tales como: la configuración y los ruidos intrínsecos de las plataformas multi-instrumentales, las perturbaciones ocasionadas por los medios naturales, el lugar físico del observador y sus efectos de proyección, entre otros errores metodológicos. Este tipo de simulaciones no sólo considera los datos de las observaciones convencionales, sino que además pondera entre sus diferentes fases de adquisición y de procesamiento. De esta forma, importan tanto los variados mecanismos instrumentales de producción de datos, como las maneras en la cuales se reducen mediante los auxiliares y herramientas astro-informáticas. En esta dirección, la observación (como un todo) es entendida, desde estas prácticas astronómicas, en términos de una dinámica proceso-producto (Bozzoli, 2019).

Otro tipo de simulaciones pretenden modelar ciertos fenómenos astrofísicos, considerando solamente los resultados observacionales y no sus procesos asociados. Dada la jerarquía de modelos numéricos referidos tanto a la estructura del universo a gran escala como al origen de la misma a partir de la formación estelar y de galaxias, cabe destacar la concordancia entre el modelo cosmológico estándar y los modelos semi-analíticos subyacentes. Estos últimos contienen datos observacionales, como condiciones iniciales y de contorno, que los impregnan empíricamente, posibilitando la selección y el ajuste de parámetros físicos en las diferentes etapas del modelado del fenómeno bajo investigación. A diferencia de las simulaciones de las observaciones, las cuales restringen notablemente el espacio de soluciones posibles, esta otra clase de simulaciones presentan

parametrizaciones que poseen un alto grado de libertad (Heng, 2014). Así, la línea de demarcación entre el uso y el abuso de esta técnica particular es difusa (Overkamp & Roy, 2010). Eventualmente, ello puede conducir a resultados simulados correctos, pero no concordantes con las observaciones, es decir, a inferencias verificables pero no chequeables empíricamente. Sin embargo, otros/as autores/as sostienen, como parte del sentido común filosófico, que el conocimiento inferido por la vía simulacional supera aquél proporcionado por la vía observacional (Jaquart, 2020).

Este trabajo abordará, desde la perspectiva de las prácticas científicas, el inter-juego entre ciertas simulaciones y observaciones astronómicas. Al considerar las diferentes funciones epistémicas que poseen las simulaciones de las observaciones y las simulaciones *per se*, se intentará dilucidar qué clase de conocimientos astronómicos son generados y en qué contextos. Específicamente, se mostrarán algunas limitaciones con respecto a las capacidades predictivas y explicativas de dichas simulaciones y sus alcances (y riesgos) en el entorno inferencial. En este sentido, se adoptará un enfoque moderado con respecto al lugar que ocupan las simulaciones, en términos de verificación y validación, en la astronomía observacional contemporánea.

II. Nociones de observación y de validación

El concepto de observación en astronomía ha sufrido cambios notables en las últimas décadas debido, por un lado, a la resolución de problemas observacionales concretos mediante el modelado computacional de ciertos fenómenos astrofísicos. Por el otro, esta metamorfosis se debe también a técnicas de identificación, de selección y de ajuste de parámetros en las simulaciones empleadas, las cuales son validadas externamente gracias a nuevas observaciones obtenidas por la vía tradicional.

Los primeros abordajes filosóficos sobre tal concepto, sensibles a las prácticas científicas, surgieron a principios de la década de mil novecientos ochenta. Autores como Hacking (1983, 1989), Shapere (1982, 1993), Kosso (1989, 2006), Chang (2004, 2005) y Humphreys (2004, 2013), entre otros, se fueron alejando de las distinciones tradicionales entre entidades observables y entidades inobservables. En general, dichas caracterizaciones de la noción de observación rescatan aspectos propios de las prácticas, remarcando su fuerte dependencia con el desarrollo tecnológico en

el instrumental de observación disponible. En pocas palabras, el debate filosófico clásico en torno al “realismo científico” fue ligeramente atenuado por estos nuevos enfoques, los cuales ponen énfasis en las técnicas asociadas a la sofisticación de los procesos observacionales/experimentales involucrados. Analizar la observación en términos de una dinámica proceso-producto permite ponderar aspectos epistemológicos relevantes, tales como: a) el rol que ocupan las interacciones físicas y no físicas en las prácticas actuales de observación, b) la adquisición, el procesamiento y la codificación de la información observacional y c) la identificación y la clasificación de objetos, propiedades y variados procesos astrofísicos. A continuación se mostrará la evolución de una observabilidad basada sólo en objetos hacia otras que consideran además sus propiedades físicas, como así también cualidades emergentes y relaciones y/o correlaciones entre tales atributos. Para ello, no se desarrollará en detalle cada una de estas posturas mencionadas, sino que se listarán algunos puntos más significativos al respecto.

• Según Shapere (1982), observar es captar la señal física emitida por la fuente hasta un receptor apropiado que transforma el contenido transmitido de tal señal en “información” accesible a los sujetos epistémicos. La observación depende del conocimiento disponible de la fuente, de la transmisión y de la recepción en base a las interacciones físicas fundamentales involucradas en cada caso particular:

“...la especificación de lo que cuenta como directamente observado (observable), y por consiguiente de lo que cuenta como una observación, es una función del estado prevaleciente de conocimiento acerca del mundo físico, y puede cambiar conforme cambia dicho conocimiento ...el conocimiento físico prevaleciente especifica qué cuenta como un receptor apropiado, qué cuenta como información, los tipos de información que existen, las formas en las cuales se transmite y recibe la información de diversos tipos, y el carácter y los tipos de interferencia así como las circunstancias y la frecuencia con la que ésta ocurre.” (Shapere, 1982 [1989], pp. 488-489)

También afirma que:

“...un receptor apropiado puede ahora entenderse como un instrumento capaz de detectar la presencia de tales interacciones y, por consiguiente, de las entidades que interactúan de acuerdo con las reglas o leyes precisas de la física actual...la ciencia ha llegado cada vez más a excluir tanto como sea posible a la percepción sensorial de jugar algún papel en la adquisición de evidencia observacional; esto es, la ciencia confía cada vez más en otros receptores apropiados.” (Shapere, 1982 [1989], pp. 504-507)

- Kosso (1989) sostiene que la observabilidad, caracterizada en términos de pares ordenados, está basada en los objetos y en sus respectivas propiedades físicas, las cuales se hallan con éstos relacionadas causalmente. A diferencia de Shapere, él propone que el concepto de observación no sólo hace referencia a la naturaleza física de la señal, sino además a la señal como transporte de la información. Dicha “señal subrogada”, por decirlo de algún modo, posee un gran contenido informativo, el cual requiere de niveles interpretativos muy variados. Este autor no establece una diferencia precisa entre la señal física y el contenido que acarrea la misma. Sin embargo, en vez de discriminar señal de ruido, Kosso (2006) sugiere distinguir información relevante de no relevante. Así, él propone que la observabilidad posee dimensiones (no físicas) tales como el número de intermediarios entre el sujeto epistémico y el objeto bajo estudio, entre otras.

“El par ordenado $\langle x, P \rangle$ es observable en la medida en que pueda haber una interacción (no física) o una cadena de éstas entre el objeto y el sistema observacional tal que la información de que x es P se transmite al aparato y, eventualmente, al científico humano.” (Kosso, 1989, p. 451)

- Por su parte, Chang (2005) asevera que la observabilidad es fundamentada a partir de propiedades observables cualitativas y/o cuantitativas asociadas no sólo a objetos concretos, sino además a diversos procesos físicos. A diferencia de los dos autores citados anteriormente, este último sostiene que en dichos tratamientos sigue habiendo una fuerte dependencia hacia los objetos. A propósito, Chang (2004) se refiere al descubrimiento de William Herschel de la radiación infrarroja. Al situar un termómetro en la sombra cercana al color rojo del espectro continuo del Sol, Herschel observó que este aparato registraba un incremento en la

temperatura. La propiedad medida no se correspondía con ningún objeto específico conocido, lo cual se debía a la incapacidad (tanto explicativa como predictiva) de las teorías de ese entonces y al abandono de interpretaciones y de hipótesis alternativas respecto al correcto uso de los instrumentos empleados. Al igual que Hacking (1983), quien también considera este caso particular, además de reafirmar encuentros felices entre la observación y la teoría, menciona que hay observaciones que son dignas de atención. Esta últimas aluden a la presencia, en la historia de la ciencia, de observaciones “puras” o pre-teóricas.

- Por último, Humphreys (2004) afirma que los instrumentos sirven como detectores de propiedades. Este autor considera que un objeto, atributo o propiedad física no observada se mueve de los límites entre lo inobservado a lo observado, y no a lo largo de la línea entre lo observable y lo inobservable. En este sentido, una división tajante entre observables e inobservables no se ajusta a la ciencia actual: cuando un fenómeno se observa, éste posee la capacidad disposicional de ser observable, dado que es posible crear una situación experimental dentro de la cual es observado. Lo que justifica las creencias sobre la existencia de un objeto, propiedad o proceso físico particular es la instrumentación disponible. Esta última depende del desarrollo tecnológico y ofrece las garantías epistémicas sobre cualquier cambio de estado que pueda tener el fenómeno observado, preservando así la identidad de la entidad considerada. Humphreys (2013) sostiene que el estatus de los datos producidos por diversos mecanismos, tales como aparatos convencionales de observación o simulaciones computacionales, no depende sólo de cómo fueron generados. Este autor establece una distinción para referirse tanto al origen de los datos como a su contenido informativo, el cual se constituye principalmente de información acerca del modelo del fenómeno físico en cuestión. Al extender la noción de dato, incluyendo fuentes computacionales como mecanismos de producción alternativos, la observación de los fenómenos se daría a través de las relaciones y de las correlaciones entre las propiedades tanto observacionales como simulacionales.

Más allá de su procedencia, estos datos suelen estar acopiados y estandarizados en bases o conjuntos modulares interconectados. Un ejemplo actual son los observatorios astronómicos virtuales. Estas plataformas informáticas permiten el acceso a la información disponible, no sólo almacenando grandes volúmenes de datos, sino posibilitando su exploración y

análisis. En algunos casos, el procesamiento consiste en contrastar datos provenientes de observaciones con datos producidos por simulaciones. Ello permite una validación o valoración de tipo externa entre ambos.

Por otro lado, cabe destacar la importancia que poseen tanto el modelado computacional de ciertos fenómenos astrofísicos, como las simulaciones de éstos en las prácticas de observación más recientes de la astronomía. Los resultados de tales simulaciones suelen relacionarse con aquéllos obtenidos observacionalmente, logrando así una forma de validación mutua. Estos modelos de contraste permiten la comparación de los resultados alcanzados tanto por la vía simulacional, como por aquella tradicional. No obstante, algunos/as autores/as aseguran que no hay un protocolo de validación y, por ende, existen diferentes tácticas que son empleadas conforme a las prácticas. Dada la heterogeneidad de éstas últimas, Guillemot (2010) establece que una estrategia posible consiste en validar inicialmente las simulaciones con datos observacionales; otra logra la validación a través de la parametrización conforme a nuevos datos disponibles. Debido a que los resultados de las observaciones y de las simulaciones son comparables entre sí, ellos podrían alcanzar el mismo estatus o nivel epistémico. En resumen, esta autora sostiene que la validación inicial o “*top-down*” compara los resultados de simulaciones, a gran escala por ejemplo, con aquéllos provistos por bases de datos observacionales. Al ser inicialmente validadas, estas simulaciones son capaces de ofrecer propiedades físicas semejantes a las observadas con los instrumentos tradicionales. Otra de las estrategias sugeridas por ella es la validación “*botton-up*”. La misma se logra a través de la selección y ajuste de parámetros físicos en una simulación particular, conforme a los resultados obtenidos de otras simulaciones específicas, las cuales ya han sido validadas externamente por observaciones. Esta práctica permite identificar las variables más relevantes en el modelo computacional del fenómeno bajo estudio.

En esta dirección, resulta de crucial importancia el inter-juego entre modelos de datos distintos. Así, al establecer vínculos entre variadas bases de datos pueden emplearse estrategias que impregnan y transfieren, directa o indirectamente, contenido empírico a la simulación en cuestión. A los fines de este artículo, cabe destacar que Guillemot también sostiene que una simulación puede poseer errores de compensación, lo que significa que la misma puede ser “correcta” a partir de ciertas razones equivocadas. Por ejemplo, una hipótesis relacionada a una representación imprecisa

del fenómeno puede generar resultados simulados que concuerdan con las observaciones disponibles y, de todas formas, ser validados. Más allá de que las parametrizaciones permitan evaluar verticalmente las simulaciones, de forma inicial y/o a través de las soluciones arrojadas por otras simulaciones de menor escala ya valoradas, hay otros enfoques. Éstos sugieren estrategias que posibilitan validaciones horizontales “*from side to side*” entre modelos alternativos de fenómenos (Bozzoli y Domínguez, 2023). Estas prácticas de validación (lado a lado) permiten establecer tanto similitudes, como un rastreo procesual comparativo entre diferentes modelos alternativos y de cierta manera entre simulaciones y observaciones. Por su parte, Reiss (2019) propone examinar argumentos a favor y en contra de validaciones externas. En pocas palabras, este autor sostiene que la validación depende de la capacidad epistémica de cada modelo involucrado (observacional o simulacional) para realizar inferencias confiables que son extrapoladas al otro modelo, y viceversa. Según este autor, la implementación de estrategias como la analogía, la similitud y la comparación son imprescindibles para la validación externa tanto de simulaciones como de observaciones.

III. Simulaciones de observaciones y simulaciones *per se*

Por un lado, se hallan las simulaciones de observaciones u observaciones virtuales. En éstas el modelo de simulación tiene en cuenta no sólo el modelo del fenómeno astrofísico, sino también un modelo de observación específico. Este último incluye aspectos relacionados con un hecho o situación observacional particular, tales como: la configuración y los ruidos intrínsecos de las plataformas multi-instrumentales, las perturbaciones provocadas por los entornos naturales, la ubicación física del observador y sus efectos de proyección, entre otros errores metodológicos y eventuales sesgos presentes. A propósito, Wilson (2017) sostiene:

“These mock catalogues are produced by placing an observer at a strategic point (usually the centre) of the simulation, and recording what they ‘see’. They are the simulated equivalent of the data produced by galaxy surveys conducted by ground and space telescopes.” (Wilson, 2017, p. 4)

Esta autora afirma que estos catálogos simulados (*mock*) también sirven para probar y entrenar algoritmos que permiten la identificación y la clasificación de fenómenos astronómicos, para luego ser empleados en diferentes bases de datos observacionales. Así, al simular un hecho o situación de observación concreta, los científicos pueden analizar las diversas fuentes presentes en la simulación de la observación y cotejarlas y compararlas con los catálogos logrados por la vía observacional clásica. El uso de un programa o sistema experto entrenado, asistido por el operador humano, permite que una clasificación sea exitosa, es decir, sin errores que provengan de una mala identificación: “This information can be used to assist in the interpretation of observational data by, for example, testing a procedure on simulated catalogues for identifying and weighing clusters of galaxies in real redshift catalogues.” (Wilson, 2017, pp. 4-5). Ella presenta un claro ejemplo [Fig. 1]:

“Illustris offers a comparison of virtual mock observations that mimic the conditions that the Hubble Space Telescope encounters as it images galaxies...The two images are not identical in content, but they are quite indistinguishable in type) it is quite impossible to tell, without the caption, which image was produced with a simulated telescope aimed at a simulated universe, and which was produced with a real instrument.” (Wilson, 2017, p. 6)

Además sostiene:

“Illustris and EAGLE are using the persuasive technique of visualisation to demonstrate that not only do the simulations reproduce accurate results, but that these results are close to reality. The closer to reality the visible aspects of the simulation, the more faith we have in the reality of the invisible, or dark, aspects... This sense of realism, generated from the increasing complexity of astrophysical simulations, assists in understanding how virtual worlds can produce their own observations.” (Wilson, 2017, p. 6)



Figura 1. Imagen del campo ultra profundo obtenida por el Telescopio Espacial Hubble (izquierda) y reproducción de la misma observación vía la simulación *Illustris* (derecha). Créditos: Vogelsberger et al. (2014a). *Nature*

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, es posible identificar simulaciones de fenómenos o *per se*. Además de incluir las simulaciones de las estructuras del universo a gran escala, éstas abarcan fenómenos específicos y varían según los objetos, propiedades o procesos astrofísicos involucrados [Fig. 2]. El volumen y la resolución de cada simulación dependerán del modelo numérico considerado, ya sea de partículas o hidrodinámico. Estos modelos representan el comportamiento y la distribución de la materia ordinaria y de la materia oscura [Fig. 3].

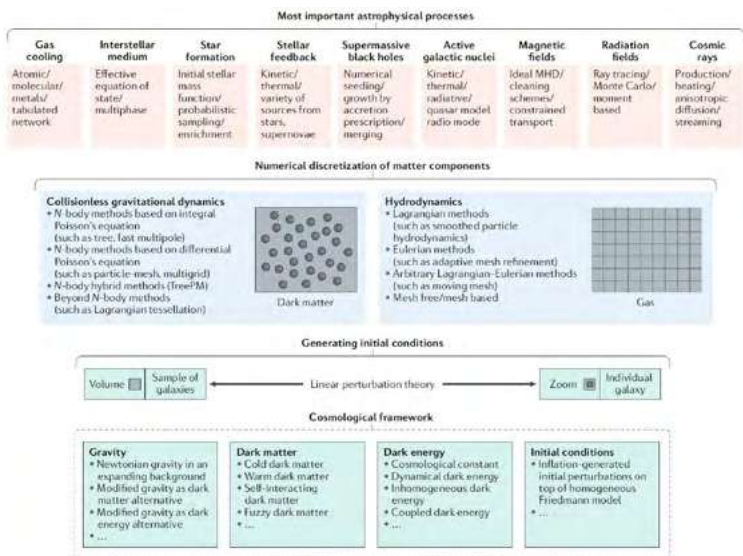


Figura 2. Representación de los variados procesos astrofísicos

Créditos: Vogelsberger et al. (2020). *Nature Reviews Physics*

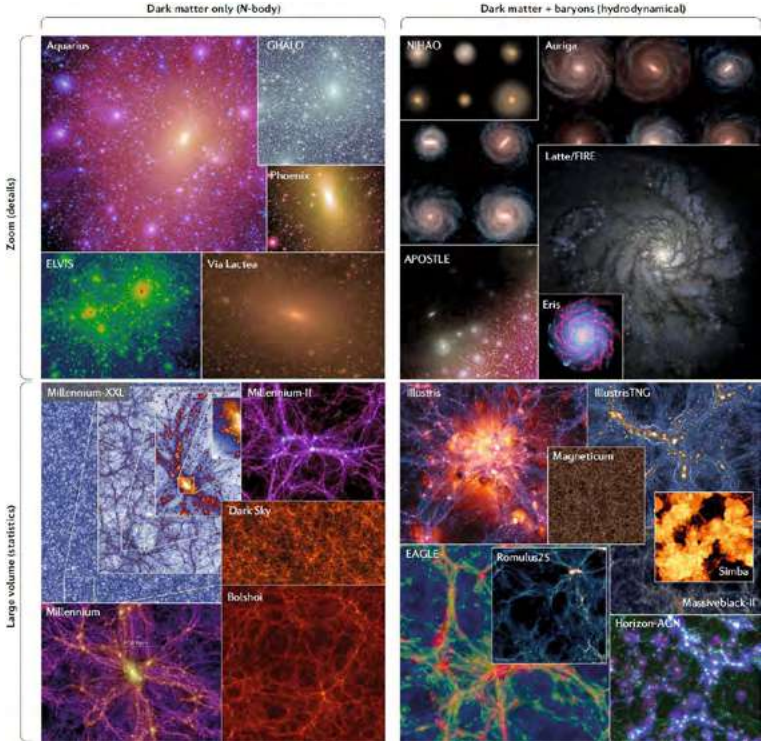


Figura 3. Ejemplos de simulaciones de fenómenos particulares (arriba) y cosmológicas (abajo). Créditos: Vogelsberger et al. (2020). *Nature Reviews Physics*

En esta dirección, Jacquart (2020) sostiene que la innovación tecnológica ha marcado una línea sin precedentes en la comprensión actual que se tiene del universo mediante el uso de estas simulaciones. La astrofísica reciente emplea este recurso computacional para generar conocimientos acerca de los sistemas que lo pueblan. Las caracterizaciones de éstos últimos van más allá de las inferencias logradas sólo a partir de las observaciones. Resultando así evidente la problemática epistemológica respecto de

si las simulaciones son auténticas productoras de nuevos conocimientos y de eventuales descubrimientos. Ella sostiene:

“It is clear that astrophysicists routinely use simulations to generate knowledge about systems in the universe that goes beyond the knowledge inferred from observations alone... However, there is philosophical debate about whether simulations can genuinely produce knowledge about the world.” (Jacquart, 2020, p. 2)

De esta manera, las simulaciones se construyen utilizando conocimientos previos sobre estructuras y fenómenos astrofísicos, ya sean teóricos u observacionales. El interés de esta autora radica en aquéllos datos observables que representan instantáneas de ciertos sistemas, las cuales son empleadas como base para poder simularlos. Además de examinar el rol inferencial de las simulaciones, ella intenta mostrar que éstas poseen tres capacidades epistémicas cruciales que permiten: chequear las hipótesis de un modelo, explorar el espacio de parámetros y amplificar las observaciones. Esto da lugar a ciertas interrogantes sobre cómo interactúan en las prácticas las simulaciones con las observaciones al momento de evidenciar un fenómeno particular. Lejos del gran debate sobre la incapacidad de llevar a cabo experimentos estrictos en astronomía y, más allá de las observaciones disponibles, las simulaciones son el único medio para investigar aquellos sistemas que evolucionan en tiempos y escalas astronómicas. De esta manera, el conocimiento en esta disciplina podría entenderse con el uso de simulaciones, las cuales proporcionan información observacional que no es accesible de otra forma. Esta autora afirma que:

“This raises philosophical questions about how observations and computer simulations work together to develop evidence and justify epistemic claims about astrophysical phenomena. Beyond mere observation, computer simulations are generally the only means by which to investigate the systems of interest... If astrophysics is expanding its knowledge using simulations, then it seems simulations can be a legitimate route to knowledge.” (Jacquart, 2020, pp. 5-6)



Jacquart menciona como estudio de caso la colisión de las galaxias anulares o de anillo, aludiendo al rol destacado de las simulaciones en los procesos de evolución y en la formación de rasgos estructurales morfológicos. Sin entrar en detalles técnicos, esta autora ilustra además cuál ha sido el desarrollo de las simulaciones de estos sistemas en las últimas décadas: destacando el avance de modelos de simulación basados en partículas a otros que incorporan la dinámica del gas, entre otras magnitudes físicas como la densidad del mismo y la materia oscura circundante. Cada uno de estos parámetros puede ser ajustado a fin de explorar y de analizar el impacto que tienen en las propiedades observables, como la formación de estructuras (*spokes*), en dichos sistemas de galaxias. Una de las capacidades epistémicas que poseen las simulaciones astrofísicas es el testeado de hipótesis. Ello significa que los científicos suelen desarrollar algunos de estos supuestos específicos y determinan, vía simulaciones, su grado de veracidad o bien la posibilidad de su refutación. Según esta autora:

“By this I mean cases when a scientist develops a specific hypothesis and uses a simulation to determine the likelihood of the hypothesis, or to refute it completely. In the context of astrophysics, the simulation data is compared to observational data, and this helps determine the trustworthiness of the simulation. But again, due to the methodological challenges in astrophysics, comparison with observational data is extremely limited, and in some cases impossible because there are no observations.” (Jacquart, 2020, pp. 10-11)

Las eventuales hipótesis son testeadas a través de la construcción de simulaciones basadas en un marco de conocimientos observacionales. No obstante, esta autora sugiere que este último es muy acotado dado que en ciertos casos concretos no hay observaciones disponibles o son escasas. Otra de las características de dichas simulaciones consiste en explorar el espacio de posibilidades a través de prácticas de parametrización: “By this I mean running a simulation with multiple different parameterizations to establish an understanding of the boundaries inside which a phenomena takes place” (Jacquart, 2020, p. 12). Al correr una simulación con diversos ajustes en los parámetros físicos del modelo, las distintas soluciones arrojadas permiten comprender los límites o condiciones de contorno dentro de los cuales suceden ciertos fenómenos. Además, pese a la susceptibilidad

de los fenómenos complejos involucrados, la variabilidad de las condiciones iniciales establece cierta restricción sobre lo que no puede suceder. Ella sostiene que la información provista por las instantáneas (*snapshots*), logradas mediante las observaciones de ciertos objetos, puede dar lugar a una primera investigación. No obstante, sólo a través del empleo de simulaciones puede determinarse las condiciones límite y definirse el espacio de posibilidades en el cual se desarrolla y evoluciona un sistema astrofísico particular. Esta autora apela al argumento de la robustez, comparando las predicciones alcanzadas por distintos modelos construidos, los cuales se basan en supuestos similares. Ahora bien, ¿qué ocurre en aquellos casos donde no hay observaciones disponibles (o suficientes) de los estados o instancias finales de un proceso astrofísico exótico? Jacquart no responde puntualmente esta interrogante. Propone así una tercera capacidad epistémica de las simulaciones, a saber: la amplificación de las observaciones. En general, estas últimas se dan cuando los resultados alcanzados por una simulación proporcionan un nuevo contexto (a veces inesperado) en el cual se reinterpretan los datos observacionales disponibles. Según Jacquart:

“...occurs when the output of a simulation provides a new... context in which to interpret the data present in the observation... allow... to yield more information out of observational snapshots... provide a means by which to learn about features of the target system that they did not know about before, thus enhancing the information derivable from the observations.” (Jacquart, 2020, pp. 14-15)

Esta autora muestra dicha capacidad al considerar el ejemplo que propone, en particular la evolución de galaxias anilladas colisionales y la formación de estructuras como los rayos de la rueda (*spokes*) presentes en las regiones centrales de esta clase natural de objetos. Sin embargo, un estudio reciente reveló una simetría hexagonal sorprendente en la formación del centro de una exótica galaxia anular NGC 7020 (Dottori et al., 2021). Este último caso específico muestra que el descubrimiento fue estrictamente observacional y no se emplearon simulaciones que pudieran predecir la misteriosa forma geométrica que compone el núcleo de este fenómeno, ni tampoco las extrañas “asas” observadas. Más allá de la casuística, Jacquart insiste en que las simulaciones pueden arrojar resultados singulares, los

cuales generan un contexto muy peculiar que permite reinterpretar los datos obtenidos por la vía tradicional. Se considera aquí que el enfoque propuesto por esta autora conduce a un doble riesgo innecesario. Por un lado, es claro que en casos concretos donde la disponibilidad de datos observacionales es escasa o nula, las simulaciones no pueden ser validadas externamente. Esto conduce a establecer inferencias inciertas y a lograr datos simulados imprecisos, ya que no hay restricciones en el espacio de posibilidades. Por otro lado, no se entiende a qué tipo de contexto se está refiriendo y en qué ámbito. Más allá de las distinciones clásicas y actuales entre diferentes caracterizaciones de contextos en filosofía de las ciencias, ella establece un entorno novedoso e incierto para interpretar las observaciones y así amplificar propiedades o características observables de los fenómenos en cuestión. De ninguna manera queda claro el ámbito al cual se está refiriendo, sea teórico u observacional; sino más bien parece que alude a un marco especulativo de elucubraciones e inferencias, ausente de restricciones y sin permeabilidad empírica. En resumen: las instantáneas obtenidas de los distintos fenómenos que conforman el universo observable, hacen referencia a objetos específicos, a alguna de sus propiedades o a ciertos procesos involucrados. Sólo al comparar estas instantáneas con otras similares, las cuales supuestamente muestran distintos estados evolutivos, es posible realizar un “salto” inferencial que garantiza la pertenencia a la misma clase natural. Un contexto observacional estricto permite integrar las variadas imágenes correspondientes a un proceso astrofísico dado, tal como lo representan el *Atlas de Galaxias Peculiares* (Arp, 1966) o el *Atlas de Galaxias Australes* (Sérsic, 1968), entre otros más. A diferencia, las simulaciones de tal proceso no garantizan que cada instancia del mismo sea igual. Precisamente, sobre la misma base de datos observacionales pueden construirse simulaciones fiables, acotadas empíricamente. De lo contrario, las soluciones arrojadas pueden considerarse tan solo meras ficciones ajenas al contexto propio de las prácticas observacionales astronómicas. Las imágenes obtenidas de NGC 7020 revelan una estructura central en forma de anillo hexagonal con “asas” conspicuas en dos de los vértices diametralmente opuestos [Fig. 4].



Figura 4. Imagen del centro galáctico hexagonal de NGC 7020. Créditos: *International Gemini Observatory/NOIRLab/NSF/AURA/H. Dottori, R. J. Díaz, G. Gimeno* Image processing: T. A. Rector (University of Alaska Anchorage/NSF NOIRLab), M. Zamani (NSF NOIRLab) & D. de Martin (NSF NOIRLab)

Se infiere que estas características inusuales observadas se deben a que un número considerable de estrellas orbitan el centro galáctico, con trayectorias que atraviesan regiones más y menos densas, provocando una rara resonancia orbital. Estas instantáneas representan visualmente un estado evolutivo, correspondiente a procesos astrofísicos muy variados, el cual se halla demasiado lejos de aquellas alternativas con las que puede compararse. La singularidad del caso repercute en la sofisticación de poder simularlo. Dada la escasez de datos observacionales disponibles resulta difícil generar simulaciones viables que arrojen resultados confiables, y no elucubraciones teóricas, que puedan ser contrastados a medida que las mismas iteran. En definitiva, el estatus epistémico de los datos simulados logrados dependerá de las prácticas de parametrización asociadas a las estrategias de validación externa existentes. A continuación, se analizarán algunas.

IV. Parametrizaciones y validaciones

Cuando faltan datos de observación para validar una teoría o una suposición, la astronomía tiene varias técnicas disponibles. Una de estas últimas es el uso de simulaciones por computadora. Los investigadores utilizan simulaciones (Heng, 2014) con la esperanza de crear un “panorama general” de los fenómenos astronómicos, aparentemente no relacionados. Desde principios de siglo, existe una tendencia en crear grandes simulaciones para emular o recrear todo el universo en una sola. Una de las primeras simulaciones masivas creadas es el proyecto *Milenium* o también conocido como *Illustris* a principios de los años dos mil. A partir de ahí aparecieron otros como *EAGLE*, *BlueTides* o *MassiveBlack II*, sólo por citar algunos. Varios de estos proyectos fracasaron estrepitosamente, mientras que otros se tornaron laboratorios astronómicos robustos. Uno de los fracasos más notables fue reportado por un grupo de científicos hace una década (Scannapieco et al. 2012). En este experimento, se pidió a varios investigadores que simularan una galaxia utilizando el código que habían desarrollado. Los resultados no fueron todos iguales, no coincidieron ni con las expectativas teóricas, ni con las restricciones observacionales. El experimento frustró, en parte, la disponibilidad de una herramienta que se consideraba esencial para la validación externa de simulaciones en astronomía. A pesar de estos contratiempos, y gracias a una mejor comprensión de las supernovas y de los agujeros negros, el rendimiento de este tipo de simulaciones ha mejorado considerablemente en los últimos años.

En la actualidad, el empleo de modelos específicos jerárquicamente relacionados entre sí, es una estrategia común para el diseño de simulaciones computacionales en esta ciencia natural. Según Heng, esta táctica ampliamente utilizada en climatología, permite que varios modelos con diferentes niveles de complejidad proporcionen una comprensión (paso a paso) de los fenómenos involucrados y así poder aislar determinados efectos físicos. Afortunadamente, en la actualidad, no es necesario emplear demasiados parámetros libres. Así, se eliminan los riesgos de datos de entrada incorrectos. En este sentido, puede diseñarse un código que exprese y represente adecuadamente los objetos, sus propiedades o cualidades físicas. Los parámetros libres son empleados dentro de una simulación al intentar reproducir fenómenos complejos que interactúan de alguna u otra manera. En algunos casos, un simulador puede creer que el paráme-

tro libre considerado expresa, adecuadamente, un dato de entrada. Ello se debe a que el mismo ha sido validado, según el comportamiento esperado, en otras simulaciones. El uso de este tipo de parámetros es tan común, y necesario, ya que sin ellos no podrían llevarse a cabo simulaciones básicas. Sin embargo, a lo largo de la reciente historia, astrónomos destacados han hecho un mal uso de ellos para dar respuestas a algunos fenómenos desconocidos. Un breve ejemplo lo dan Namouni y Morais (2018, 2020), quienes intentan explicar el origen interestelar de los objetos (514107) 2015 BZ509, 2008 KV42 y (471325) 2011 KT19, que se encuentran en órbita retrógrada alrededor de Júpiter. Para ello simularon, mediante la reproducción de sus trayectorias potenciales, retrocediendo en el tiempo hasta 4,5 Ga (giga-años). Descubrieron que, en el mejor de los casos, un poco menos de veinte por ciento de dichas trayectorias coincidían con algunas concordantes con la de un objeto interestelar que haya quedado atrapado en el sistema solar. La simulación resulta absurda, ya que supone que no han cambiado las condiciones de dicho sistema, sin perturbaciones o alteraciones, durante ese lapso de tiempo; incluso, sin certeza de cuándo ni cómo ocurrieron los eventuales cambios.

A menudo, se hace uso de códigos provenientes de otras simulaciones. En ciertas ocasiones dichos códigos se consideran válidos por el solo hecho de que los resultados fueron publicados en revistas prestigiosas. Roundtree (2010) notó que en algunas investigaciones puntuales había comentarios sobre el empleo de estos códigos, haciendo referencia directa a los artículos, ampliamente citados, los cuales se relacionaban con la simulación original. Es importante aclarar que, si el código es incluido en una nueva simulación, no se cuestiona su validez salvo que produzca conflictos. Sin embargo, pueden surgir otros inconvenientes, aún si la inclusión de códigos de simulaciones ajenas no resulte conflictiva. Varios problemas emergen y se vuelven más evidentes cuando la simulación es sofisticada, o bien, si depende de una gran cantidad de parámetros libres. El error se encuentra en pensar a la simulación como una “caja negra” que no puede “romperse”, ni alterarse. En otras palabras, al no saber cómo puede falsearse la simulación, aún si existiera alguna forma conocida, no necesariamente arrojaría los datos esperados. De esta manera, debe tenerse cierto cuidado con esta práctica, ya que al falsificar los datos no se posee certeza alguna si, efectivamente, la simulación es o no válida.

Oberkampff y Roy (2010, 481-483) dicen que si la simulación tiene algunos requisitos en términos de un tipo de precisión (exactitud), entonces siempre podemos falsificarla agregando suficientes datos para hacerlo. Aunque Oberkampff y Roy se refieren a demostraciones basadas en hipótesis estadísticas, se puede extenderlas a tipos de error lógico. Hay dos tipos: por un lado, el riesgo del constructor del modelo y, por el otro, el riesgo del usuario del modelo. El riesgo del constructor, que puede surgir tanto desde el punto de vista computacional como experimental, es el error de rechazar la validez del modelo cuando éste es válido. El riesgo del usuario, en cambio, es la aceptación de la validez del modelo cuando éste no es válido. Este último riesgo es el más peligroso de los dos tipos. Por ejemplo, si tenemos un error numérico causado por no ser lo suficientemente preciso en la colocación de una “malla”, y si los resultados computacionales coinciden con los resultados experimentales, entonces la comparación es engañosa. Se tiende a compensar o anular los errores de comparación. Para Oberkampff y Roy estas compensaciones son habituales. Si hay suficiente evidencia experimental para validar el modelo, hay poco interés en cuestionar su validez.

En la última década, con el auge de la inteligencia artificial, cada vez más investigadores intentan utilizar el aprendizaje automático en sus simulaciones. Estas técnicas pueden ayudar a encontrar nuevos patrones en la simulación y facilitar la construcción de nuevos conjuntos de datos que no podían obtenerse debido a cuestiones de limitaciones computacionales. Lovell et al. (2022), emplearon exitosamente esta estrategia al entrenar un modelo astrofísico particular, implementando una simulación de gran resolución, la cual no hubiera sido posible sin un entrenamiento periódico. Estos autores tuvieron el cuidado suficiente de abordar el error de generalización, que consiste en hacer predicciones incorrectas cuando al aprendizaje automático se le presentan datos nuevos que no se esperaban dentro de los datos de entrenamiento originales. Su solución fue incluir grupos del proyecto *C-EAGLE* en el conjunto de entrenamiento, lo que permitió utilizar el modelo en volúmenes de simulación cada vez más grandes. Según ellos, el aprendizaje automático utilizado de esta manera no puede considerarse una “caja negra”, ya que ofrece “conocimientos” por su modelo predictivo y también puede brindar los valores de las ponderaciones otorgadas a partir de sus parámetros de entrada. Según estos autores, este caso permite la oportunidad de “aprender de manera imparcial” cuáles

son los parámetros que mejor podrían explicar un fenómeno determinado. Esta es una forma poco ortodoxa de interpretar el aprendizaje maquínico, donde la atención se centra en los parámetros de entrada en lugar del proceso de intentar crear o recrear los fenómenos. A pesar de darle una lectura caritativa, el riesgo de usuario aportado por Oberkampff y Roy se encuentra presente. En síntesis, no podemos estar seguros de que no tengamos errores numéricos que concuerden con los datos de *C-EAGLE* y hayamos entrenado el aprendizaje automático para que concuerde con las entradas incorrectas. Cabe destacar que *The MillenniumTNG Project*, que se encuentra actualmente en desarrollo, intenta resolver algunos problemas de validación que fueron mencionados anteriormente; en particular, la relación entre distintas simulaciones y sus códigos. Uno de los objetivos de este proyecto es combinar las simulaciones hidrodinámicas con aquéllas que consideren sólo materia oscura (*Dark matter-only*), mediante el uso de modelos semianalíticos. Aunque estas investigaciones resuelven potencialmente algunos de los problemas de validación planteados, los riesgos del usuario y del constructor del modelo pueden estar todavía presentes.

V. Conclusiones

Al considerar los diferentes roles epistémicos de las simulaciones, podemos concluir que el tipo de conocimiento válido producido, a través de estas prácticas astronómicas, requiere algún vínculo con las observaciones tradicionales. Así, los contextos en los que ocurrirían dependen del tipo de simulación utilizada. En particular, los resultados de las simulaciones de observaciones están condicionados por un modelo de observación específico. Las parametrizaciones subyacentes restringen el espacio de posibles soluciones y las inferencias ampliativas se correlacionan con los datos observacionales. Al reinterpretar estos últimos, la reproducción permite una comprensión más profunda del fenómeno estudiado.

En el caso de las simulaciones *per se*, tanto la prueba de hipótesis como la exploración del espacio de posibilidades son técnicas que podrían, eventualmente, quedar fuera del alcance de las prácticas observacionales asociadas al ámbito de la simulación computacional. Curiosamente, el tipo de conocimiento astrofísico producido podría referirse a cierta clase de inferencias ampliativas, altamente especulativas, válidas sólo en un contexto de búsqueda teórica. Incluso, la ampliación de las observaciones po-

dría considerarse una habilidad de la imaginación más que una capacidad epistémica. El riesgo de emplear este recurso es elevado, ya que depende de la verosimilitud de los supuestos como de la selección y el ajuste de parámetros con un alto grado de libertad, permitiendo diferentes flujos de soluciones probables. De esta manera, los resultados de las simulaciones pueden ser verificables pero no validados, es decir, correctos pero no comprobables empíricamente.

Referencias:

- Arp, H. (1966). *Atlas of Peculiar Galaxies*. California: California Institute of Technology.
- Bozzoli, M.; Domínguez, M. (2023). “Aspectos epistemológicos sobre la validación de modelos computacionales en cosmología”. *Argumentos de Razón Técnica*. Vol. 26, pp. 249-273.
- Bozzoli, M.; Paz D. (2023). “Validación de observaciones y de simulaciones astrofísicas: un enfoque epistemológico”. *Revista Disertaciones*. Vol. 12, No. 1, pp. 43-68.
- Bozzoli, M. (2019). *El rol de los instrumentos y la simulación en la observación astronómica contemporánea: un enfoque epistemológico*. Córdoba: Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba.
- Chang, H. (2004). *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*. Oxford: Oxford University Press.
- Chang, H. (2005). “A Case for Old-Fashioned Observability, and a Reconstructed Constructive Empiricism”. *Philosophy of Science*. Vol. 72, No. 5, pp. 876-887.
- Dottori, H. et al. (2021). “The Population of H II Regions in NGC 7020”. *The Astronomical Journal*. Vol. 161, No. 4.

- Guillemot, H. (2010). "Connections between simulations and observation in climate computer modeling. Scientist's practices and "bottom-up epistemology" lessons". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. Vol. 41, pp. 242-252.
- Hacking, I. (1989). "Extragalactic Reality: The Case of Gravitational Lensing". *Philosophy of Science*. Vol. 56, No. 4, pp. 555-581.
- Hacking, I. (1983). *Representar e Intervenir*. Mexico: Paidós.
- Heng, K. (2014). "The Nature of Scientific Proof in the Age of Simulations". *American Scientist*. Vol. 102(3), pp. 174-177.
- Humphreys, P. (2004). *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. Oxford: Oxford University Press.
- Humphreys, P. (2013). "What are Data About", in *Computer Simulations and the Changing Face of Experimentation*, E. Arnold and J. Durán (eds). Cambridge: Cambridge Scholars Publishing.
- Jacquart, M. (2020) "Observations, Simulations, and Reasoning in Astrophysics". *Philosophy of Science*. Vol. 87, pp. 1209-1220.
- Kosso, P. (1988). *Observability and Observation in Physical Science (Synthese Library)*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Kosso, P. (2006). "Detecting Extrasolar Planets". *Studies in History and Philosophy of Science*. Vol. 37, pp. 224-236.
- Lovell, C. C. et al. (2022). "A machine learning approach to mapping barions on to dark matter haloes using the eagle and C-EAGLE simulations". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 509(4), pp. 5046-5061.
- Namouni, F.; Morais, M. H. M. (2018). "An interstellar origin for Jupiter's retrograde co-orbital asteroid". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. Vol. 477(1), pp. 117-121.



- Namouni, F., Morais, M. H. M. (2020). "An interstellar origin for high-inclination Centaurs". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 494(2), pp. 2191-2199.
- Oberkampff, W.; Roy, C. (2010). *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Reiss, J. (2019). "Against external validity". *Synthese*. Vol. 196, No. 8, pp. 3103-3121.
- Roundtree, A. K. (2010). "The rhetoric of computer simulations in astrophysics: a case study". *JCOM*. Vol. 9(3).
- Sérsic, J. L. (1968). *Atlas de Galaxias Australes*. Córdoba: Observatorio Astronómico de Córdoba.
- Scannapieco, C. et al. (2012). "The Aquila comparison project: the effects of feedback and numerical methods on simulations of galaxy formation". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 423(2), pp. 1726-1749.
- Shapere, D. (1982). "The Concept of Observation in Science and Philosophy". *Philosophy of Science*. Vol. 49, No. 4, pp. 485-525.
- Shapere, D. (1989). "El Concepto de Observación en Ciencia y en Filosofía". *Filosofía de la Ciencia: Teoría y Observación*. L. Olivé y A. R. Pérez Ransanz (trad. y eds.). México: Siglo XXI Editores – UNAM.
- Shapere, D. (1993). "Astronomy and Antirealism". *Philosophy of Science*. Vol. 60, I, pp. 134-150. Chicago: The University of Chicago Press.
- Vogelsberger, M. et al. (2020). "Cosmological Simulations of Galaxy Formation". *Nature Reviews Physics*. Vol. 2, pp. 42-66.

Vogelsberger, M. et al. (2014a). “Properties of galaxies reproduced by a hydrodynamic simulation”. *Nature*. Vol. 509(7499), pp. 177-182.

Wilson, K. (2017). “The case of the missing satellites”. *Synthese*. Vol. 198(21), pp. 1-21.

