

## Modelos idealizados y representación Z: El caso del *liquid drop model* en física nuclear

### The usefulness of distorted representations: The case of the *liquid drop model* in nuclear physics

Nibaldo Patricio Lorca Améstica<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0004-3328-3083>

1. Pontificia Universidad Católica de Chile

**Autor correspondiente /  
Correspondence:**  
Nibaldo Lorca Améstica  
nplorca@uc.cl

**Recibido:** 29 de Noviembre 2023  
**Aceptado:** 24 de Mayo 2024  
**Publicado:** 28 de Junio 2024

**Received:** November 29, 2023  
**Accepted:** May 24, 2024  
**Published:** June 28, 2024

This work is licensed under a  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License

Los modelos científicos son herramientas epistémicas empleadas con el objetivo de estudiar los fenómenos naturales en la práctica científica. El diseño de los modelos incluye distintas idealizaciones que son utilizadas de forma deliberada para facilitar su uso. Ahora bien, cabe cuestionar el rol de dichas idealizaciones en la práctica científica, ya que muchas veces estas representan los fenómenos de un modo que no coincide con nuestro conocimiento de este. En este artículo, afirmo que los modelos científicos no desempeñan una función epistémica *a pesar de ser* idealizaciones, sino que cumplen dicha función *gracias a* que son representaciones idealizadas de los fenómenos. De este modo, el objetivo del artículo es explicar cómo dichas idealizaciones representan los fenómenos de un modo tal que permite que estas cumplan su función epistémica. Utilizo el caso de estudio del *liquid drop model* (LDM) en física nuclear, ya que la representación idealizada del núcleo resulta indispensable para que el LDM funcione de modo óptimo. El LDM da cuenta de la estabilidad del núcleo con relación a su número másico y predice la fisión nuclear a través del cálculo de la energía de ligadura. Este es un modelo nuclear que representa al núcleo *como si* fuera una gota de líquido clásico; dicha idealización es deliberada y esencial para los propósitos epistémicos del modelo. Utilizo la teoría de la representación Z (*representation-as*) para explicar cómo la idealización representa al fenómeno objetivo y permite atribuirle propiedades a este, que es un aspecto relevante para explicar la función epistémica de la representación científica.

**Palabras clave:** modelos científicos, *liquid drop model* (LDM), autonomía del modelo, representación Z (*as-if*), función epistémica

Scientific models are epistemic tools used in scientific practice to study natural phenomena. The model design integrates different idealizations deliberately employed to facilitate the use of the model. However, we could question the role of such idealizations and distortions since these usually represent the phenomena in a way that does not coincide with our background knowledge. In this paper, I affirm that scientific models do not fulfill their epistemic function *despite* being distortions; instead, they accomplish such function *because* they are idealized representations of the phenomena. Thus, this paper aims to explain how such idealizations represent the phenomenon, facilitating the accomplishment of their epistemic functions. I use the liquid drop model (LDM) in nuclear physics as my case study since the idealized representation of the nucleus is essential for the LDM to accomplish its epistemic function optimally. The LDM accounts for the stability of the nucleus relative to its mass number and predicts nuclear fission through the binding energy calculus. This nuclear model represents the nucleus as a classical liquid drop; such distorted representation is deliberate and indispensable to fulfill its epistemic purpose. I use the theory of representation Z (*representation-as*) to explain how the idealization represents the target phenomenon and allows the attribution of properties to it, which is a relevant aspect of explaining the epistemic function of scientific representation.

**Keywords:** Scientific models, liquid drop model (LDM), model autonomy, representation Z, epistemic function



UNIVERSIDAD DE TARAPACÁ  
*Universidad del Estado*

## 1. INTRODUCCIÓN

La ciencia es una empresa epistémica que estudia los fenómenos naturales por medio de teorías y distintos métodos de investigación; los modelos científicos son uno de estos métodos y resultan cruciales para el desarrollo de la práctica científica. Dichos modelos pueden caracterizarse inicialmente como sistemas idealizados que representan a un sistema objetivo (*target*) de un modo determinado, remarcando así ciertas cualidades de aquel y variando en su grado de abstracción y desviación del objetivo (Gieryn, 1988, pp. 79-80). La relación representacional entre el modelo y el sistema objetivo varía de caso a caso, aunque en principio se puede sostener que el modelo representa al fenómeno porque ambos son similares en ciertos aspectos (Morrison & Morgan, 1999, p. 4). Esta semejanza se cimienta en la presencia de propiedades compartidas que permiten obtener información acerca del fenómeno a través del modelo. Se espera que las propiedades observadas en el modelo también sean apreciables en el fenómeno (Frigg & Nguyen, 2020, p. 31). No obstante, hay casos en los que no es viable apelar a un criterio de semejanza para justificar la relación representacional entre el modelo y el fenómeno.

Los modelos son idealizaciones de los sistemas que representan, por lo que es esperable que se incluyan *falsedades* en su descripción del fenómeno; es decir, que incluyan en su representación un cierto grado de *desviación* con respecto al fenómeno objetivo. Estas distorsiones, modificaciones, simplificaciones, omisiones y/o ficciones son empleadas de forma deliberada para que sea más fácil el estudio del caso y, así, obtener información acerca de este (Bokulich, 2011, p. 37). El tema central de este trabajo es dar cuenta de la función que cumplen estas idealizaciones y cómo representan fenómenos físicos, ya que son esenciales para la obtención de información acerca del sistema objetivo. Los modelos científicos no desempeñan una función epistémica a pesar de ser altamente idealizados, sino que cumplen dicha función gracias a que son representaciones altamente idealizadas de los fenómenos.

Ahora bien, mi objetivo es centrarme en un tipo particular de idealizaciones, que denomino *representaciones altamente idealizadas*. Distintos autores han discutido la utilidad epistémica de las idealizaciones empleadas en ciencias (véase Potochnik 2017, Strevens 2007, Wimsatt 2007, por mencionar algunos); por ejemplo, Potochnik (2017) explica cómo se relaciona el uso de las idealizaciones con el objetivo de las ciencias (sin reducir este a la búsqueda de *verdades* acerca del mundo). Sin embargo, no pretendo dar cuenta de *todos* los tipos de idealizaciones o de las idealizaciones científicas en general (dicha labor ameritaría su propio artículo), sino enfocarme en un tipo particular de idealización presente en los modelos científicos y explicar cómo dichas idealizaciones representan fenómenos físicos de un modo que las hace epistémicamente útiles para la investigación científica.

Potochnik define a las idealizaciones (en general) como presuposiciones realizadas sin tener en consideración si estas son verdaderas respecto del fenómeno objetivo y muchas veces con total consciencia de que son falsas (2017, p. ix). Las idealizaciones son un tipo de presuposiciones *falsas* acerca del fenómeno que cumplen el objetivo de ayudarnos en nuestro estudio y comprensión del objeto idealizado. Siguiendo con la idea de Potochnik, el rol de las idealizaciones es remarcar el patrón causal que subyace al sistema en estudio<sup>1</sup> (2017, pp. 18-19). Estoy de acuerdo con la importancia de las idealizaciones para la manipulación de variables y en que ello contribuye al estudio de los fenómenos complejos, como argumentaré usando mi ejemplo de física nuclear.

Tomando la idea inicial de Potochnik (2017), caracterizo a las representaciones altamente idealizadas apelando a dos condiciones particulares: 1) sabemos que las presuposiciones empleadas son falsas de acuerdo con nuestro conocimiento del fenómeno, y 2) no son eliminables por medio de un proceso de de-idealización y corrección, pues son una parte íntegra del diseño del modelo. Estas condiciones no son exhaustivas para caracterizar a las idealizaciones; puede haber otros tipos de idealizaciones que se caractericen apelando a otras condiciones. El objetivo del trabajo es presentar un tipo de idealizaciones *drásticas* y dar cuenta de cómo representan fenómenos físicos.

La primera condición es cuestionable, ya que todas las idealizaciones incluyen presuposiciones que sabemos que, en mayor o menor medida, no se corresponden con el fenómeno real. Tómense como ejemplo los clásicos planos sin fricción o proyectiles sin resistencia del aire: sabemos que los planos tienen fricción y que sí hay resistencia del aire en el movimiento de los proyectiles, y no se considera a estas abstracciones como representaciones altamente idealizadas de la dinámica. Para definir a una representación como *altamente* idealizada es menester hacerlo apelando a un parámetro que establezca el grado de desviación de la representación con respecto a lo representado. Todas las idealizaciones involucran un cierto grado de desviación, dado que presentan una serie de modificaciones con respecto al fenómeno que representan. Por ello, defino la primera condición apelando a un *alto* de grado de desviación en la representación. *¿Cómo se definen los grados de desviación de una representación?* Los modelos científicos (idealizados) plantean distintas modificaciones y omisiones de las propiedades del fenómeno, pero también hay casos en los que se agregan nuevas propiedades a dicho fenómeno objetivo. Las idealizaciones con un menor grado de desviación solo involucran omisiones y modificaciones de las propiedades ya existentes del fenómeno; en cambio, las idealizaciones con mayor grado de desviación agregan nuevas propiedades, que sabemos que el fenómeno no posee. La categorización de estas distinciones se explicará más adelante apelando a los ejemplos que se verán a lo largo

del trabajo; por ejemplo, el *liquid drop model* presenta un alto grado de desviación al agregar propiedades del líquido clásico (la tensión de superficie) a un objeto cuántico (el núcleo atómico). Otros ejemplos en física son la estratificación del interior del núcleo en capas del *nuclear shell model*, el diseño del núcleo como un elipsoide del *Bohr-Mottelson model*, las propiedades de óptica clásica del *optical model* y los tres colores de los quarks en cromodinámica cuántica, por mencionar solo algunos. Cabe mencionar que no estoy considerando la atribución de *propiedades negativas*; es decir, *no* propiedades que se presenten como negaciones (por ejemplo, la *uniformidad* al interior del núcleo en el *liquid drop model* que resulta de omitir las interacciones entre nucleones), pues considero a estas como omisiones de propiedades ya existentes en el fenómeno.

La segunda condición es más fácil de explicar: las modificaciones de la idealización no son eliminables del diseño del modelo, pues se comprometería la función epistémica de este (para la cual el modelo fue diseñado). Batterman (2010) denomina estas idealizaciones *no tradicionales* (2010, p. 19), apelando a que no pueden ser corregidas ni eliminadas por un proceso de de-idealización, como propone McMullin (1985). El modelo de un péndulo (Morrison 1999, p. 46) puede ser corregido agregando datos más precisos (como *volviendo* a agregar la resistencia del aire), pero la *liquidez clásica* del *liquid drop model* no puede eliminarse, ya que dicha propiedad (integrada por la idealización) es necesaria para calcular la energía de ligadura del núcleo (véase sección 4). Otro ejemplo es el color en el *MIT model* acerca del confinamiento de color (Rodionov 1997) y la difracción óptica de la dispersión de energía elástica del núcleo (Hodgson 1963). El color de los quarks se propone para visualizar la carga de energía nuclear fuerte de los quarks al interior de los hadrones. El *color* no es real, solo el valor de la carga es real, por lo que el color (verde, rojo y azul) es eliminable siempre y cuando se mantenga el número cuántico asociado a la carga de color. En cambio, la dispersión de energía elástica es caracterizada por medio de una ecuación análoga a la difracción de Fraunhofer en la óptica (Martin & Shaw 2019, p. 57), de modo que dicha propiedad óptica no es eliminable sin comprometer el diseño y función del *optical model*<sup>2</sup>.

De este modo, las representaciones que abordaré en este trabajo son las que integran idealizaciones que no pueden ser eliminadas y, a su vez, presentan un alto grado de desviación con respecto al fenómeno objetivo (como es el caso del *liquid drop model* y el *nuclear shell model* que se revisarán en las secciones 3 y 4). El objetivo es explicar cómo estas idealizaciones representan los fenómenos físicos de modo que el modelo pueda cumplir la función epistémica para la cual fue diseñado.

Los modelos científicos son herramientas epistémicas empleadas por los agentes para estudiar los fenómenos que representan. Ahora bien, que el modelo cumpla

una determinada función epistémica no implica que dicho modelo tenga un valor epistémico por sí mismo. El modelo exhibe un cierto grado de autonomía con respecto a los datos y a la teoría, dado que, de lo contrario, la información que el modelo entrega ya estaría previamente contenida en la teoría o en los datos. La autonomía del modelo es esencial, pues permite que el modelo contribuya epistémicamente más allá de lo que nos dicen la teoría y los datos. Parte de esta autonomía se ve ejemplificada en el proceso de construcción del modelo, considerando que las decisiones relativas a su diseño dependen del contexto de la investigación científica. De acuerdo con el caso de estudio, se pueden integrar distintos tipos de idealizaciones que se consideren relevantes para que el modelo funcione de modo óptimo. Para sostener mi tesis utilizo el caso del *liquid drop model* en física nuclear, con el objetivo de explicar cómo la representación altamente idealizada del núcleo resulta necesaria para que el modelo pueda entregarnos información acerca de los aspectos de interés del fenómeno.

En la sección dos me centro en describir el funcionamiento del modelo y profundizo en su carácter como agente autónomo; además, se explica la relación entre el modelo y el fenómeno, al igual que el rol que cumplen las idealizaciones para representar dicho fenómeno. Para ello, empleo el esquema de la representación Z, con el fin de explicar cómo un objeto puede ser representado por medio de un elemento Z que permite la modificación y atribución de propiedades Z a aquel. En la sección tres, paso al caso de estudio: el *liquid drop model* en física nuclear, que representa al núcleo *como si* fuera una gota de líquido clásico. Esta idealización (con un alto grado de desviación) es indispensable para el funcionamiento adecuado del modelo, ya que las propiedades del líquido clásico son cruciales para desarrollar la fórmula semiempírica de Weizsäcker que calcula la energía de ligadura. Finalmente, en la sección cuatro, considero cuestiones filosóficas acerca de este caso: se explica el carácter autónomo del modelo y se justifica la necesidad de la representación altamente idealizada del núcleo.

## 2. FUNCIONAMIENTO DE LOS MODELOS CIENTÍFICOS

Los modelos científicos son herramientas epistémicas construidas y diseñadas de acuerdo con propósitos epistémicos particulares y utilizando mecanismos representacionales específicos (Knuuttila, 2011, p. 267). Esta caracterización de los modelos se enfoca en el modo en que estos son usados por el agente en la práctica científica con el propósito de resolver ciertos problemas particulares. Los modelos son herramientas enfocadas a la obtención de resultados (*result-oriented*) que se consideran relevantes para la investigación en curso. Las funciones epistémicas que pueden cumplir son bastante diversas: entregar información acerca del sistema objetivo que representan, facilitar la comprensión de fenómenos comple-

jos, unificar distintos datos experimentales, permitir la aplicación de estructuras matemáticas a fenómenos físicos, y también explicar y predecir ciertos comportamientos de los sistemas representados, entre otras posibles.

Para que el modelo tenga un valor epistémico *per se*, este debe exhibir cierto grado de autonomía (Morrison & Morgan, 1999, p. 10). *¿Qué significa que un modelo sea autónomo?* La autonomía se refiere al grado de independencia parcial del modelo con respecto a la teoría y a los fenómenos: el modelo no se deduce de la teoría (*theory driven*) ni es un producto de los datos del fenómeno (*data driven*), lo que le da cierta independencia con respecto a estos (Suárez, 1999, p. 169). *¿Por qué es necesaria la autonomía?* El rol epistémico que desempeña el modelo se debe a que nos entrega información que no se limita a la que pueden ofrecernos la teoría o los datos (Suárez, 1999, pp. 171-172). Si un modelo es solo una extensión de la teoría, entonces entregaría información que ya estaba previamente contenida en esta. Si el modelo es derivado exclusivamente de los datos, entonces su función se limita a ordenar y hacer más manejables dichos datos. El modelo debe ser autónomo para que funcione como una fuente genuina de conocimiento *por mérito propio*. Por consiguiente, la autonomía del modelo garantiza la *novedad* de la información que nos provee.

La autonomía de los modelos permite que estos no sean necesariamente determinados ni por la teoría ni por los fenómenos que representan. Si bien puede haber una influencia de estos elementos a la hora de diseñar el modelo e integrar las idealizaciones que se consideran relevantes, aquella influencia no es relativa a una determinación *necesaria* del diseño del modelo. Hay cierta flexibilidad en la relación entre teoría, modelo y fenómeno, de modo que una misma teoría puede tener más de un modelo acerca de un mismo objetivo (Portides, 2011, p. 336). Los modelos son diseñados con el propósito de resolver problemas particulares de la investigación científica, por lo que su función y diseño se encuentran determinados por su contexto: los aspectos de interés del objeto de estudio, las preguntas que se estén realizando, el objetivo de la investigación, los presupuestos que se están asumiendo, etc. A partir de la variedad de funciones y propósitos que cumplen los modelos en la práctica científica, estos recurren a diversas idealizaciones, como simplificaciones, aproximaciones, omisiones, modificaciones y abstracciones del sistema que representan. Por consiguiente, corresponde distinguir entre la utilidad del modelo y la precisión de su representación, ya que un modelo más preciso no es necesariamente el modelo más útil en una investigación concreta (Cartwright, 1983, p. 131). Hay casos en los cuales el objetivo del modelo demanda precisión, pero hay otros donde una representación sumamente idealizada es mucho más útil<sup>3</sup>.

Por ejemplo, el modelo del péndulo debe ofrecer una descripción precisa del sistema objetivo para así

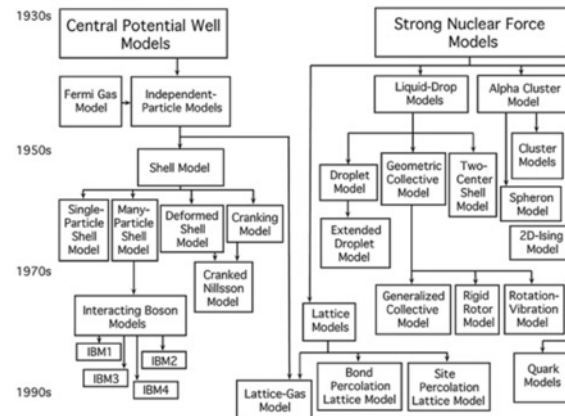
cumplir su función, pues informa acerca de casos concretos de péndulos reales. Dicho modelo es utilizado para proveer correcciones respecto del movimiento armónico de péndulos reales en contextos particulares de investigación (Morrison, 1999, p. 46). El modelo del péndulo – dado su propósito– debe ser preciso para ser útil. En cambio, hay casos en los que la utilidad del modelo no requiere de precisión en su representación. Así ocurre con el modelo de Prandtl, que es usado en hidrodinámica para aplicar las ecuaciones de Navier-Stokes y, de este modo, explicar el comportamiento de un fluido viscoso (Morrison, 1999, pp. 46-47). Para cumplir su objetivo, el modelo de Prandtl recurre a idealizaciones en su representación del fluido, separándolo por capas y haciendo posible la aplicación y solución de las ecuaciones de Navier-Stokes (Morrison, 1999, pp. 54-55). Un caso similar ocurre en los modelos del núcleo en física nuclear: la complejidad de los fenómenos nucleares requiere de distintas representaciones para dar cuenta de su variedad de comportamientos. La mecánica cuántica es la teoría que mejor describe el comportamiento de las partículas y del núcleo atómico; sin embargo, no hay una descripción teórica coherente y cabal acerca del modo en el que interactúan los nucleones al interior del núcleo (Cook, 2006, p. 2). Por ello se necesita de distintos modelos del núcleo atómico, cada uno basado en distintas presuposiciones y capaz de proveer información acerca de la estructura y comportamiento de los fenómenos nucleares<sup>4</sup>. Véase la figura 1, que presenta un esquema acerca de la familia de modelos del núcleo en física nuclear.

En la introducción adelanté que en este trabajo me centraré en el *liquid drop model* (LDM) en física nuclear. Este es un modelo de la rama de la fuerza nuclear fuerte (según el esquema de Kaal et al., 2021), que explica la cohesión del núcleo apelando a la interacción nuclear fuerte entre los nucleones al interior del núcleo atómico. El LDM resulta epistémicamente útil en física nuclear, porque entrega información acerca de la energía de ligadura (obtenida por medio de la fórmula semiempírica de Weizsäcker) que permite predecir la fisión nuclear. El LDM no busca responder a cuestiones teóricas de la mecánica cuántica acerca de la estructura nuclear, sino que su objetivo es dar cuenta de la estabilidad del núcleo en relación con su masa (Cook, 2006, pp. 56-57). De este modo, el modelo no necesita precisión en su descripción para cumplir su función epistémica.

No obstante, queda pendiente la siguiente pregunta acerca de la función epistémica del modelo: *¿cómo el modelo cumple su función epistémica si este representa al fenómeno por medio de idealizaciones?* Una opción es la aproximación que utiliza McMullin (1985), quien propone que estas idealizaciones se justifican por un proceso de *de-idealización* (Suárez, 1999, p. 178): las idealizaciones pueden ser corregidas y eliminadas por otros modelos más precisos. No obstante, las representaciones que busco caracterizar no pueden ser eliminadas de este

**Figura 1**

Familia de modelos del núcleo en física nuclear. Fuente: extraída de Kaal et al., 2021, p. 110

**Figuras 2 y 3**

Ángel con violín (1480) y Saturno devorando a su hijo (1823)



modo. Dichas idealizaciones *drásticas* cumplen un rol fundamental para el óptimo funcionamiento del modelo, ya que son una parte integral de su diseño. Tal es el caso del modelo de Prandtl (Morrison 1999) y del LDM (secciones 3 y 4); en ambos ejemplos son necesarias las idealizaciones para que el modelo cumpla su función epistémica. El problema de dichas idealizaciones es que representan al fenómeno en cuestión de una forma tal que no se corresponde con nuestro conocimiento acerca de dicho objetivo. Por ello, cabe cuestionar cómo estas idealizaciones representan al fenómeno de modo que facilitan la función epistémica del modelo.

No hay *una sola* teoría de la representación que dé cuenta de *todas* las iteraciones posibles de *representaciones*, ni siquiera dentro del área de la filosofía de las ciencias, por lo que este es un debate abierto<sup>5</sup>. No considero apropiado buscar una teoría de la representación *absoluta*, ya que esta varía en cada contexto, según el modo en el que se efectúa la representación científica; no obstante, considero que la teoría de la representación Z (*representation as*<sup>6</sup>) es una aproximación apropiada para explicar cómo los modelos altamente idealizados repre-

sentan los fenómenos físicos.

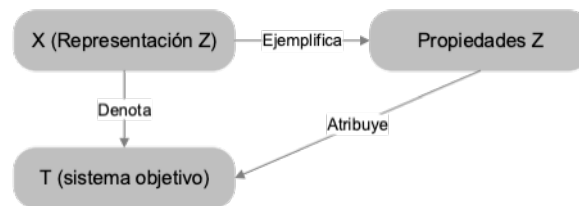
Primero, un aspecto central de la estructura representacional es la denotación: para que X represente a T, X debe denotar a T (Goodman, 1976, p. 5). De acuerdo con esta estructura, la denotación es necesaria para que X sea una representación de T. No obstante, X puede ser una representación sin objetivo (*targetless*), al ser una representación que no denota a ningún T. Hay una cierta independencia entre la representación X y el posible objeto representado, de modo que X puede ser una representación *de algo* independiente de la existencia del objetivo al que pueda o no representar. Véanse los siguientes ejemplos del arte: *Ángel con violín*, de Melozzo da Forlì (1480), y *Saturno devorando a su hijo*, de Francisco Goya (1823).

El cuadro *Ángel con violín*, de Melozzo da Forlì (figura 2), es un objeto X que retrata la *representación de* un ángel sin *representar a* (denotar a) ningún ángel. De igual modo, el cuadro *Saturno devorando a su hijo*, de Francisco Goya (figura 3), es una *representación de* Saturno sin *representar a* Saturno. El cuadro de Goya (X) no denota al objetivo Saturno (T), puesto que este no existe,

**Figura 4**  
*Mujer flor, de Picasso (1946)*



**Figura 5**  
*Esquema de la representación Z (Reconstrucción propia basada en el esquema presentado por Frigg & Nguyen, 2020, p. 150.)*



aunque sí lo retrata. Se distingue *representación de* con *representar a* (denotar). Corresponde agregar un nuevo elemento para terminar de esclarecer la estructura representacional: la representación Z. X es una representación de Z (representación Z) al retratar (*to portray*) al elemento Z. En el caso de Da Forli, el cuadro X es una representación Z de un ángel y, a su vez, el cuadro X de Goya es una representación Z de Saturno. En ambos casos, no hay un elemento T (ni un ángel ni Saturno) al que X denote por medio de su representación Z. X es una representación de Z que retrata a Z sin que esto implique necesariamente que X es una representación de T; para que X sea una representación de Z que representa a T, X debe denotar a T por medio de su representación de Z (Frigg & Nguyen, 2020, p. 145). Lo crucial de la estructura es poder separar la representación de un objeto del hecho de que dicha representación denote aquel u otro objeto existente.

La independencia entre la representación y lo representado es lo que permite que no toda representación de Z represente a Z, pues la representación de Z puede ser usada como un elemento que denote a otro objeto T. Véase otro ejemplo del arte (figura 4): la pintura *Mujer flor*, de Pablo Picasso (1946). Esta pintura es un retrato de Françoise Gilot, de modo que la pintura es un elemento X que representa a Gilot, al ser ella el elemento T denotado. Sin embargo, X denota a T (Gilot) por medio de la representación Z de una flor con ciertas cualidades an-

tropomórficas. El ejemplo traza un paralelismo que ilustra cómo X representa a T por medio de la representación de Z.

Ahora bien, *¿cuál es la utilidad de usar representaciones de Z para representar a T?* El aspecto crucial de estas representaciones es la ejemplificación de propiedades Z. X es una representación Z que ejemplifica ciertas propiedades relevantes de Z (o relativas a Z) en su retrato de dicho elemento (Elgin, 2010, p. 10). Las propiedades Z que X ejemplifica dependen del contexto y de los presupuestos que se sostengan, por lo que la representación remarca las propiedades que se consideren importantes para el caso de investigación. De este modo, la representación Z se utiliza para remarcar las propiedades de Z que luego son atribuidas al elemento T que X representa por medio de Z. Vuélvase al ejemplo del cuadro *Mujer flor*: Picasso utiliza la representación de una flor (Z) para ejemplificar la vitalidad y belleza (propiedades de Z) que luego atribuye a Gilot (T) por medio de su retrato (X) de ella (Oliveras, 2021, p. 56).

La teoría de la representación Z expone la siguiente estructura representacional: X representa a T como Z al ser X una representación de Z que denota a T. Mediante la representación Z de T se ejemplifican propiedades asociadas a Z que son atribuidas a T gracias a su representación como Z (véase la figura 5). La transferencia de cualidades permite que se prediquen las propiedades Z acerca de T, con indiferencia de si T tiene o no dichas

propiedades Z. Este proceso de atribución es el que le permite a la idealización tener un mayor grado de desviación del objetivo al atribuirle propiedades adicionales de Z que T no tiene y que sabemos que no tiene de acuerdo con nuestro conocimiento de T. La importancia de la atribución de propiedades Z a T es que permite el estudio de dichas propiedades en T y la generación de inferencias acerca de T a partir de la presuposición de que tiene las propiedades Z. X permite un trabajo epistémico relevante al facilitar esta clase de estudio y la generación de inferencias al respecto.

En esta sección presenté algunos ejemplos de representación Z en el arte para ilustrar la estructura representacional que propone esta teoría (entre los elementos X, Z y T). En las próximas secciones me centraré en explicar cómo se aplica esta estructura a los casos de representaciones altamente idealizadas en ciencias físicas, utilizando el LDM como ejemplo. En la sección 3 expongo mi caso de estudio y en la sección 4 se aplica la estructura representacional Z al LDM para dar cuenta de la representación altamente idealizada que presenta el modelo.

### 3. EL LIQUID DROP MODEL EN FÍSICA NUCLEAR

La física nuclear es la disciplina que estudia al núcleo atómico y sus propiedades, y las fuerzas que actúan entre los nucleones (Ferrer, 2015, p. 19). El modelo estándar de la teoría cuántica de campos es la mejor caracterización actual del núcleo, sus propiedades y comportamientos: el núcleo está compuesto de nucleones (protones y neutrones) que son hadrones enlazados entre sí por la fuerza nuclear fuerte y están, a su vez, compuestos de quarks, un tipo de partícula fundamental. La fuerza nuclear fuerte es una de las interacciones fundamentales de la física y es mediada por los gluones. Entre las partículas elementales, también están los leptones (electrones, por ejemplo), cuyas interacciones fundamentales con el núcleo atómico son descritas por la teoría de la electrodinámica cuántica y mediadas por los fotones. La última interacción fundamental que aborda la mecánica de campos cuánticos es la fuerza nuclear débil, que está presente en las desintegraciones beta y es mediada por los bosones  $Z^0$  y  $W^{\pm}$ . Esta es una pequeña introducción a la física nuclear y a la caracterización teórica del núcleo que propone una de nuestras mejores teorías científicas actuales.

Como se señaló en la figura 1, hay numerosos modelos distintos del núcleo, que se centran en caracterizar y dar cuenta de distintos comportamientos y fenómenos nucleares. El *liquid drop model* (Gamow, 1937) tiene como objetivo (*target*) la estabilidad del núcleo y, además, permite dar cuenta de la relación de esta con el número másico, la fisión nuclear y algunas desintegraciones radioactivas. El *liquid drop model*<sup>7</sup> fue desarrollado entre 1929 y 1936 con el propósito de responder a cuestiones experimentales de física nuclear, y no a especulaciones teóricas de la mecánica cuántica (Cook, 2006, p.

55). Es un modelo nuclear de tipo colectivo y de fase líquida: se representa al núcleo como un sistema enlazado que se encuentra en un estado similar al del líquido clásico, cuyas propiedades son el resultado *macro* de las interacciones entre los nucleones (Morrison, 2015, pp. 180-182). De este modo, el núcleo es retratado como una colección de nucleones enlazados por la fuerza nuclear fuerte y que interactúan entre sí de modo similar a como lo hacen las moléculas que componen una gota de líquido clásico (Cook, 2006, pp. 56-57). Además, este modelo fue usado por Lise Meitner en 1938 para dar cuenta de la fisión nuclear al interpretar los resultados anómalos que presentaban los experimentos de Hahn y Strassman (Rife, 2006, p. 182). El modelo de gota líquida fue necesario para que Meitner pudiera descubrir la fisión nuclear.

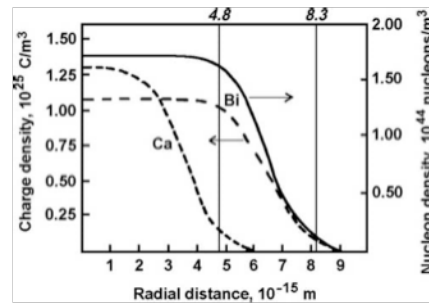
Gamow propuso el LDM con el objetivo de estudiar de forma aislada el núcleo y su estructura (Gamow, 1937, p. 3). Los electrones y sus interacciones con el núcleo fueron omitidos en la caracterización que presenta el LDM, ya que la función de onda del núcleo se veía afectada por su presencia: el cálculo para núcleos ligeros era relativista (dada la velocidad de los electrones que afectaba el *momentum* de la función), mientras que el cálculo para núcleos pesados (o sin electrones) era no relativista. Además, el modelo simplifica las relaciones entre nucleones ya que su complejidad conlleva al *many-body problem* en mecánica cuántica (Gamow, 1937, pp. 22-24), por lo que se representa la parte interna del núcleo con una densidad constante y uniforme. De este modo, se aproxima el radio del núcleo por medio del cálculo geométrico producto de su volumen y forma esférica. Sin embargo, el núcleo real no tiene dicha forma esférica, sino que tiene una región superficial cuya densidad disminuye de acuerdo con la función de la distribución Saxon-Wood, que explica la distribución de la densidad de la masa/carga del núcleo con respecto a su radio nuclear (véase figura 6).

Como se aprecia en la figura 6, la curva de la distribución de densidad de Bi comienza aproximadamente en 4.8 fm y termina en 9 fm (unidades de Fermi para el radio nuclear). La región superficial de Bi (también llamada corteza del núcleo) tiene una distancia radial mayor a la simplificación de 8.3 fm que realiza el LDM. El modelo modifica la curva de la distribución de la densidad, de modo que simplifica y aproxima la forma esférica del núcleo porque esto facilita su estudio general (Choppin et al., 2002, p. 50).

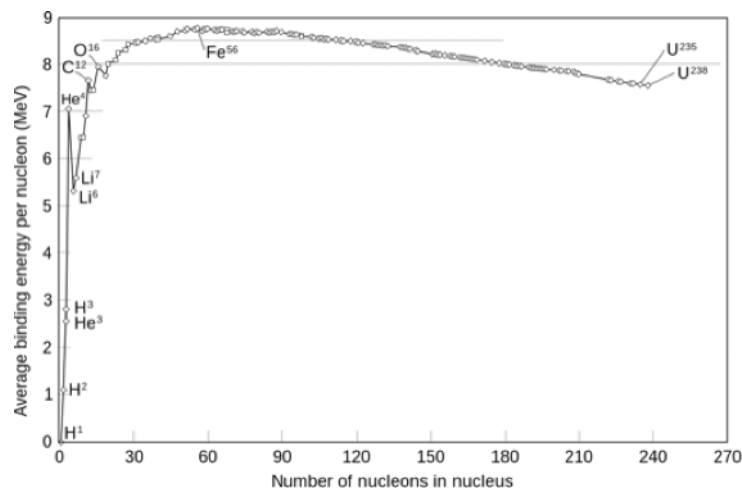
En física nuclear, es crucial el uso de representaciones que simplifican y aproximan información compleja del núcleo, ya que los modelos nucleares suelen funcionar como analogías que ayudan al desarrollo de hipótesis, a la aplicación de estructuras matemáticas y a dar cuenta de los datos experimentales (Cook, 2006, p. 55). En este contexto, el LDM resulta particularmente útil para calcular la energía de ligadura (*binding energy*). La energía de ligadura es la energía necesaria para *separar*

**Figura 6**

Curva de la distribución de densidad de los núcleos de calcio (Ca) y de bismuto (Bi). Fuente: Choppin et al., 2002, p. 49.

**Figura 7**

Energía de ligadura nuclear (binding energy) para distintos núcleos registrados experimentalmente. Fuente: Kaal et al., 2021, p. 116



un sistema enlazado (*bond system*); es decir, es la energía requerida para disociar al núcleo en sus nucleones constituyentes (Ferrer, 2015, p. 41). Esta energía se relaciona con el déficit de masa<sup>8</sup>, que es la pérdida de masa de un átomo cuando se compara su masa total con la masa resultante al sumar sus elementos constituyentes. Si se suma la masa de todos los nucleones, el resultado será mayor a la masa total del núcleo en cuestión. La *pérdida* de energía se explica por el proceso de formación del núcleo. De este modo, se necesita de la energía *perdida* para separar el núcleo. En los experimentos con átomos conocidos se logró calcular esta energía mediante el déficit de masa en cada caso, lo cual dio lugar a los datos experimentales presentados en la figura 7.

El LDM resulta útil para explicar los datos del gráfico (Morrison, 2015, p. 184), ya que estos pueden ser obtenidos por medio de la fórmula semiempírica de Weizsäcker o también llamada fórmula Bethe-Weizsäcker (Ferrer, 2015, p. 46), que se basa en la matematización del modelo. Dicha fórmula se denomina *semiempírica* ya que se basa en una combinación de mediciones de datos experimentales, ideas teóricas y, como veremos, analogías importadas por el modelo. De este modo, el modelo permite calcular con precisión la energía de ligadura del nú-

cleo (Portides, 2006, p. 93). Dicha fórmula es la siguiente:

$$BE = C_{vol}A - C_{surf}A^{2/3} - C_{Coul}Z^2A^{-1/3} - C_{sym}(A-2Z)^2A^{-1} - C_{pair}A^{3/4}\delta$$

Los valores de C son constantes obtenidas por distintas ecuaciones para cada término, las cuales son relativas a la cantidad de nucleones del núcleo (*mass number A*) y a su cantidad de protones (*atomic number Z*). La fórmula semiempírica involucra los siguientes términos:

Energía de volumen ( $C_{vol}A$ )

Energía superficial ( $C_{surf}A^{2/3}$ )

Repulsión culombiana ( $C_{Coul}Z^2A^{-1/3}$ )

Asimetría ( $C_{sym}(A-2Z)^2A^{-1}$ )

Energía de apareamiento ( $C_{pair}A^{3/4}\delta$ )

El cálculo de esta fórmula comienza con las propiedades relativas al tamaño del núcleo esférico: su volumen y superficie ( $C_{vol}A$  y  $C_{surf}A^{2/3}$ ). El volumen representa la fuerza nuclear fuerte entre los nucleones interiores del núcleo, de modo que  $C_{vol}$  se refiere a la interacción de cada par de nucleones (expresada por  $\frac{1}{2}\mu$  y multiplicada por la masa total A). La interacción nuclear fuerte entre los nucleones interiores es la que enlaza al núcleo. Por su parte, la energía superficial del núcleo refiere a los nucleones superficiales, que tienen menos interacciones



fuertes que los nucleones interiores. La energía superficial es negativa, ya que disminuye la estabilidad del núcleo; por ello, los núcleos muy grandes (con mayor superficie) son menos estables. Esta energía se calcula geoméricamente a partir de la superficie de una esfera ( $4\pi R^2$ ), pero usando el radio nuclear ( $R_0 A^{1/3}$ ) lo que resulta en:  $4\pi R_0^2 A^{2/3}$ , que es el valor de  $C_{surf} A^{2/3}$ .

La repulsión coulombiana ( $C_{Coul} Z^2 A^{-1/2}$ ) es tomada del estudio electromagnético y representa la fuerza de repulsión entre los protones ( $e^2/4\pi\epsilon_0 r_{av}$ ), multiplicada por la cantidad de interacciones entre protones ( $Z(Z-1)/2$ ). La carga de los protones hace que estos ejerzan una fuerza de repulsión entre ellos que se opone a la atracción de la fuerza nuclear fuerte, por lo que la repulsión coulombiana también es una energía que desestabiliza al núcleo.

Siguiendo con los términos restantes: la asimetría ( $C_{sym}(A-2Z)^2 A^{-1}$ ) denota el hecho de que los núcleos con cantidades similares de protones y neutrones son más estables en comparación a los núcleos con cantidades desiguales. El valor de asimetría se calcula a partir de la diferencia entre neutrones y protones ( $(A-2Z)^2$ ), dividida por la cantidad total de nucleones (A). Por su lado, la energía de apareamiento ( $C_{pair} A^{3/4} \delta$ ) se refiere a la tendencia (observada experimentalmente) de los núcleos con cantidades pares de nucleones a ser más estables que los núcleos con cantidades impares. Esta energía es proporcional a  $A^{3/4} \delta$ , donde  $\delta$  depende de si el núcleo tiene una cantidad par-par de protones y neutrones ( $\delta > 0$ ), par-impar ( $\delta = 0$ ) o impar-impar ( $\delta < 0$ ).

Mediante la fórmula semiempírica, el modelo facilita el cálculo de la energía de ligadura, permitiendo estudiar dicho aspecto del núcleo y otros relativos a este. En esta sección se ha explicado cómo se planteó el LDM, su funcionamiento en la práctica científica y la información que entrega acerca del núcleo. En la próxima sección se considerará por qué resulta esencial la representación altamente idealizada del modelo, utilizando los conceptos y la estructura representacional que se desarrolló en la sección 2.

#### 4. IMPORTANCIA DE LA REPRESENTACIÓN DISTORSIONADA

En la sección 2 se presentaron los conceptos centrales, relativos a la aplicación de modelos en la práctica científica; es decir, la función que cumple el modelo, su grado de autonomía y la estructura representacional de este de acuerdo con el esquema propuesto por la teoría de la representación Z. A partir de lo expuesto en la sección 3, se puede concluir que el *liquid drop model* cumple las siguientes funciones epistémicas: 1) facilita el entendimiento del fenómeno de fisión nuclear, tal y como señala el descubrimiento de Lise Meitner al utilizar el LDM para interpretar los resultados anómalos de los experimentos de Hahn y Strassman<sup>9</sup>; 2) contribuye en la elaboración de la fórmula semiempírica de Weizsäcker para calcular la

energía de ligadura del núcleo; 3) en relación con lo anterior, permite predecir la energía necesaria para disociar el núcleo mediante el cálculo de su energía de ligadura. De este modo, un agente epistémico puede utilizar la fórmula semiempírica para calcular que la energía de ligadura del uranio 238u es 7,57 MeV/A (mega electrón-voltios dividido por el número másico, es decir, la energía por nucleón), mientras que el uranio 235u requiere 7,6 MeV/A; por consiguiente, se puede concluir que el uranio 235u es más estable que el uranio 238u al requerir más energía para disociarse.

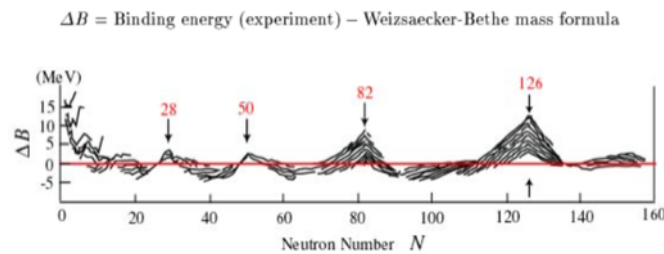
En esta sección corresponde explicar por qué resultan necesarias las idealizaciones que presenta el LDM para cumplir sus funciones epistémicas (utilizando la estructura de la representación Z). No obstante, primero explicaré el grado de autonomía del modelo para justificar su contribución epistémica.

Un modelo es autónomo cuando no es una consecuencia derivada de la teoría ni de los datos del fenómeno (Suárez, 1999, p. 169). Un modelo es dependiente de la teoría (*theory driven*) si se deduce de esta y funciona como una interpretación o extensión de ella. En física nuclear, no hay una teoría unificada que dé cuenta de todos los fenómenos nucleares (Cook, 2006, p. 2), pero, si tomamos como base teórica el modelo estándar de mecánica cuántica de campos, el LDM no es el resultado de una deducción, ni de una interpretación ni de una extensión de dicha base teórica. El LDM omite los quarks que componen a los nucleones al igual que las posibles interacciones entre los electrones y el núcleo, elementos presentes en el modelo estándar. El LDM se fundamenta en la analogía entre el núcleo y una gota de líquido clásico incompresible (Cook, 2006, pp. 56-57), por lo que es una consecuencia de dicha analogía, no del modelo estándar. Además, cabe recordar que en física nuclear hay una pluralidad de modelos nucleares que dan cuenta de distintos fenómenos relativos al núcleo (véase figura 1). Por sí sola, la pluralidad de representaciones no implica independencia de la teoría; no obstante, en este caso la argumentación se sostiene, ya que los distintos modelos involucran distintas idealizaciones con un alto grado de desviación<sup>10</sup> que no se cimentan en el conocimiento que el modelo estándar nos entrega del fenómeno<sup>11</sup>. Por consiguiente, la teoría no determina las posibles representaciones del núcleo, exhibiéndose así una independencia parcial entre la teoría y los modelos.

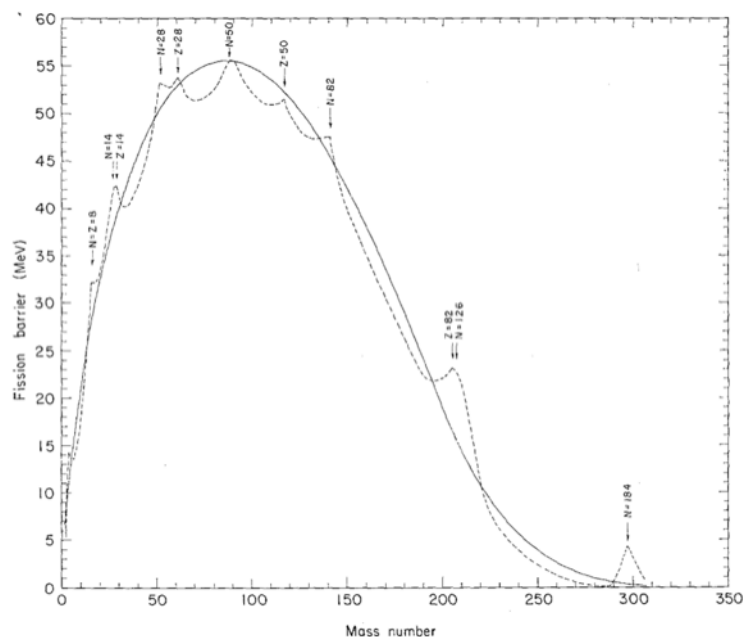
De modo similar, la pluralidad de representaciones demuestra que el modelo no está estrictamente determinado por los datos del fenómeno, ya que un mismo fenómeno objetivo (como la estabilidad del núcleo) cuenta con diversas representaciones, que exhiben distintos aspectos o variables del fenómeno. Tómese como ejemplo el *liquid drop model* y el *nuclear shell model* (Morrison, 2015). Ambos modelos dan cuenta del mismo fenómeno (la estabilidad del núcleo) y, por tanto, se refieren a los mismos datos experimentales, presentes en la figura 7.

**Figura 8**

Discrepancia entre el cálculo de la energía de ligadura y el registro experimental con números mágicos. Fuente: Heyde, 1994, p. 61.

**Figura 9**

Curva que ilustra los picos en los números mágicos respecto de la energía calculada para superar la barrera de fisión (energía de ligadura). Fuente: W. D. Myers & W. J. Swiatecki, 1966, p. 48.



Ahora bien, el *nuclear shell model* (NSM) explica los números mágicos, que son núcleos con un número mágico particularmente estable, algo que no es explicado por el LDM (Morrison, 2015, p. 191). En la figura 8 se presenta una desviación de la energía de ligadura ( $\Delta B$ ) registrada experimentalmente con respecto al cálculo de la fórmula semiempírica para ciertos números mágicos particulares (los números mágicos).

Se requiere de un modelo distinto al LDM para explicar estos casos particulares; de ahí la necesidad del NSM. El NSM utiliza un modelo de partículas simple (en contraposición con la representación colectiva del LDM): cada nucleón se mueve de manera independiente, por lo que el núcleo se representa como una interacción de A-cuerpos (Heyde, 1994, p. 58), ya que la cantidad  $n$  de cuerpos en interacción es dada por el número másico  $A$ . La interacción de los nucleones se describe utilizando una estructura simétrica esférica que representa la energía de ligadura media del núcleo. Los números mágicos son explicados por medio de esta estructura esférica que

se segmenta en niveles energéticos cuantizados –que se denominan *capas nucleares* (*nuclear shells*)–, lo que daría lugar a las configuraciones más estables exhibidas por dichos números mágicos particulares<sup>12</sup> (Ferrer, 2015, p. 116).

Ambos modelos representan de distinto modo un mismo fenómeno (la estabilidad del núcleo), sin que dicho fenómeno determine necesariamente el modo en que se realiza la representación. Por consiguiente, el LDM exhibe un cierto grado de autonomía, al no ser coartado ni por la teoría ni por los datos de disociación del núcleo. Ahora corresponde explicar cómo el LDM representa al núcleo por medio del esquema de la representación Z.

En primer lugar, se debe remarcar la diferencia entre la representación y lo representado en el caso de los modelos nucleares: un mismo T puede ser representado de diferentes modos por distintos  $Z_n$ . Este aspecto es crucial para aplicar la estructura representacional de la teoría Z, ya que se distingue la “representación de” de la acción de “representar a”, separando así a T de su repre-

**Figuras 10 y 11**

*Saturno devorando a su hijo (1636) y Mujer en la silla (1946)*



sentación Z por parte de X. Volviendo a los ejemplos de la historia del arte (sección 2), Saturno puede ser representado de modo  $Z_1$  por Goya (figura 2) o de modo  $Z_2$  por Rubens (figura 10); en ambos casos se tiene el mismo evento (Saturno devorando a su hijo), pero retratado de distinta manera. Ahora bien, tanto Goya como Rubens realizan una *representación* de Saturno sin *representar* a Saturno, por lo que veamos el ejemplo de la representación Z de Gilot. Picasso pintó más de un retrato de Gilot (T): está la representación  $Z_1$  de *Mujer flor* (figura 4) que se revisó en la sección 2, pero también está la representación  $Z_2$  de *Mujer en la silla* (figura 11). Hay dos representaciones Z de un mismo T (Gilot). Volviendo a la física, si reemplazo a Gilot como elemento T en el esquema representacional por el fenómeno de “la estabilidad del núcleo”, se observa el paralelismo al representar a T por medio del LDM ( $Z_1$ ) o por medio del NSM ( $Z_2$ ). En física, la diferencia de usar un modelo u otro responde a una necesidad investigativa de abordar ciertos aspectos particulares del fenómeno en cuestión. En este caso, el desarrollo del NSM responde a la necesidad de caracterizar a los números mágicos, lo que conlleva un cambio del modelo colectivo por un modelo de partículas simples y potenciales de energía.

Ahora bien, queda pendiente la pregunta central de este trabajo: *¿por qué es necesaria la representación altamente idealizada del núcleo?* La importancia de la representación Z de T radica en la ejemplificación de propiedades Z que luego son atribuidas al elemento T (impliándose así una idealización con un alto grado de desviación del objetivo). Picasso representó a Gilot (T) como una flor (Z) para atribuirle a Gilot la belleza y vitalidad que son ejemplificadas por la flor (propiedades Z). De modo similar, la representación del núcleo como una gota de líquido clásico incompresible tiene el propósito de atribuirle ciertas propiedades de la gota de líquido clásico al núcleo atómico. Sin embargo, hay una diferencia crucial entre los modelos nucleares y los retratos de Gilot: la ejemplifi-

cación y atribución de propiedades en las representaciones científicas de la física conllevan el desarrollo y aplicación de estructuras matemáticas que permiten la obtención de inferencias acerca del fenómeno T. En la última parte de este artículo se va a defender la importancia de la ejemplificación de propiedades Z por medio del LDM para desarrollar la fórmula semiempírica del Weizsäcker, lo que permite calcular y predecir la disociación del núcleo.

El LDM integra datos experimentales, conceptos teóricos y una caracterización del fenómeno dada por la analogía del modelo con el propósito de dar cuenta de la evidencia experimental (figura 7) y entregar una descripción comprensible de la estabilidad del núcleo (Morrison, 2015, p. 178). En la fórmula semiempírica, los términos correspondientes a la energía de apareamiento ( $C_{pair}A^{3/4}\delta$ ) y a la asimetría ( $C_{sym}(A-2Z)^2A^{-1}$ ) son entregados por los datos experimentales, ya que se observa una tendencia de los núcleos con cantidades pares de nucleones (energía de apareamiento) y con cantidades similares de protones y neutrones (asimetría) a ser más estables (Cook, 2006, p. 59). No obstante, la energía de apareamiento solo es constatada experimentalmente, mientras que la asimetría tiene justificación teórica por el principio de exclusión de Pauli<sup>13</sup>. Estos términos exponen la integración de elementos experimentales y teóricos en la fórmula semiempírica (de ahí su nombre) que se formula a partir del modelo. Sin embargo, otros términos de la fórmula se obtienen de la analogía que se expresa en la representación.

La representación del núcleo como si fuera una gota líquida clásica guía la obtención de la energía de volumen y superficial (Cook, 2006, pp. 58-60). La idea de energía superficial del núcleo ( $C_{surf}A^{2/3}$ ) se origina a partir de la tensión de superficie exhibida por los líquidos clásicos, que es la fuerza tangencial en el borde de la superficie del líquido y hace que este tienda a contraerse. Las moléculas de la gota ejercen una fuerza que las atrae en-

**Tabla 1**

Clasificación de distintos tipos de idealizaciones de acuerdo a su grado de distorsión y si son de-idealizables.

	Eliminable	No Eliminable
Menor grado de desviación	Omisión de los factores extranucleares.	Aproximación de la forma esférica del núcleo al modificar la distribución de su densidad.
Mayor grado de desviación	La propiedad del color en cromodinámica cuántica para caracterizar la carga de fuerza nuclear fuerte de los quarks <sup>14</sup> .	Propiedades de líquido clásico (tensión de superficie) que se atribuyen al núcleo.

tre sí; las moléculas interiores interactúan de forma equitativa con las demás moléculas que las rodean, mientras que las moléculas superficiales solo interactúan con las moléculas inmediatamente interiores a ellas, de modo que son atraídas hacia el interior de la gota. Las moléculas superficiales son *sostenidas* por las moléculas interiores, lo que genera la tensión superficial de la gota. La forma esférica de la gota es resultado de la tensión superficial y el hecho geométrico de que la esfera es la forma geométrica que abarca el mayor volumen dentro de la menor área. La tensión de superficie es una propiedad Z ejemplificada por el líquido clásico y atribuida al núcleo atómico por medio de la analogía del modelo. De este modo, se propone la siguiente característica del núcleo: los nucleones de la superficie de la gota exhiben un efecto similar a la tensión de superficie del líquido clásico, lo que genera el efecto de contracción (Choppin et al. 2002, pp. 50-51).

La analogía del modelo (X) representa al núcleo atómico (T) *como si* fuera una gota de líquido clásico (Z) y, de este modo, se le atribuye al núcleo la tensión de superficie (propiedad Z) que ejemplifica la gota de líquido clásico (Z). Se puede apreciar la estructura representacional Z de la figura 5.

El LDM permite la atribución de propiedades – ejemplificadas por el modelo– al núcleo atómico; esta es la utilidad del modelo. Ahora bien, *¿es necesaria la representación idealizada para que el LDM cumpla su función epistémica?* Sí. Al comienzo de esta sección se señalaron tres funciones epistémicas a partir de lo expuesto en la sección 3. De forma resumida, estas son las siguientes: 1) ofrecer una imagen inteligible del fenómeno, 2) permitir el desarrollo y aplicación de estructuras matemáticas, y 3) predecir ciertos datos del fenómeno. Me voy a centrar en la función  $F_2$  para explicar la utilidad de las idealizaciones: *¿por qué es necesaria la representación altamente idealizada para el desarrollo de la fórmula semiempírica de Weizsäcker?*

En particular, los términos relativos a la energía de volumen ( $C_{vol}A$ ) y a la energía superficial ( $C_{surf}A^{2/3}$ ) de la fórmula son sugeridos por la analogía del LDM, siendo estos valores proporcionales al número másico del núcleo y a las propiedades geométricas de la forma esférica

del modelo. El núcleo atómico real no es esférico como la gota del LDM, pues esta es una aproximación del radio nuclear (figura 6), y este aspecto es necesario para calcular la tensión superficial del núcleo, ya que se emplea el cálculo de la superficie de una esfera ( $4\pi R^2$ ), reemplazando R por el radio nuclear ( $R_0 A^{1/3}$ ). Además, tal y como se ha explicado en esta sección, dicha tensión superficial es atribuida al núcleo a partir de la analogía del modelo, por lo que es un valor matemático obtenido directamente de la representación distorsionada. Por consiguiente, dicha representación sí es esencial para obtener la fórmula semiempírica (función  $F_2$ ), que permite calcular la energía de ligadura del núcleo y predecir el fenómeno de disociación del núcleo (función  $F_3$ ); ergo, es indispensable la representación distorsionada para las funciones epistémicas del LDM.

Para finalizar, corresponde explicar por qué este caso es un tipo de idealización *drástica* como las descritas en la introducción, y cómo se integran en el diseño del modelo distintos tipos de idealizaciones, demostrando así que estas no son excluyentes. Las principales idealizaciones presentes en el modelo son las siguientes: 1) omisión de los elementos extranucleares del núcleo; 2) simplificación de las interacciones entre nucleones al interior del núcleo, dada su complejidad (omitiré el análisis de las consecuencias de esta idealización debido a su complejidad matemática); 3) aproximación de la curva de la distribución de densidad para establecer su forma esférica; 4) atribución de propiedades de líquido clásico al núcleo. Retomando las condiciones de la introducción para caracterizar mis idealizaciones, la idealización 1 es una idealización con un menor grado de desviación (solo omite factores, sin modificar otras propiedades o atribuir nuevas) y es eliminable, ya que Dirac demostró el cálculo relativista para núcleos ligeros considerando el *momentum* de los electrones (Gamow 1937, p. 5). La idealización 3 exhibe un menor grado de desviación, ya que es la modificación de la distribución de densidad del núcleo (la curva puede ser matemáticamente modificada para obtener un valor constante hasta el valor aproximado del radio nuclear y ahí disminuir drásticamente el valor de la densidad a 0), pero es una idealización que no es eliminable, pues es esencial la forma esférica para el cálculo de la

fórmula semiempírica. Finalmente, la idealización 4 atañe a la atribución de propiedades de líquido clásico (tensión de superficie) al núcleo por medio de la analogía, por lo que exhibe un alto grado de desviación, al atribuir propiedades que sabemos que el núcleo no posee y ser indispensable para el funcionamiento del modelo, ya que la tensión de superficie es uno de las variables en el cálculo de la energía de ligadura. Se pueden resumir las interacciones entre las condiciones de idealización (relativas a este caso) en la tabla 1.

De este modo, el *liquid drop model* integra distintos tipos de idealizaciones, demostrando que no son excluyentes entre sí, e incluyendo drásticas idealizaciones que no son eliminables y presentan un alto grado de desviación. En este trabajo utilicé la teoría de la representación Z para explicar *cómo* las representaciones que contienen este tipo de idealizaciones se pueden relacionar representacionalmente con fenómenos físicos. La atribución de propiedades Z permite que haya un alto grado de desviación y, a su vez, da lugar a que el agente epistémico pueda hacer uso de las propiedades Z para desarrollar estructuras matemáticas que permitan nuevas inferencias sobre el fenómeno (como fue demostrado con el ejemplo del LDM y la relación de las propiedades Z con la fórmula semiempírica). Esta caracterización de las idealizaciones y la representación de fenómenos físicos a través de estas no es una caracterización general de las idealizaciones, sino solo de un tipo particular de estas. De igual modo, las condiciones que usé para caracterizarlas no son exhaustivas, por lo que puede haber otros tipos de idealizaciones, susceptibles de ser caracterizadas usando otras estructuras representacionales. El propósito del trabajo fue caracterizar un tipo particular, apelando al esquema representacional Z.

## 5. CONCLUSIÓN

El modelo funciona como medio y fuente de obtención de conocimiento (y otros logros epistémicos), ya que nos entrega información que nos permite expandir lo que sabemos y entendemos acerca de los fenómenos representados (Morrison, 1999, pp. 39-40). El *liquid drop model* cumple este objetivo utilizando una representación no fidedigna del núcleo atómico, pues esto es necesario para que el modelo cumpla sus funciones. El modelo no busca imponer compromisos ontológicos acerca del núcleo ni responder a cuestiones teóricas acerca de la mecánica cuántica que subyace al comportamiento del núcleo o a su estructura nuclear, sino que su objetivo es fenomenológico, al buscar dar cuenta de ciertos comportamientos del fenómeno relativos a la estabilidad del núcleo respecto de su masa (Cook, 2006, pp. 56-57). Por lo tanto, el LDM no necesita ser preciso en su representación. El modelo se diseña como una herramienta epistémica que debe cumplir ciertas funciones, y hay casos —como el del LDM— donde es esencial la idealización drástica del fenómeno para que el modelo pueda ayudar al agente. Si

el fenómeno no fuese representado de modo altamente idealizado, entonces el modelo no sería una herramienta epistémica útil para la práctica científica.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

El autor no ha referido ningún potencial conflicto de interés en relación con el contenido de este artículo.

## FINANCIAMIENTO

El autor no declara fuente de financiamiento.

## NOTAS

1. No comparto la reducción causal que presenta Potochnik a su caracterización de las idealizaciones, pues considero que el patrón de dependencias que es representado por estas no tiene que reducirse a un sistema de relaciones causales. Potochnik toma esta idea de la tesis intervencionista de Woodward, 2003 (Potochnik 2017, p. 29); no obstante, no toda manipulación de relaciones implica un patrón causal, ya que puede haber una manipulación de relaciones no causales que sea epistémicamente relevante (Woodward, 2018, presenta una lectura no causal de su propia tesis intervencionista). No obstante, esta discusión excede los propósitos de este trabajo, por lo que queda pendiente para un futuro trabajo acerca de una caracterización no causal general de las idealizaciones.
2. Estas idealizaciones no eliminables no son metafísicamente vinculantes, pues no imponen un compromiso ontológico con lo representado. La desviación es propuesta en el diseño del modelo por razones epistémicas y pragmáticas (para que el modelo cumpla de modo óptimo con su función epistémica), por lo que no hay un compromiso ontológico con estas al conocerse que son desviaciones (esto es más notorio en los casos citados, en los que se conoce la *falsedad* de las idealizaciones). Véase Ruyant (2022) para una discusión acerca de la relación entre idealizaciones y realismo.
3. Véase Potochnik (2017), capítulos 3 y 4, para una discusión acerca de los objetivos de las ciencias y de cómo estos pueden no estar determinados por una búsqueda de verdades acerca del mundo.
4. Cook (2006) presenta a la *lattice representation of the nucleus* (representación enrejada del núcleo) como una posible descripción teórica y unificada del núcleo (2006, pp. V-VII). Dada la complejidad de este debate, no lo incorporo en este trabajo.
5. Véase Frigg & Nguyen (2020) para una extensa discusión sobre las distintas aproximaciones a la representación en ciencias y los problemas que estas afrontan.
6. Frigg & Nguyen refieren a los trabajos de Goodman (1976) y principalmente Elgin (2010) en el desarrollo de esta teoría de la representación (2020, p. 143).

7. La gran mayoría de referencias acerca del desarrollo y uso del *liquid drop model* han sido tomadas de obras sobre historia de las ciencias, y manuales de física y radioquímica. Véanse, principalmente, Cook (2006), Ferrer (2015), Rohlif (1996), Rife (2006), De la Peña (2006) y Gamow (1937).
8. La relación entre la masa y la energía es expresada por la ecuación de equivalencia masa-energía:  $E=mc^2$ .
9. Véase Rife (2006) para una explicación histórica mucho más acabada.
10. Véanse los ejemplos de física nuclear que se mencionan en la introducción, como el *optical model*, *nuclear shell model* y *Bohr-Mottelson model*.
11. Además, muchos modelos nucleares son inconsistentes entre sí, como es el caso del *liquid drop model* y el *nuclear shell model* (Morrison, 2015, pp. 177-187).
12. He simplificado la explicación del *nuclear shell model* (NSM), ya que este emplea el potencial de interacción de los nucleones para obtener el potencial medio fenomenológico, que permite explicar las propiedades nucleares a partir de la aproximación del potencial de interacción nucleón-nucleón (Ferrer, 2015, pp. 116-117). La explicación de los potenciales (como el potencial de Yukawa) requeriría una exposición más extensa de este modelo, lo que se aleja del foco de esta sección (y del artículo en general). Por ello, esta es una exposición resumida del NSM, con el objetivo de hacer una comparación simple con LDM y señalar que el fenómeno no determina su representación. Para una exposición más detallada del NSM, véanse manuales de física como Heyde (1994) o Ferrer (2015).
13. El principio de exclusión de Pauli establece que dos fermiones no pueden tener el mismo estado cuántico (Hacyan, 2016, pp. 73-74); es decir, no pueden *ocupar el mismo lugar*. En cada nivel de energía del núcleo hay una cantidad finita de *lugares disponibles*, por lo que los fermiones deberán ocupar estados energéticos más altos si los estados menores *están ocupados*. Los protones y neutrones ocupan distintos estados cuánticos, por lo que sus cantidades similares mantienen un balance energético del núcleo. Ahora bien, si hay una mayor cantidad de un tipo de partícula, entonces se ocuparán estados energéticos más altos, lo que desestabilizará al núcleo, al ser mayor su energía total.
14. No tengo un ejemplo de esta interacción de condiciones en el *liquid drop model*, así que tomo este ejemplo de QCD ya que 1) la propiedad del color de los quarks (verde, azul y rojo) solo se utiliza para hacer más intuitiva la carga de color de estos; y 2) presenta un alto grado de desviación al atribuirle a los quarks una propiedad que sabemos que no tienen: el color.

## REFERENCIAS

- Batterman, R. (2010). On the explanatory role of mathematics in empirical science. *British Journal for the Philosophy of Science*, 61(1), 1-25. <https://doi.org/10.1093/bjps/axz001>
- Bokulich, A. (2011). How scientific models can explain. *Synthese*, 180, 33-45. <https://doi.org/10.1007/s11229-011-9888-2>
- Cartwright, N. (1983). *How the laws of physics lie*. Oxford University Press.
- Choppin, G., Liljezin, J. O. & Rydberg, J. (2002). *Radiochemistry and nuclear chemistry* (3a ed.). Butterworth-Heinemann.
- Cook, N. (2006). *Models of the Atomic Nucleus*. Springer.
- Elgin, C. Z. (2010). Telling instances. En R. Frigg & M. C. Hunter (eds.), *Beyond mimesis and convention: representation in art and science* (pp. 1-18). Springer.
- Ferrer, A. (2015). *Física nuclear y de partículas*. Universitat de València.
- Finio, B. (2023, octubre 21). *Measuring Surface Tension of Water with a Penny*. [https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Chem\\_p021/chemistry/measuring-surface-tension-of-water-with-a-penny](https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Chem_p021/chemistry/measuring-surface-tension-of-water-with-a-penny)
- Frigg, R. & Nguyen, J. (2020). *Modelling nature: an opinionated introduction to scientific representation*. Springer.
- Gamow, G. (1937). *Structure of atomic nuclei and nuclear transformations*. Clarendon Press.
- Giere, R. (1988). *Explaining science: a cognitive approach*. University of Chicago Press.
- Goodman, N. (1976). *Language of art*. Hackett.
- Hacyan, S. (2016). *Mecánica cuántica para principiantes*. Fondo de Cultura Económica.
- Heyde, K (1994). *The nuclear shell model*. Springer-Verlag.
- Kaal, J. E., Sorensen J. A., Otte, A. & Emming, J. G. (2021). *The nature of the atom: an introduction to the structured atom model*. Curtis Press.
- Knuuttila, T. (2011). Modelling and representing: an artefactual approach to model-based representation. *Studies in History and Philosophy of Science*, 42, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2011.05.001>
- Knuuttila, T. (2021). *Epistemic artifacts and the modal dimension of modelling*. *European Journal for Philosophy of Science*, 11, 65.
- Martin, B. & Shaw, G. (2019). *Nuclear and particle physics: an introduction* (3a ed.). John Wiley and Sons Ltd.
- McMullin, E. (1985). Galilean idealization. *Studies in History and Philosophy of Science*, 16, 247-273.
- Morrison, M. & Morgan, M. (1999). Introduction. En M. Morrison & M. Morgan (eds.), *Models as mediators: perspectives on natural and social science* (pp.

- 1-10). Cambridge University Press.
- Morrison, M. & Morgan, M. (1999). Models as mediating instrument. En M. Morrison & M. Morgan (eds.), *Models as mediators: perspectives on natural and social science* (pp. 10-38). Cambridge University Press.
- Morrison, M. (1999). Models as autonomous agents. En M. Morrison & M. Morgan (eds.), *Models as mediators: Perspectives on natural and social science* (pp. 38-65). Cambridge University Press.
- Morrison, M. (2015). *Reconstructing reality: models, mathematics and simulations*. Oxford University Press.
- Myers, W. D. & Swiatecki, W. J. (1966). Nuclear masses and deformations. *Nuclear Physics*, 81(1), 1-60. <https://doi.org/bp7z23>
- Oliveras, E. (2021). *La metáfora en el arte: fundamentos y manifestaciones en el siglo XXI*. Paidós.
- De la Peña, L. (2006). *Introducción a la mecánica cuántica*. Fondo de Cultura Económica.
- Portides, D. (2006). The evolutionary history of models as representational agents. En L. Magnani (ed.), *Model-based reasoning in science and engineering* (pp. 1-20). Rodopi.
- Portides, D. (2011). Seeking representations of phenomena: phenomenological models. *Studies in History and Philosophy of Science*, 42, 334-341. <https://doi.org/dvc39x>
- Potochnik, A. (2017). *Idealizations and the aim of science*. University of Chicago Press.
- Rife, P. (2006). *Lise Meitner and the dawn of the nuclear age*. Bitkhäuser.
- Rodionov, E. (1997). *The MIT bag model in nuclear and particle physics* [tesis de doctorado no publicada, Department of Physics and Mathematical Physics University of Adelaide].
- Rohlf, J. (1994). *Modern physics from a to Z*. John Wiley and Son, Inc.
- Ruyant, Q. (2022). *Idealizations and the no-miracle argument*. Universidad Complutense de Madrid.
- Suárez, M. (1999). The role of models in the application of scientific theories: epistemological implications. En M. Morrison & M. Morgan (eds.), *Models as mediators: perspectives on natural and social science* (pp. 168-196). Cambridge University Press.
- Strevens, M. (2007). *Depth: an account of scientific explanation*. Harvard University Press.
- Wimsatt, W. (2007). *Re-engineering philosophy for limited beings*. Harvard University Press.