



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

El valor epistémico de la contingencia en las explicaciones narrativas a través  
de los conceptos de proceso de crecimiento y árbol de posibilidades

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

PRESENTA:  
EDGAR ORLANDO RAMÍREZ CASTRO

Dr. Sergio F. Martínez Muñoz (director), IIF, UNAM.

Dra. Violeta B. Aréchiga Córdova, DH, UAM.

Dra. Vivette García Deister, FC, UNAM.

Dra. Natalia Carrillo Martínez de la Escalera, IIF, UNAM.

Dra. Ana Laura Fonseca Patrón, FCSH, UASLP.

Ciudad Universitaria, CD. MX. Noviembre de 2023

Esta tesis ha sido realizada gracias al apoyo de la beca nacional CONACYT y al proyecto PAPIIT IN400422: "Metáforas y narrativas en la estructuración social de la cognición: implicaciones para la filosofía de la ciencia y la epistemología".



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**PROPUESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Graduación con trabajo escrito)**

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción 1, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la Institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado El valor epistémico de la contingencia en las explicaciones narrativas a través de los conceptos de proceso de crecimiento y árbol de posibilidades que presenté para obtener el grado de es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi programa de posgrado, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de graduación.

**Atentamente**

Edgar Orlando Ramírez Castro  
409098222

## **Agradecimientos**

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Sergio Martínez por todos sus consejos que llevaron a buen puerto este proyecto, por su guía y apoyo constantes y por compartir su tiempo, su conocimiento y su entendimiento de la filosofía de la ciencia, sin ello no hubiera llegado a ser lo que soy.

Gracias a la Dra. Violeta Aréchiga y a la Dra. Vivette García por su acompañamiento desde los inicios de este proyecto, por sus valiosos comentarios que me ayudaron a reflexionar y, con ello, a mejorar sustancialmente este trabajo. A la Dra. Natalia Carrillo por su lectura detallada y por sus observaciones precisas que me hicieron no descuidar la parte matemática y física del proyecto. A la Dra. Ana Laura Fonseca por su tiempo y su lectura. A todas ellas gracias por contribuir a mejorar la calidad de esta tesis.

Agradezco a mi madre, a mi padre y a mi hermano por acompañarme en este camino, por lo que me han enseñado y ayudado a crecer. A mis amigos Jorge y Eduardo que estuvieron presentes en este proceso y por mostrarme que la vida también tiene otros caminos. A Citlali por su compañía, por su apoyo incondicional y por las pláticas que esclarecieron mis ideas.

# Índice

|  |     |
|--|-----|
| Introducción.....  | 3   |
| Capítulo 1. Explicación de la formación de cristales de nieve.....   | 15  |
| 1.1. Historia de un cristal de nieve .....   | 18  |
| 1.2. La construcción de la explicación.....  | 26  |
| Capítulo 2. El papel explicativo de las generalizaciones y la contingencia .....                                       | 33  |
| 2.1. La concepción tradicional de la explicación científica y el concepto de ley.....                                  | 34  |
| 2.2. Una crítica a la noción tradicional de ley .....  | 39  |
| 2.3. Leyes pragmáticas y una metodología integrativa .....   | 41  |
| 2.4. El papel de lo contingente en las explicaciones narrativas.....   | 50  |
| 2.5. Una relación entre las narrativas y los modelos teóricos en las explicaciones científicas .....                   | 56  |
| 2.6. La explicación de la estabilidad del Sistema Solar.....   | 61  |
| Capítulo 3. Dependencia de trayectoria y reproducción del fenómeno .....   | 68  |
| 3.1. Contingencia histórica .....  | 69  |
| 3.2. Dependencia de trayectoria.....   | 75  |
| 3.3. La dependencia de trayectoria del proceso de crecimiento de los cristales de nieve .....                          | 79  |
| 3.4. El papel de los modelos computacionales en la reproducción del fenómeno .....                                     | 83  |
| Capítulo 4. Árboles de posibilidades y explicaciones narrativas .....  | 99  |
| 4.1. El árbol de posibilidades como recurso epistémico .....   | 99  |
| 4.1.1. Intervención y dependencia de trayectoria en el árbol de posibilidades ....                                     | 103 |
| 4.1.2. La limitación explicativa de las teorías de sistemas termodinámicos fuera del equilibrio.....                   | 107 |
| 4.1.3. Hacia el concepto de árbol de posibilidades en el análisis de sistemas termodinámicos fuera del equilibrio..... | 113 |
| 4.2. Explicación y entendimiento narrativo .....   | 116 |
| 4.2.1. El árbol de posibilidades en la comprensión de fenómenos complejos reproducibles .....                          | 124 |
| Conclusiones .....   | 136 |
| Bibliografía .....   | 142 |

# Introducción

En la filosofía de la ciencia el tema de la explicación científica se ha abordado de distintas maneras, cada una con inquietudes y enfoques particulares, pero todas ellas relacionadas, de alguna forma u otra, con una cuestión central, a saber, qué es lo que provee de valor epistémico a la explicación científica.

Uno de los modelos explicativos más representativos que sentó un precedente y que influenció la manera de analizar filosóficamente a la explicación científica fue el modelo nomológico deductivo (ND), cuyo principal exponente fue Carl Hempel (1942; 1965; Hempel y Oppenheim, 1948). Con el modelo ND se establece que el valor epistémico de la explicación se encuentra en las *leyes*, entendidas como generalizaciones necesarias y universales. Según el modelo éstas proveen las *condiciones necesarias y suficientes* para que se dé la explicación, cualquier otro factor debería ser capturado por ellas, o bien, serviría sólo para enmarcar el suceso a explicar (explanandum). No obstante, el modelo ND fue criticado debido a que no es difícil identificar casos en los que es insuficiente apelar a leyes para explicarlos. Esto dio pie a desarrollar modelos alternativos de la explicación<sup>1</sup> en los que, a parte de las leyes, se requiere de otro tipo de factor<sup>2</sup> para explicar fenómenos importantes en las ciencias.

Una vertiente filosófica en la que se plantearon modelos alternativos de la explicación científica y que cobró relevancia desde finales del siglo XX hasta la actualidad es el llamado "nuevo mecanicismo". Éste reconsidera la importancia del mecanicismo en la filosofía de la ciencia y propone que en última instancia las

---

<sup>1</sup> Como los modelos de relevancia estadística (RE) y mecánico causal (MC) de Salmon (Salmon, 1971; 1984) o modelos más recientes como los del llamado "nuevo mecanicismo", e. g. (Glennan, 1996), (Machamer, Darden y Craver, 2000).

<sup>2</sup> Por ejemplo, en el modelo RE de Salmon dicho factor refiere a *propiedades estadísticamente relevantes* (Salmon, 1971).

explicaciones científicas epistémicamente relevantes son las que se apoyan en modelos mecanicistas de los fenómenos. Sin embargo, a pesar de las diferencias, este tipo de propuestas siguen una perspectiva, a la que me referiré de aquí en adelante como *la perspectiva nomotética de la explicación*, en la que se comparte el supuesto que la historicidad de los procesos no juega un papel epistémico en las explicaciones.

En contraste con la perspectiva nomotética de la explicación, hoy en día ha cobrado relevancia otro tipo de análisis en el que el valor epistémico no se centra en elucidar condiciones o factores necesarios y suficientes (e. g. leyes o mecanismos), sino en el papel epistémico que juega la historicidad de los procesos, un papel reconocido por patrones narrativos de la explicación. En esta tesis sigo este tipo de análisis y defiendo la idea que muchas de las explicaciones científicas contemporáneas son explicaciones narrativas, por lo que éstas deben verse como un patrón explicativo epistémicamente relevante.

De manera general, la función de las narrativas es la de ordenar e integrar una serie de factores contingentes (eventos, conceptos, generalizaciones, materiales, etc.) que conduzcan a la ocurrencia del fenómeno en cuestión. En contraste con los modelos explicativos que siguen la línea argumentativa del modelo ND (modelos a los que me referiré como patrones nomotéticos de la explicación, o bien, explicaciones nomotéticas), la relevancia epistémica de las explicaciones narrativas no se asocia sólo a un tipo de factor generalizador (a leyes, o bien, a un conjunto de condiciones necesarias y suficientes) sino a la manera en cómo se integran una serie de factores contingentes. Con ello, una explicación narrativa no excluye el uso de leyes porque, como veremos en la tesis, éstas pueden incorporarse en la narrativa para darle fuerza. Sin embargo, el concepto de ley debe ser interpretado de una

manera más flexible<sup>3</sup> para ser integradas por las narrativas de tal modo que concilien con la historicidad del fenómeno en cuestión.

Las explicaciones narrativas se han abordado de distintas maneras en la filosofía de la ciencia dependiendo del enfoque de análisis y del tipo de objeto de estudio que se busca explicar. Por mencionar algunas de ellas, en la paleoantropología las narrativas pueden concebirse como un recurso que da coherencia a una situación con huecos evidenciales y que al mismo tiempo redirige la investigación para llenarlos con nueva evidencia (Currie y Sterelny, 2017); en la economía pueden funcionar como un enlace interpretativo entre una teoría formal (teoría de juegos) y un contexto económico específico (Grüne-Yanoff y Lehtinen, 2012); en la investigación basada en casos de las ciencias sociales las narrativas explican en términos de un ordenamiento de distintos tipos de elementos con el cual se crea una imagen sintética en la que se interrelacionan todas las piezas de la investigación (Morgan, 2017); en la biología evolutiva se las ha considerado como una estructura que conecta temporal y causalmente una serie de eventos contingentes que llevan al acaecimiento de un hecho evolutivo (Richards, 1992).

No obstante, aunque haya distintas concepciones de explicación narrativa algo que las caracteriza es que, de algún modo u otro, se reconoce el papel epistémico de la *contingencia*. De manera general el término de contingencia se refiere a algo que pueda suceder o no<sup>4</sup>, a la incertidumbre o posibilidad de la ocurrencia de un evento, a la dependencia entre eventos o del cumplimiento de una condición o, incluso, a la dependencia del azar<sup>5</sup>. Estas variadas acepciones no dejan

---

<sup>3</sup> Como veremos en la sección 2.3, el concepto de ley no necesariamente se contrapone al de contingencia, noción característica de las narrativas, porque es posible concebir a las leyes como generalizaciones contingentes epistémicamente relevantes.

<sup>4</sup> Definición obtenida de María Moliner. (2008). *Diccionario de uso del español* (edición electrónica versión 3.0).

<sup>5</sup> Collins English Dictionary. (s. f.). Contingency. En *collinsdictionary.com dictionary*. Recuperado el 3 de mayo de 2023, de <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/contingency>.

en claro en qué sentido la contingencia pudiera jugar un papel epistémico, pero si vamos más allá de una definición general, es decir, si se caracteriza dentro de un contexto el concepto de contingencia puede adquirir ciertos matices que ayudan a esclarecer la cuestión.

Uno de los contextos en los que se ha caracterizado con mayor detalle es en torno a los análisis de explicaciones implementadas en las ciencias naturales históricas, paradigmáticamente en la biología evolutiva. En dichos análisis la contingencia se ha entendido generalmente en términos de una noción de *contingencia histórica* caracterizada por la dependencia causal y la impredecibilidad de eventos particulares (Beatty, 2006), dos aspectos que, como veremos en el tercer capítulo, sientan un precedente para esclarecer el sentido en que la contingencia juega un papel epistémico en las explicaciones narrativas abordadas en el presente escrito.

Un detalle respecto a la noción de contingencia histórica es que comúnmente se ha asociado a la explicación de *fenómenos históricos únicos*, es decir, fenómenos que sólo ocurren una sola vez por lo que se requiere dar cuenta de su origen y desarrollo, como el caso de la extinción de los dinosaurios, la evolución de una especie particular o el origen de la vida. Los fenómenos históricos únicos han problematizado la manera tradicional (perspectiva nomotética) de analizar la explicación, puesto que la contingencia de su origen y desarrollo no puede ser capturado por leyes o condiciones necesarias y suficientes. Esta es la razón principal por la que se ha abogado por la importancia de las narrativas, pues con ellas se reconoce el valor epistémico de factores contingentes involucrados en el origen y desarrollo (*proceso histórico*) que llevan al acaecimiento del fenómeno histórico.

Otro tipo de fenómeno de suma importancia en la ciencia en el que la contingencia no puede capturarse por medio de leyes, y que considero un

precedente para la explicación del tipo de fenómenos que abordo en la tesis, es el de la estabilidad de sistemas dinámicos complejos, particularmente el del Sistema Solar. El estudio de la estabilidad de sistemas dinámicos ha sido un tema de interés desde los inicios de la mecánica clásica. Esta disciplina ha permitido explicar de manera satisfactoria y precisa muchos de los movimientos de los cuerpos celestes, pero no ha sido capaz de explicar la estabilidad del Sistema Solar<sup>6</sup>. Aunado a ello, siguiendo los métodos de la mecánica clásica tampoco se puede explicar por qué un sistema dinámico permanecería estable siendo que cualquier cuerpo en movimiento presenta fricción y disipa energía, por lo que no hay ninguna ley, en el contexto de la mecánica clásica, que nos diga que en determinado tiempo el sistema no colapsaría. Estas cuestiones llevaron a plantear explicaciones, como la del mismo Newton o las de filósofos como Whewell (1874), en las que, aparte de las leyes, se requería apelar también a una fuerza o causa no mecánica (teológica) para explicar la estabilidad del Sistema Solar.

Durante más de tres siglos no se vislumbró una explicación que no tuviera que apelar a una causa teológica para dar cuenta de la estabilidad del Sistema Solar. No fue sino hasta el desarrollo de modelos computacionales con los que se construyó una explicación plausible del fenómeno. Gracias a ellos se simularon *escenarios posibles de desarrollo* del Sistema Solar, la mayoría de ellos convergiendo hacia la estabilidad del sistema. Como lo hace ver (Martínez, 2009), los escenarios posibles simulados no pueden ser cualesquiera sino aquellos contruidos a partir de ciertas normas aceptadas por una comunidad científica. En este sentido, para Martínez la explicación de la estabilidad del Sistema Solar no tiene que ver tanto con

---

<sup>6</sup> El ideal explicativo de la mecánica clásica es explicar a los sistemas físicos de manera determinista, pues se busca postular sistemas de ecuaciones asociadas a leyes de movimiento que tengan soluciones únicas. En este sentido, a lo más se han logrado estudiar y explicar por medio de métodos analíticos sistemas dinámicos de dos cuerpos. Incluso, sistemas de más de dos cuerpos, pero haciendo una idealización en la que se desprecia alguna o varias de las masas de los cuerpos, tratándolo, así, como un sistema simple de dos cuerpos.

la explicitación de leyes sino con la construcción de escenarios posibles de desarrollo, facilitada por una serie de normas modeladas computacionalmente, que convergen hacia la estabilidad del Sistema Solar.

La estabilidad es un aspecto contingente de suma importancia que debe explicarse para tener una mayor comprensión del comportamiento y desarrollo de diversos sistemas complejos (físicos, químicos, biológicos, etc.), es decir, de sistemas que muestran una riqueza y variedad en sus formas y comportamientos<sup>7</sup>. El planteamiento de Martínez apunta a que su explicación se logra al dar cuenta de la historicidad del proceso de desarrollo del sistema, por lo que factores contingentes deben ser reconocidos como factores epistémicamente relevantes.

Considerando lo anterior, la tesis central del escrito consiste en proponer una manera de elucidar el valor epistémico de factores contingentes en torno a explicaciones en las que se reproduce el crecimiento de sistemas dinámicos complejos por medio de simulaciones computacionales. Dicha manera se relaciona con el hecho de dar cuenta de cómo ciertos sistemas dinámicos complejos se estabilizan y cómo esa estabilización requiere ser capturada por una narrativa.

Para responder estas cuestiones y, con ello, para esclarecer la propuesta de tesis, analizo una serie de casos, principalmente el de la formación de los cristales de nieve, con los que muestro que su *proceso de crecimiento* debe entenderse como un *proceso histórico dependiente de trayectoria* en el que factores generales (leyes, modelos, teorías) y factores particulares (eventos, materiales, contextos) no se relacionan de manera excluyente o jerárquica, sino de una manera en la que se

---

<sup>7</sup> No hay una definición general o consensuada de sistema o fenómeno complejo, cada disciplina la define de acuerdo con sus enfoques y objetivos. Para sistemas dinámicos físicos puede considerarse un sistema complejo como aquel conformado por más de dos cuerpos que presenta un comportamiento caótico. Sin embargo, en el contexto del presente escrito considero pertinente la noción de complejidad a la que refieren Green et al. (2020): "complejidad significa la riqueza y variedad de formas y comportamientos que generalmente se ve en grandes sistemas" (p. 4).

retroalimentan. Muestro que el carácter dependiente de trayectoria del proceso de crecimiento se debe a que es configurado por la coordinación entre procesos estables e inestables que constriñen y a la vez posibilitan la novedad de su crecimiento. Finalmente, argumento que el valor epistémico de dichos procesos debe analizarse en términos de un conjunto de trayectorias posibles de crecimiento al que llamo *árbol de posibilidades*.

El concepto de árbol de posibilidades es central en la propuesta ya que por medio de éste se ve reflejado el papel epistémico de los factores contingentes que constituyen el proceso de crecimiento dependiente de trayectoria. Asimismo, muestro que el árbol de posibilidades apunta a un entendimiento narrativo, el cual se logra por la localización de una trayectoria de crecimiento actual (que de hecho ocurrió) en su árbol de posibilidades. Este argumento me ayuda a reforzar la idea de que el patrón explicativo en cuestión se trata de un patrón narrativo de la explicación en el que herramientas tecnológicas como los modelos computacionales juegan un papel crucial para dar cuenta de los procesos contingentes que entran en juego en la configuración del árbol de posibilidades.

### **Estructura de tesis**

El planteamiento y desarrollo de la propuesta de tesis se trabaja a lo largo de cuatro capítulos. En el primero analizo la explicación de la formación de los cristales de nieve (Libbrecht, 2006, 2022) para dilucidar cómo se construye y qué factores juegan un papel epistémico. Este análisis me permite considerar a dicha explicación como un estudio de caso con el que problematizo la idea de que deben identificarse condiciones necesarias y suficientes (e. g. leyes) y con el que dejo ver la importancia de reconocer la historicidad de su proceso de crecimiento para dar cuenta del fenómeno. Esto, al mostrar que factores particulares como el contexto, el arreglo

experimental (materiales) y los eventos aleatorios que ocurren durante su proceso de crecimiento también son decisivos para explicar las morfologías de los cristales de nieve.

El análisis de la explicación de la formación de los cristales de nieve me lleva a plantear una línea de discusión en la que sugiero que es necesario considerar a los factores generales (leyes, modelos, teorías) y a los factores particulares (eventos, contexto, materiales) como igualmente importantes para dar cuenta del proceso de crecimiento del fenómeno. A partir de esta sugerencia formulo tres cuestiones clave: ¿qué papel epistémico juegan los dos tipos de factores que intervienen en la explicación de la formación de los cristales de nieve, cómo se relacionan para dar cuenta del fenómeno y cuál es el patrón explicativo en cuestión? Éstas guían la discusión de los siguientes capítulos y sus respuestas llevan al planteamiento de la propuesta central de la tesis.

En el segundo capítulo expongo cómo se ha abordado en la filosofía de la ciencia el papel epistémico de las leyes y el de la contingencia con el objetivo de esclarecer las dos maneras de analizar el valor epistémico de las explicaciones científicas que mencioné anteriormente (por medio de modelos nomotéticos y por medio de narrativas). Para ello, en la sección 2.1, expongo el modelo ND para ejemplificar cómo se ha abordado la cuestión del valor epistémico desde una perspectiva nomotética. Posteriormente, considerando a las leyes como los elementos centrales de dicha perspectiva, presento dos conceptualizaciones de ley. La primera caracterizada por la necesidad y universalidad que lleva a un concepto de ley muy restrictivo (Hempel, 1965) y la segunda definida por condiciones de aplicabilidad que lleva a un concepto de ley más flexible (Mitchell, 2003). A esta segunda la considero como una caracterización que se adecúa mejor al tipo de fenómenos que abordo en la tesis puesto que, al reconocer la relevancia del contexto

para definir el concepto de ley, permite ser relacionada con procesos históricos como el proceso de crecimiento de los cristales de nieve.

Posteriormente, en la sección 2.4 presento un panorama general sobre la función y las características compartidas entre varias propuestas sobre explicaciones narrativas exploradas en la filosofía de la ciencia para mostrar cómo se ha abordado el papel epistémico de la contingencia en explicaciones de ciencias naturales históricas y en qué sentido se ha asociado a fenómenos históricos únicos.

Una vez exploradas estas dos perspectivas de la explicación que han sido discutidas en la filosofía de la ciencia, en la sección 2.5 discuto la propuesta de Currie y Sterelny (2017) en la que se relacionan aspectos de ambas perspectivas para dar cuenta del valor epistémico de ciertas explicaciones científicas. Esto, al considerar que las narrativas y los modelos teóricos tienen funciones diferenciadas pero complementarias para dar cuenta del fenómeno en cuestión. Finalmente, en la sección 2.6 abordo la problemática que ha generado la explicación de la estabilidad del Sistema Solar en torno a la perspectiva nomotética de la explicación y muestro cómo la propuesta de Currie y Sterelny es insatisfactoria para abordar explicaciones como las de este caso. Esta discusión me lleva a plantear que el tipo de fenómenos como la formación de los cristales de nieve se comprende al dar cuenta de cómo el sistema se estabiliza. Tal cuestión se aborda en el capítulo tres y se asocia a la idea de concebir a los procesos de crecimiento como procesos dependientes de trayectoria en los que factores generales y particulares se retroalimentan.

En el tercer capítulo abordo la noción de contingencia histórica (Beatty, 2006) con el fin de dilucidar dos características relevantes (dependencia causal e impredecibilidad) que sientan el precedente para comprender el papel de la historicidad en el proceso de crecimiento de los cristales de nieve. Posteriormente, considero a la noción de dependencia de trayectoria de Desjardins (2011) como una

forma de contingencia histórica en la que se analiza a la dependencia causal y a la impredecibilidad en términos probabilísticos y en donde el valor epistémico de lo contingente se ve reflejado en la elucidación de trayectorias probables de eventos particulares. Me ayudo de esta noción de dependencia de trayectoria para esclarecer y asociar tales características al proceso de crecimiento de los cristales de nieve. Particularmente, muestro que el proceso que guía el crecimiento de los cristales de nieve debe concebirse como un proceso dependiente de trayectoria en el que mecanismos estables e inestables se coordinan para estabilizar el crecimiento en diversidad de morfologías de cristales de nieve. Esto me lleva a caracterizar una noción de dependencia de trayectoria que, a diferencia de la de Desjardins, refleja el valor epistémico de lo contingente en la explicación en términos de procesos que incorporan factores generales y particulares.

Para elucidar la caracterización de dependencia de trayectoria que propongo, analizo la manera en la que se utilizan modelos computacionales con los que se simula el proceso de crecimiento de las plantas (Green et al., 2020). Con este caso muestro cómo el procedimiento computacional hace interactuar reglas, que identifico como leyes, con eventos aleatorios que se producen en cada etapa de crecimiento de cierto tipo de planta. Muestro que este procedimiento promueve una explicación en la que se propicia la exploración de un conjunto de posibles trayectorias en las que puede crecer el fenómeno, idea que lleva al concepto de árbol de posibilidades abordado en el cuarto capítulo. Este análisis me ayuda a ejemplificar la caracterización de dependencia de trayectoria propuesta, pero también me permite mostrar que la tesis que propongo puede generalizarse a otros casos estudiados en la ciencia.

En el cuarto y último capítulo defino el concepto de árbol de posibilidades y muestro por qué refiere a un recurso con el que se puede analizar el valor epistémico de la explicación, considerando que los factores explicativos son tanto factores

generales (especialmente leyes) como particulares (especialmente eventos aleatorios). En concreto, argumento que el árbol de posibilidades de los cristales de nieve (representado en tipos de clasificaciones morfológicas) tiene valor epistémico en la medida que *ejemplifica*<sup>8</sup> los distintos tipos de procesos (estables e inestables) que se coordinan durante el proceso de crecimiento del fenómeno. Muestro que estas ejemplificaciones permiten distinguir tanto las constricciones y tendencias como la novedad o emergencia que pueden presentarse en el crecimiento de los cristales de nieve, lo que muestra cómo se estabiliza el crecimiento en distintas morfologías.

En la sección 4.1.1 hago ver las diferencias entre el concepto de *árbol de posibilidades* y el de *espacio de posibilidades* en el sentido que Williamson (2018) le da (es decir, como un concepto asociado a un *espacio fase* físico). En la sección 4.1.2 muestro que este concepto de espacio de posibilidades es asumido en teorías de sistemas termodinámicos fuera de equilibrio, como la teoría del caos. En relación con ello, muestro las limitaciones de la teoría del caos y de procesos estocásticos para explicar sistemas complejos y argumento, con base en el análisis del caso de la evolución de un sistema urbanizado, que su explicación requiere de la implementación de simulaciones computacionales y no sólo la referencia a estas teorías. Posteriormente, relaciono este caso con la propuesta de Wise (2011, 2017) sobre las explicaciones narrativas asociadas al estudio de sistemas complejos por medio de simulaciones, presentada en la sección 4.2.1, para plantear que el estudio de sistemas complejos debe recurrir a un patrón explicativo como el propuesto en la tesis. Es decir, a un patrón explicativo que requiere de la construcción de un árbol de posibilidades posibilitada por sistemas experimentales, particularmente por modelos computacionales.

---

<sup>8</sup> Utilizo este término en el sentido que Elgin (2009) le da.

Finalmente, basándome en las propuestas de Hawthorn (1991), Beatty (2017) y Wise (2017), en la sección 4.2 relaciono el concepto de árbol de posibilidades con un tipo de entendimiento narrativo para mostrar que el patrón explicativo propuesto en la tesis (principalmente el referente a la explicación de la formación de los cristales de nieve, pero también a la de casos como el de la estabilidad del Sistema Solar, la formación de plantas, la evolución de un sistema urbanizado y la reacción química de Diels-Alder) se trata de un patrón narrativo de la explicación. Muestro que el tipo de entendimiento asociado a la explicación de los casos estudiados en la presente tesis se basa en la relación dialéctica entre el seguimiento de una trayectoria de crecimiento y el reconocimiento de posibilidades alternativas o, en otras palabras, en la localización de una trayectoria de crecimiento que de hecho ocurrió (lo actual) en su árbol de posibilidades (lo potencial).

# Capítulo 1. Explicación de la formación de cristales de nieve

Los cristales de nieve han sido entidades naturales estudiadas por diversos científicos a lo largo de la historia por lo llamativo de las formas complejas y simétricas que adoptan. Desde personajes como Johannes Kepler, quien fue uno de los primeros en reconocer y describir morfologías hexagonales de los cristales de nieve en su breve tratado *The Six Cornered Snowflake* (Kepler, 1611), hasta científicos contemporáneos como el físico Ukichiro Nakaya, quien ideó diagramas cuantitativos con los cuales relacionó factores físicos y un conjunto de morfologías posibles de los cristales de nieve (Nakaya, 1954). En este siglo quien ha dedicado gran parte de su investigación científica al estudio de la formación de los cristales de nieve y ha dado una explicación plausible que ayuda a la comprensión de su formación ha sido el físico Kenneth Libbrecht<sup>9</sup>.

Libbrecht (2006, 2022) desarrolla estrategias para explorar, estudiar y explicar el proceso formativo y la diversidad morfológica de los cristales de nieve. En estos textos Libbrecht busca responder preguntas como: ¿Qué es y cómo se forma un cristal de nieve? ¿Por qué muchas veces adquieren una simetría hexagonal? ¿Cuál es el origen de esta simetría? ¿Cómo y por qué se genera una diversidad de formas a partir de esta forma básica? ¿Por qué, aunque cada cristal de nieve es distinto de otro, se pueden identificar ciertos patrones de crecimiento? Cuestiones que considero pueden sintetizarse en la siguiente: ¿Por qué el proceso de crecimiento de los cristales de nieve lleva a una diversidad morfológica que puede ser clasificable?

---

<sup>9</sup> Su trayectoria de investigación en torno a los cristales de nieve ha sido muy amplia y actual. Por mencionar algunos de sus trabajos encontramos (Libbrecht, 2005, 2017, 2019, 2020).

Responderla es lo que lo lleva a explicar y comprender la complejidad de la diversidad morfológica de los cristales de nieve y su proceso de crecimiento.

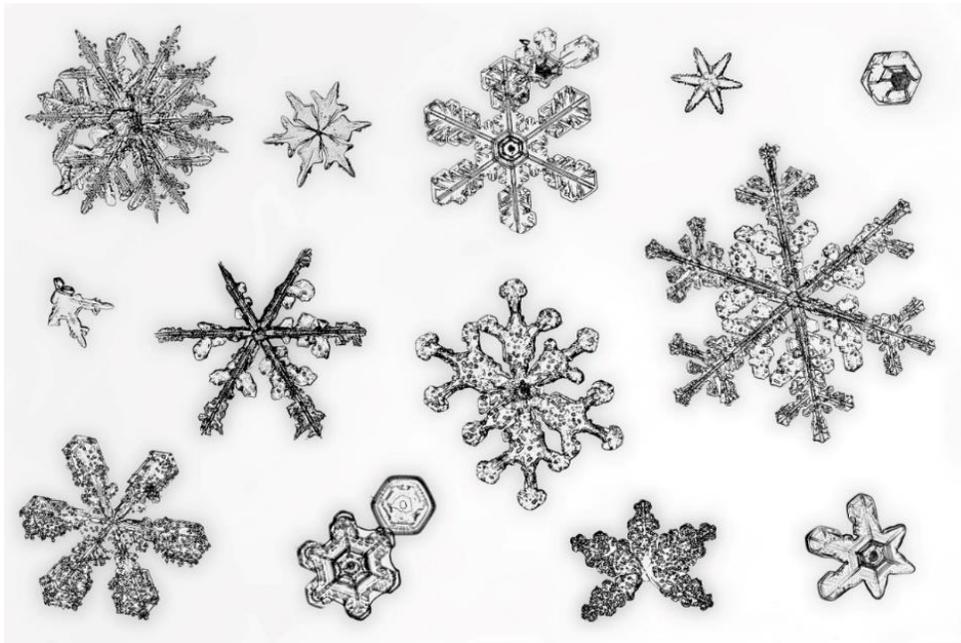


Figura 1. Diversidad morfológica de cristales de nieve.<sup>10</sup>

Para explicar la formación de los cristales de nieve los científicos se han enfocado principalmente en modelar aspectos específicos que relacionan factores ambientales como la temperatura y la sobresaturación (humedad) con las formas estructurales y las tasas de crecimiento del cristal de nieve. Los modelos desarrollados buscan dar cuenta de la dinámica del crecimiento de los cristales de nieve:

[la dinámica está] dominada por la *cinética de acoplamiento* en combinación con dos efectos de transporte: *difusión de partículas*, el cual lleva las moléculas de agua al cristal en crecimiento, y *difusión de calor*, el cual remueve el calor latente generado por solidificación. La *interacción* de estos tres procesos básicamente es la responsable de la vasta diversidad de las morfologías de los cristales de nieve, entonces la tarea en cuestión es entender cómo cada una

---

<sup>10</sup> Imagen de Janne Tuominen obtenida de <https://www.shutterstock.com> (ID: 314891768).

afecta el crecimiento del cristal (Libbrecht, 2005, p. 864 traducción<sup>11</sup> y cursivas mías).

Sin embargo, la mayoría de los estudios están enfocados en realizar análisis cuantitativos de cristales simples utilizando modelos teóricos (analíticos) donde “la sobresaturación es baja, el tamaño del cristal es pequeño y/o la presión del gas de fondo es baja” (Libbrecht, 2005, p. 882) y cuyas entidades resultantes estudiadas se tratan de cristales con superficies planas o facetas. Por ello, sólo algunos efectos físicos simples que intervienen en la formación de los cristales de nieve, como la difusión de calor, se han comprendido de manera precisa y completa, mientras que mecanismos más complejos, como el de la cinética de acoplamiento (*attachment kinetics*), se han comprendido sólo en circunstancias muy específicas como las antes mencionadas. En particular, este último mecanismo se ha estudiado utilizando modelos que exploran la dinámica molecular que ocurre en la superficie del cristal, la cual refiere a mecanismos que constriñen su crecimiento como el crecimiento de nucleación-limitado, el crecimiento mediado por dislocaciones y otras fuentes por etapas, o el derretimiento de superficies, por mencionar algunos.

En cambio, en la investigación del crecimiento de morfologías complejas (como las dendríticas), los modelos teóricos resultan ser muy limitados para dar cuenta de su proceso de crecimiento, por lo que el uso de modelos computacionales es necesario. Un tipo de modelo computacional que se ha implementado es el *modelo del autómata celular* (AC). Con él se han logrado simular estructuras realistas de cristales de nieve, tanto de formas planas (facetadas) como dendríticas (ramificadas), exhibiendo muchas de las características morfológicas observadas (Libbrecht, 2013). Estos modelos permiten dar cuenta de procesos complejos no

---

<sup>11</sup> La traducción de todas las citas provenientes de textos en inglés en el presente escrito es de mi autoría.

lineales, como el proceso de ramificación que abordaré más adelante, que no es posible estudiar sólo por medio de modelos teóricos.

El uso de los modelos teóricos con los que se estudia el crecimiento de cristales de nieve simples o etapas específicas del crecimiento y el uso de los modelos computacionales con los que se estudia morfologías más complejas es considerado por Libbrecht (2006, 2017, 2022) para esgrimir una explicación plausible del proceso de crecimiento de los cristales de nieve y el origen de su diversidad morfológica. A continuación, esbozo dicha explicación e identifico las cuestiones relevantes que son consideradas para guiar la discusión del escrito.

### *1.1. Historia de un cristal de nieve*

La formación de un cristal de nieve comienza con el proceso físico de la condensación directa del vapor de agua en el aire a una unidad de hielo. En este proceso físico las condiciones ambientales de temperatura y humedad (analizada en términos de sobresaturación) son las variables básicas que determinan el proceso. Es decir, basta con considerar estas condiciones ambientales para iniciar la indagación del proceso de crecimiento desde el surgimiento de una unidad de hielo hasta la estructura final de un cristal de nieve. Así, dada cierta temperatura del ambiente y cierta sobresaturación de las moléculas de agua, que se encuentren en un rango aproximado entre los 0°C a los -35°C de temperatura y entre los 0 g/cm<sup>3</sup> a los 0.3 g/cm<sup>3</sup> de sobresaturación, ocurrirá el proceso de condensación que llevará a que moléculas de vapor de agua (H<sub>2</sub>O) dispersas en el ambiente comiencen a enlazarse hasta formar una estructura hexagonal. Tal estructura es lo que se considera una unidad de hielo. La primera que permite la adhesión de otras unidades de hielo alrededor de ella puede considerarse como una *semilla de nieve*.

Una vez originada una semilla de nieve su crecimiento comienza cuando emprende su viaje desde el cúmulo de vapor de agua en el cual fue generado hasta su aterrizaje en alguna superficie. En las condiciones antes dichas la semilla crecerá debido a la adhesión de moléculas de vapor de agua congelada que se vaya encontrando a lo largo de su trayectoria. La adhesión de estas moléculas es posible gracias a que quedan abiertos puentes de hidrógeno que propiciarán la conexión con el oxígeno de las moléculas de agua ambientales. Tal adhesión seguirá mecanismos de crecimiento de difusión-limitada y de cinética de acoplamiento, como el crecimiento de nucleación-limitada, que harán que se vayan acomodando las moléculas de agua del ambiente de manera ordenada en unidades hexagonales (Libbrecht, 2006). Dicho ordenamiento es lo que los hace entidades cristalinas.

A los tipos de mecanismos que permiten y constriñen el surgimiento de la forma cristalina de nieve Libbrecht los concibe como *mecanismos estabilizadores* que, de manera más general y cualitativa, conducen a un proceso que llama *proceso de faceteo*. Por medio del faceteo, siendo la cinética de acoplamiento uno de los mecanismos principales que componen este proceso y la formación del cristal de nieve en general, las moléculas de vapor de agua del ambiente que se condensan son atraídas con mayor facilidad a los huecos que van quedando debido a que se establecen más puentes de hidrógeno. En las superficies planas ocurrirá lo contrario ya que hay menor número de posibilidades de enlace. Las moléculas entonces irán llenando esos huecos que van quedando hasta formar las facetas en una simetría hexagonal (Figura 2).

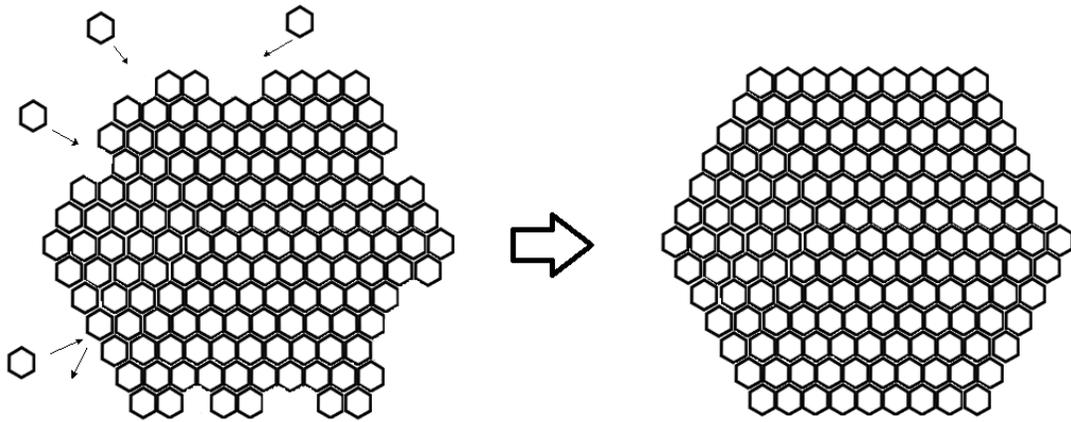


Figura 2. Proceso de faceteo. Cada uno de los hexágonos representa una unidad de hielo.

La simetría hexagonal se debe a que los mecanismos que componen el proceso de faceteo permiten que “la geometría de la molécula del agua sea transferida a la geometría de un cristal de nieve grande” (Libbrecht, 2006, p. 16). Por este motivo, las moléculas de vapor de agua que se van adhiriendo a la semilla de hielo tienden a ordenarse en una estructura hexagonal, similar a la estructura molecular de una unidad de hielo.

Sin embargo, en muy pocas ocasiones la historia de un cristal de nieve termina con una forma hexagonal, ésta sólo se mantiene en cristales con tamaños de aproximadamente medio milímetro y con cierta humedad. Generalmente la historia continúa con giros inesperados haciendo que prácticamente cada cristal de nieve sea único. Estos “giros inesperados” pueden explicarse a partir de lo que Libbrecht denomina el *proceso de ramificación*. Contrario al faceteo, el proceso de ramificación hace que el crecimiento del cristal sea *inestable* en tanto que eventos minúsculos (adhesión de una molécula en una región específica) llevan a resultados morfológicos totalmente distintos, por lo que en vez de constreñir el resultado a una forma general *posibilitan* la novedad o la emergencia de nuevas morfologías.

La inestabilidad del proceso de ramificación, propiciada principalmente por mecanismos de difusión-limitada como la llamada *inestabilidad de Mullins-Sekerka*, tiene que ver con la manera aleatoria en la que las moléculas de vapor de agua congelada se adhieren a cada una de las facetas del cristal. Para ilustrar este proceso consideremos sólo una de las facetas. En una primera etapa, una molécula de vapor de agua que se encuentre en el ambiente tendrá la misma probabilidad de adherirse a cualquier punto de su superficie debido a que la fuerza de enlace que se puede establecer de los puentes de hidrógeno es la misma en cualquier punto de la superficie. Posteriormente, una vez que la primera molécula se adhiere a algún punto aleatorio de la superficie la probabilidad de que la siguiente molécula del ambiente se adhiera alrededor de la primera es mayor que la probabilidad de que se adhiera a cualquier otro punto de la superficie. Por un lado, porque se establecen más puentes de hidrógeno en esa región y, por otro lado, porque esa región está más expuesta a las demás moléculas del ambiente. Esto hará que el crecimiento en esa región sea más rápido que en cualquier otra región de la superficie, lo que propiciará la emergencia de una "rama".

Es interesante notar que el crecimiento del cristal de nieve no es dirigido por el proceso de ramificación hacia un patrón regular (e. g. una morfología con simetría hexagonal), sino a un crecimiento particular y único. Esto debido a que la formación de ramas depende del *orden contingente* en el que se adhieren las moléculas de vapor de agua congelada que se va encontrando en su camino. Este orden es producto de la inestabilidad del proceso y debe ser considerado para comprender muchas de las morfologías que pueden adoptar los cristales de nieve.

Volviendo a la historia de nuestro cristal de nieve, una vez que el cristal presenta una forma hexagonal, no tenemos simplemente una superficie plana sino seis facetas de prisma con seis picos. Los picos, al estar más expuestos, propiciarán que las moléculas de vapor en el ambiente se adhieran con mayor probabilidad a

esas regiones que a las superficies planas. Esto hará que haya una tendencia a generar ramas en cada punta y concavidades entre cada una (figura 3).

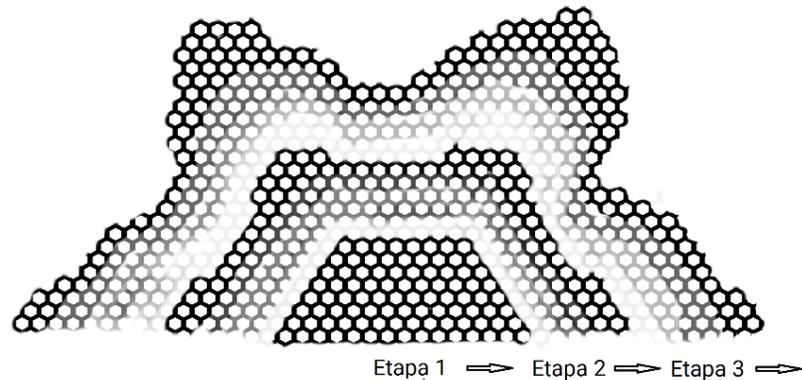


Figura 3. Proceso de ramificación en un cristal de nieve.

Una vez que se genera una rama, el proceso de faceteo empieza a dominar de nuevo, lo que hará que la rama no siga creciendo de manera completamente indefinida, sino que tienda a tomar de nuevo una forma hexagonal (figura 4). Este hecho muestra que durante el crecimiento del cristal de nieve ambos tipos de procesos están jugando un papel de manera coordinada en todo momento, pero desplegándose o dominando más uno u otro dependiendo tanto de la forma que va adoptando el cristal como de la rapidez con la que el cristal o distintas secciones del cristal crece.

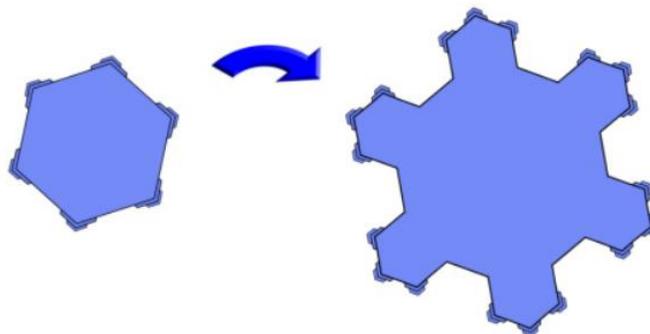


Figura 4. Coordinación entre el faceteo y la ramificación.<sup>12</sup>

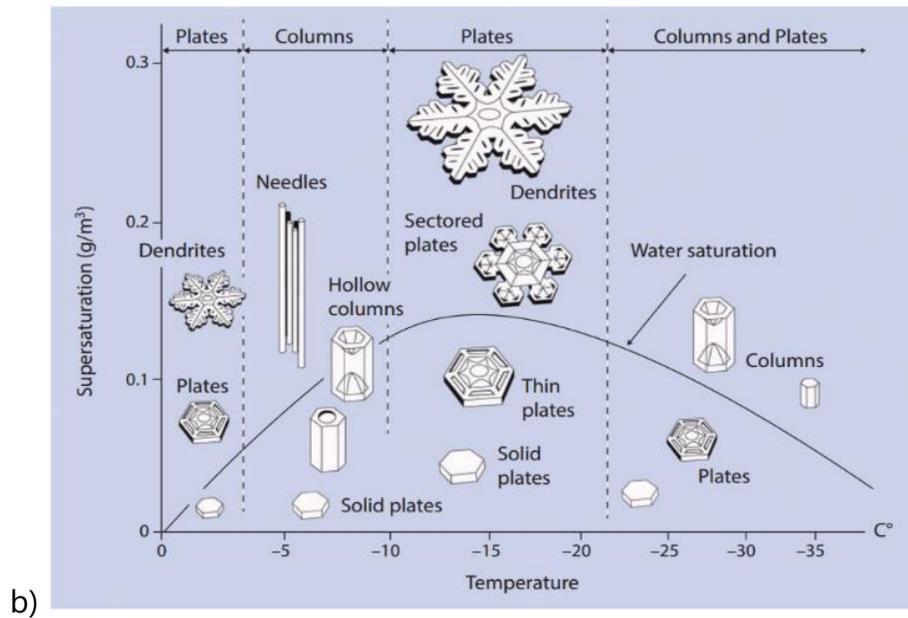
<sup>12</sup> Imagen obtenida de [www.snowcrystals.com](http://www.snowcrystals.com).

En esta coordinación la inestabilidad del proceso propicia el crecimiento de una miríada de morfologías, lo que implica que no es posible determinar de antemano la morfología resultante de un cristal de nieve. Pero la estabilidad del proceso hace que, aunque haya infinitas maneras de crecer, se puedan identificar patrones de crecimiento clasificables como los que se muestran en la tabla de clasificación de Libbrecht (figura 5a) y en el diagrama morfológico de Nakaya<sup>13</sup> (figura 5b).

|   |   |  |   |  |
|---|---|--|---|--|
| <br>Simple Prisms                | <br>Solid Columns      | <br>Sheaths                   | <br>Scrolls on Plates   | <br>Triangular Forms      |
| <br>Hexagonal Plates             | <br>Hollow Columns     | <br>Cups                      | <br>Columns on Plates   | <br>12-branched Stars     |
| <br>Stellar Plates               | <br>Bullet Rosettes    | <br>Capped Columns            | <br>Split Plates & Stars | <br>Radiating Plates      |
| <br>Sectored Plates            | <br>Isolated Bullets | <br>Multiply Capped Columns | <br>Skeletal Forms    | <br>Radiating Dendrites |
| <br>Simple Stars               | <br>Simple Needles   | <br>Capped Bullets          | <br>Twin Columns       | <br>Irregulars          |
| <br>Stellar Dendrites          | <br>Needle Clusters  | <br>Double Plates           | <br>Arrowhead Twins    | <br>Rimed               |
| <br>Fernlike Stellar Dendrites | <br>Crossed Needles  | <br>Hollow Plates           | <br>Crossed Plates     | <br>Graupel             |

a) Types of Snowflakes ... SnowCrystals.com

<sup>13</sup> La diversidad morfológica de los cristales de nieve fue inicialmente clasificada por Ukichiro Nakaya (1954) quien realizó una serie de mediciones con las cuales representó en diagramas la relación que hay entre distintos tipos de morfologías que adoptan los cristales de nieve y las condiciones ambientales, como la temperatura y la sobresaturación, en las que crecieron.



b) Figura 5. a) Tabla de tipos de cristales de nieve de Libbrecht<sup>14</sup>. b) Representación elaborada por Libbrecht del diagrama morfológico de Nakaya.<sup>15</sup>

Específicamente, en el diagrama de Nakaya la coordinación entre el faceteo y la ramificación se ve reflejado en la variedad de morfologías en las que se puede estabilizar el proceso de crecimiento dependiendo de las condiciones que se presenten. Esto es, se observa que el faceteo *domina* en el crecimiento de cristales de nieve en un rango amplio de temperaturas, pero a baja sobresaturación. En cambio, mientras mayor sea la sobresaturación, la ramificación empieza a dominar, por lo que formas más complejas como las dendritas emergerán.

La coordinación entre el faceteo y la ramificación conlleva a que para comprender el proceso de crecimiento de los cristales de nieve se requiere realizar dos cosas. Por un lado, dar cuenta de sus *trayectorias de crecimiento*, es decir, de la forma en la que va creciendo en el tiempo cada cristal de nieve (figura 6a). Por otro lado, clasificar un *conjunto de patrones de crecimiento* con los cuales pueda ser

<sup>14</sup> Imagen obtenida de <http://www.snowcrystals.com/guide/snowtypes4.jpg>

<sup>15</sup> Imagen obtenida de (Libbrecht, 2022).

contrastada la morfología particular del cristal de nieve en cuestión, por ejemplo, una morfología identificada como una dendrita estelar (figura 6b).

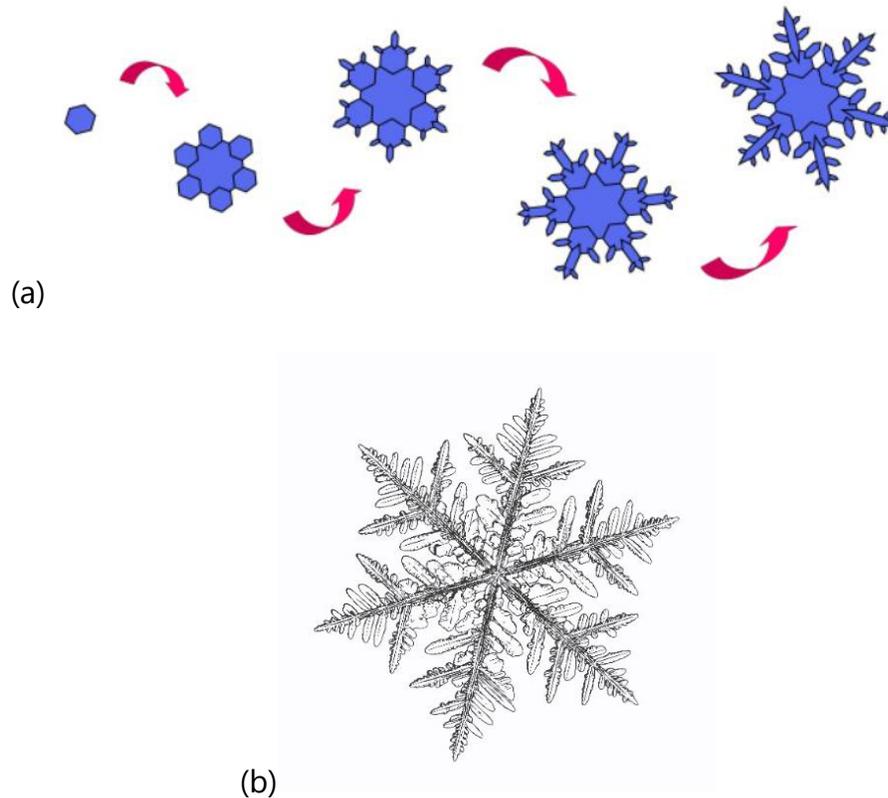


Figura 6. (a) Trayectoria del crecimiento de un cristal de nieve.<sup>16</sup> (b) Dendrita estelar.<sup>17</sup>

De este modo, las trayectorias de crecimiento particulares y el conjunto de patrones de crecimiento son dos elementos imprescindibles para explicar el proceso de crecimiento de los cristales de nieve y con ello responder a la pregunta: "¿Por qué el proceso de crecimiento de los cristales de nieve lleva a una diversidad morfológica que puede ser clasificable?".

---

<sup>16</sup> Imagen obtenida de [www.snowcrystals.com](http://www.snowcrystals.com)

<sup>17</sup> Imagen de la dendrita estelar de Alexey Kljatov fue obtenida de <https://www.shutterstock.com> (ID:1157102155)

La explicación de Libbrecht sugiere que una comprensión más robusta del crecimiento de los cristales de nieve no es posible si se excluye alguno de los dos tipos de procesos mencionados (faceteo y ramificación). El hecho de reconocer que hay una coordinación continua durante todo el crecimiento del cristal de nieve entre el faceteo y la ramificación, lleva a una manera de entender el proceso de crecimiento a partir de la cual es posible responder por qué es posible la estabilización del crecimiento de los cristales de nieve en diversidad de formas clasificables.

### *1.2. La construcción de la explicación*

Libbrecht construye la explicación de la formación de los cristales de nieve considerando varios recursos epistémicos y herramientas tecnológicas. Se ayuda de los modelos teóricos para estudiar aspectos específicos del proceso de crecimiento de los cristales de nieve o, incluso, para explicar la formación de cristales de nieve simples. Pero, esto no es suficiente porque para lograr una mayor comprensión del proceso de crecimiento en el que se coordinan el faceteo y la ramificación, utiliza modelos computacionales<sup>18</sup>. Gracias a ellos le es posible reproducir morfologías complejas similares a las que se han visto en la naturaleza. Sin embargo, Libbrecht no sólo ha recurrido a dichos recursos epistémicos y herramientas para construir la explicación, también se ha apoyado en el diseño y en la fotografía de una variedad de cristales de nieve por medio de un sistema experimental que le permite recrear las condiciones ambientales naturales en las que comúnmente los cristales de nieve crecen (Libbrecht, 2022).

---

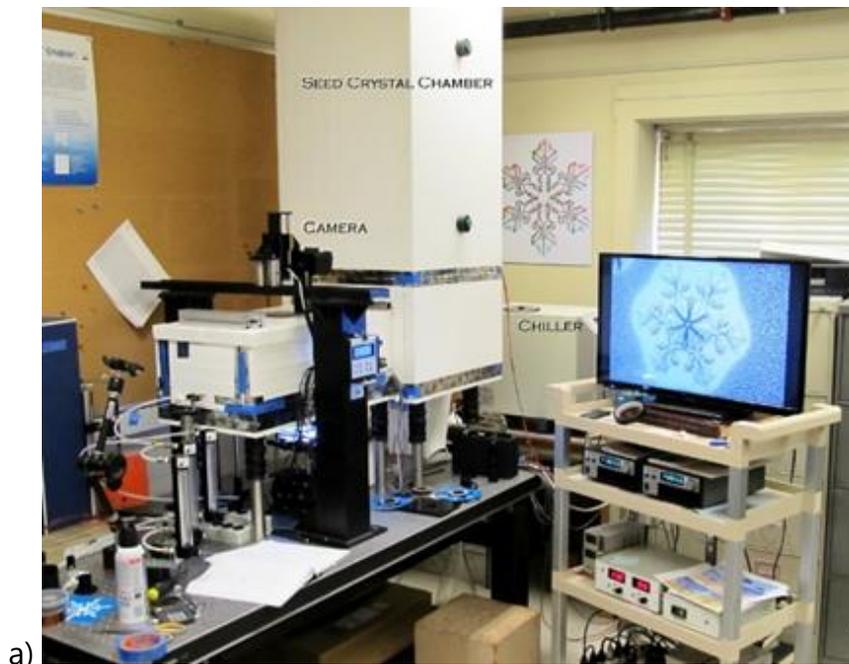
<sup>18</sup> Estos modelos recurren a métodos numéricos en donde intervienen variables aleatorias que juegan un papel crucial para obtener dichas formas (Gravner & Griffeath, 2009; Libbrecht, 2013). En la sección 3.4 se abordará a detalle su uso en el presente contexto.

El sistema experimental que utiliza consta principalmente de un tipo de cámara de convección<sup>19</sup> y otros elementos con los que se recrean y modifican condiciones ambientales de temperatura y sobresaturación para generar cristales de nieve, fotografiarlos y ver en tiempo-real su proceso de crecimiento (figura 7a). Este aparato le permite intervenir de manera constante en el proceso de crecimiento del cristal de nieve de la siguiente manera. Primero comienza generando un gran número de pequeños cristales de nieve hexagonales por medio de un nucleador<sup>20</sup> que se encuentra en una cámara de convección de caída-libre (figura 7b). Algunos de ellos pararán en un sustrato de zafiro o de vidrio. Ese sustrato permite que el cristal de nieve pueda seguir creciendo sin que la superficie del sustrato donde hace contacto afecte considerablemente su crecimiento posterior (ya que hace contacto sólo en la parte central del cristal) y también que pueda ser fotografiado a detalle utilizando un microscopio y una cámara. Así, una vez que el pequeño cristal de nieve hexagonal caiga en dicho sustrato el científico variará la temperatura y la sobresaturación del ambiente de la cámara simulando las condiciones reales en las que crece un cristal de nieve en la naturaleza.

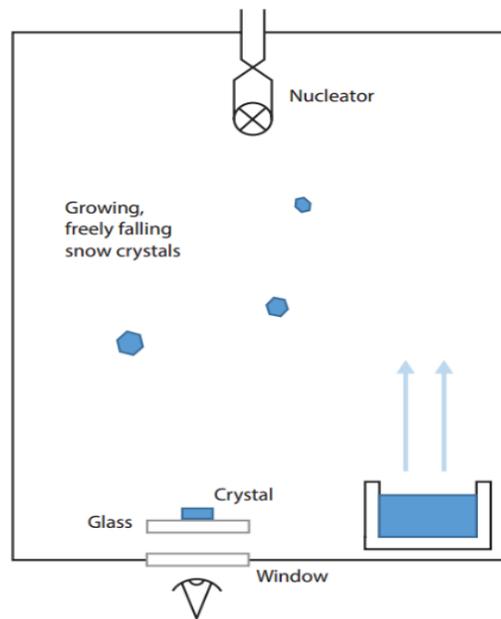
---

<sup>19</sup> Se han utilizado otros tipos de sistemas experimentales para generar cristales de nieve como congeladores caseros, nucleadores de expansión, cámaras de flujo laminar y cámaras de difusión continua (Libbrecht 2022).

<sup>20</sup> El nucleador de expansión es un dispositivo con el cual se producen partículas de nieve pequeñas tal como ocurre en una nube de invierno, sólo que mucho más rápido (Libbrecht, 2022, p. 187-188).



a)



b)

Figura 7. a) Sistema experimental utilizado por Libbrecht (cámara que produce cristales de nieve, cámara fotográfica, frigorífico, monitor para visualizar el crecimiento en tiempo-real)<sup>21</sup>; b) Diagrama de la cámara de convección<sup>22</sup>.

<sup>21</sup> Imagen obtenida de <http://www.snowcrystals.com/designer/designer.html>

<sup>22</sup> Imagen obtenida de (Libbrecht, 2022).

Con este sistema experimental Libbrecht interviene en la historia misma del cristal de nieve al modificar no sólo las condiciones iniciales, sino también las condiciones durante todo su proceso de crecimiento. Esto le permite explorar posibilidades materiales y contrastarlas con las posibilidades virtuales de las simulaciones computacionales para así construir la explicación de la formación de los cristales de nieve.

De este modo, la construcción de la explicación se da en un ir y venir entre los elementos presentes, tanto teóricos como materiales. Esto es, se va construyendo la explicación considerando el sistema experimental, su interacción constante con él, los modelos teóricos y los modelos computacionales que permiten reproducir virtualmente las trayectorias de crecimiento de los cristales de nieve. Es un ir y venir porque en la construcción de la explicación también se agregan o modifican modelos en función de lo que se hace crecer con el sistema experimental y de lo que se observa en la naturaleza. Por tanto, la explicación no se formula considerando sólo razonamientos teóricos sino también interactuando con el fenómeno, "haciéndolo crecer".

La manera de construir la explicación de la formación de los cristales de nieve nos lleva a reflexionar sobre qué se entiende por explicación científica, pues difiere, como veremos más adelante, en varios aspectos de maneras tradicionales de entender lo que es una explicación científica. Además, esta explicación nos permite entender un proceso muy específico (el del crecimiento de los cristales de nieve), pero de alguna manera su análisis dilucida aspectos importantes que también se presentan en explicaciones de otros procesos de crecimiento, como el caso del proceso de crecimiento de las plantas que veremos en el capítulo 3.

Claramente se puede observar que diversos elementos juegan un papel relevante en la explicación de la formación de los cristales de nieve. Pero todos ellos

apuntan a la *construcción de escenarios posibles*<sup>23</sup> con condiciones ambientales propicias para que puedan generarse los cristales de nieve, ya sea considerando un día frío de invierno en las montañas, utilizando una cámara experimental donde se recrean las condiciones adecuadas de temperatura y humedad, o bien, simulando el proceso de crecimiento por medio de algún modelo computacional.

Desde un inicio se sabe que las condiciones ambientales son determinantes para que pueda comenzar el proceso de crecimiento de los cristales de nieve, puesto que sólo en un rango limitado de temperatura y sobresaturación un cristal de nieve puede formarse. Pero no es hasta que se estudia directamente el proceso de crecimiento, por medio de una cámara experimental o de un modelo computacional, que se logra tener una mayor comprensión del fenómeno, una comprensión que de otra forma no sería posible.

Observamos también que es en la interacción entre el cristal de nieve y el ambiente en donde surgen mecanismos que propician un comportamiento estable al momento en que las moléculas de agua ambientales se adhieren a la semilla de hielo. Esto hace que se identifiquen ciertas *regularidades* o *patrones* y, por tanto, podamos establecer leyes que nos ayuden a explicar su proceso de crecimiento. Sin embargo, ellas sólo explicarían algunas etapas del proceso de crecimiento, pero no otras en las que la inestabilidad cobra relevancia. En estas otras etapas es el *ordenamiento de eventos aleatorios* lo que nos lleva a explicar la complejidad de muchas de las morfologías hacia las que pueden crecer tales cristales.

Los patrones que se generalizan y representan en el proceso de faceteo, y el ordenamiento de eventos aleatorios asociados al proceso de ramificación, son dos aspectos de los procesos que surgen de la interacción entre el ambiente y la entidad cristalina y que juegan un papel explicativo para entender la formación de los

---

<sup>23</sup> Idea que apunta al concepto de árbol de posibilidades que desarrollo en el cuarto capítulo.

cristales de nieve. Si no se apela a ambos se tendría una imagen mucho más acotada y no una comprensión global del proceso de crecimiento.

Esto me lleva a preguntar cuál es el patrón explicativo en cuestión y cómo puede caracterizarse al notar que factores generales (leyes y modelos teóricos) y factores particulares (eventos aleatorios, materiales y contexto) se complementan mutuamente para ayudarnos a comprender el fenómeno. Es importante abordar esta cuestión pues, como veremos en el siguiente capítulo, por un lado, tradicionalmente en la filosofía de la ciencia se ha tendido a concebir que los factores en los que recae el valor epistémico son aquellos que expresan condiciones necesarias y suficientes (e. g. leyes). Por otro lado, en discusiones filosóficas acerca de explicaciones de fenómenos históricos únicos se ha planteado que un conjunto de eventos contingentes que llevan a la ocurrencia del fenómeno (integrados en una narrativa) es lo que explica el fenómeno.

En el caso de la formación de cristales de nieve el enfoque de la explicación está en elucidar cómo la estabilización del crecimiento produce una diversidad clasificable de morfologías. Esto se logra al dar cuenta tanto del crecimiento particular de un cristal de nieve (su unicidad), como de patrones en los que se estabiliza su crecimiento (su generalidad). Esto es así, puesto que cada cristal de nieve es único, pero, a pesar de ello, tiende a configurarse en patrones que pueden clasificarse.

La particularidad expresada en la unicidad del resultado y la generalidad expresada en patrones morfológicos a los que tiende cada cristal de nieve hace que resulte problemático asociar al fenómeno tanto a un tipo de explicación en el que se considera a las leyes o a los mecanismos generales como los únicos factores explicativos (explicaciones nomotéticas), como a uno en el que el énfasis está en la

conexión entre eventos contingentes (explicaciones narrativas de fenómenos históricos únicos).

Para analizar filosóficamente la explicación de la formación de los cristales de nieve es menester abordar en qué sentido se ha argumentado en la filosofía de la ciencia que los factores generales, específicamente las leyes, por un lado, y los factores particulares, como los eventos contingentes, por otro, son explicativos. En la siguiente sección respondo a esta cuestión y muestro por qué para ciertos fenómenos estudiados en las ciencias deben contemplarse ambos factores para explicarlos. Esto dirigirá la discusión al planteamiento central de la tesis el cual consiste en hacer ver que las explicaciones de fenómenos donde es importante tomar en cuenta cómo se estabilizan requieren de la elucidación de su proceso de crecimiento, proceso que propicia la configuración de un conjunto de posibles trayectorias de crecimiento al cual llamaré *árbol de posibilidades*.

## **Capítulo 2. El papel explicativo de las generalizaciones y la contingencia**

En este capítulo expongo cómo se ha abordado el papel explicativo de las generalizaciones y la contingencia en la filosofía de la ciencia. En la sección 2.1 comienzo por exponer la manera tradicional de entender el concepto de ley para responder por qué se ha considerado que las generalizaciones tipo ley son las candidatas para ser los elementos explicativos o, en otras palabras, los elementos que le dan valor epistémico a la explicación científica. En la sección 2.2 expongo una crítica al concepto tradicional de ley. Esto lleva a mostrar en la sección 2.3 una manera más adecuada de entender ley para el contexto de la explicación de la formación de los cristales de nieve.

En la sección 2.4 abordo la cuestión sobre el papel explicativo de la contingencia al mostrar que lo contingente tiene valor epistémico cuando es incorporado en narrativas. Muestro que dicho valor tiene que ver con el ordenamiento de elementos contingentes que llevan al acaecimiento del hecho a explicar.

Una vez respondido cómo se ha abordado el papel explicativo de las leyes, por un lado, y la contingencia, por otro, en las explicaciones científicas, en la sección 2.5 expongo una manera de relacionar factores generales (e. g. modelos o leyes) y particulares (e. g. eventos o contexto) de modo que se complementan mutuamente para explicar fenómenos históricos estudiados en las ciencias. En la sección 2.6 muestro que esa manera de relacionar dichos factores, si bien es relevante para explicar ciertos fenómenos históricos, no resulta adecuada para explicar fenómenos en los que se requiere dar cuenta de la estabilización de su proceso de desarrollo. Para mostrar lo anterior expongo el caso de la explicación de la estabilidad del Sistema Solar con el cual resalto la importancia de dar cuenta de la estabilidad del

sistema para comprender no sólo este sino también otros sistemas dinámicos complejos como el de la formación de los cristales de nieve.

### *2.1. La concepción tradicional de la explicación científica y el concepto de ley*

El tema de la explicación científica en filosofía de la ciencia se ha abordado tradicionalmente desde una perspectiva donde los únicos factores a los que se les atribuye un valor epistémico son aquellos que dan cuenta de condiciones necesarias y suficientes para que se dé el explanandum. Aunque se han propuesto varios tipos de factores a través de diferentes modelos explicativos, paradigmáticamente se ha considerado a las generalizaciones legaliformes como el tipo de factor que da cuenta principalmente de tales condiciones<sup>24</sup>. Por este motivo se ha considerado que las leyes son los únicos que pueden apoyar explicaciones. Esta consideración ha llevado a plantear una serie de propuestas con las que se busca establecer las características que deben de cumplir las generalizaciones para que carguen con valor epistémico o, en otras palabras, responder a la pregunta de cuándo una generalización puede considerarse una ley y cuando no.

Esta perspectiva de análisis en torno a la explicación científica, a la cual me refiero como la perspectiva centrada en leyes o nomotética de la explicación científica, queda claramente expuesta en uno de los modelos explicativos más influyentes y representativos del empirismo lógico: el modelo nomológico-deductivo (ND) de Carl Hempel (Hempel, 1965; Hempel & Oppenheim, 1948)<sup>25</sup>. El

---

<sup>24</sup> También podemos hablar de mecanismos generales pero, por claridad, en este escrito sólo me referiré a las leyes como el factor que da cuenta de las *condiciones necesarias y suficientes* que caracterizan a la explicación científica desde una perspectiva de análisis nomotética.

<sup>25</sup> La perspectiva nomotética de la explicación científica no empieza ni termina con Hempel. Es una perspectiva compartida por distintas concepciones en la filosofía de la ciencia que van desde

modelo ND indica que una explicación científica debe tener la forma de un argumento lógico, donde el enunciado que se refiere al suceso a explicar (explanandum) será inferido deductivamente por *al menos* una premisa nómica universal y por premisas que refieren a condiciones iniciales y de frontera (explanans). Para Hempel, las premisas nómicas son las únicas que cargan con el valor epistémico de la explicación. Las premisas que refieren a las condiciones iniciales y de frontera, si bien son importantes para derivar el fenómeno en cuestión, sólo tienen la función de situarlo o enmarcarlo. En otras palabras, una explicación de un fenómeno es epistémicamente relevante si involucra una inferencia lógica a partir de al menos una ley.

Con este modelo Hempel no pretende decir que de hecho así se expresan en la práctica las explicaciones científicas, más bien sólo algunas de ellas toman la forma de dicho argumento lógico. La mayoría se tratan de "explicaciones de forma elíptica", es decir, explicaciones en donde las leyes no son explicitadas, pero subyacen en la explicación. Sean explicitadas las leyes o no, sólo en virtud de ellas es que una explicación adquiere relevancia epistémica (Hempel, 1966, p. 242).

Lo que me interesa remarcar a continuación es que no cualquier generalización puede tener peso epistémico. En el caso del modelo ND sólo aquellas que cumplan las características de *necesidad y universalidad* pueden tener el estatus de ley. Estas características refieren a que "*cuandoquiera y dondequiera* que se dan unas condiciones de un tipo especificado F, entonces se darán también, *siempre y sin excepción*, ciertas condiciones de otro tipo G" (Hempel, 1966, p. 244, cursivas mías). Atribuir estas características al concepto de ley hace que el contexto no sea epistémicamente relevante en una explicación, pues, una vez se expresan las leyes,

---

positivistas como Herschel (1830) y Mill (1843) o empiristas lógicos como Braithwaite (1953), hasta concepciones contemporáneas como las del llamado "nuevo mecanicismo" (Machamer, Darden y Craver, 2000; Glennan, 2017), léase (Cartwright et al., 2020). Por mencionar algunas.

éstas se independizan del contexto de donde se obtuvieron. Así, las leyes pueden ser aplicadas a cualquier tiempo y espacio, sin excepción. Es por ello que la contingencia del contexto, explicitada en forma de condiciones iniciales y de frontera, sólo enmarca la situación en la que se desarrolla el fenómeno a explicar.<sup>26</sup>

Sin embargo, una de las problemáticas que surge de atribuir el valor epistémico de una ley a su universalidad y necesidad es cómo distinguirla de una generalización accidental. Para ilustrar esta problemática consideremos dos enunciados generales: "todos los trozos esféricos de oro tienen un diámetro menor a un km" y "todos los trozos esféricos de uranio-235 tienen un diámetro menor a un km". Ambos son enunciados verdaderos, en tanto que no se ha encontrado ningún caso que los refute, y universales, pero sólo el segundo se considera un enunciado tipo ley. Una razón de ello es porque la verdad del primer enunciado no es sustentada por una teoría, esto hace que se trate de una verdad contingente y, por tanto, sea considerada como una generalización accidental. En cambio, la verdad del segundo enunciado es respaldada por la teoría atómica, constituida por ciertos principios y leyes teóricas, con la cual se afirma que una sustancia radiactiva como el uranio es inestable a partir de cierta cantidad de masa. Esto sugiere que lo que sustenta la verdad de una ley son otras leyes más generales. La problemática aquí es que no parece ser razón suficiente la referencia a teorías para justificar el estatus de

---

<sup>26</sup> Hempel tenía en cuenta que en la ciencia se pueden encontrar muchos fenómenos en los que no es posible decir con certeza deductiva que ocurrirán o que ocurrieron dadas ciertas condiciones específicas, por lo que no podrían derivarse de leyes estrictamente universales. Se tendría que lidiar de alguna forma con este otro carácter contingente de muchos fenómenos. Para ello, Hempel recurre a la noción de probabilidad y plantea el modelo estadístico-inductivo (EI) de la explicación. Éste tiene la misma estructura argumentativa que el modelo ND, sólo que en vez de considerar premisas nómicas universales se consideran premisas nómicas de forma probabilística y la inferencia no es deductiva sino inductiva (Hempel, 1965). No obstante, el problema de fondo del modelo EI es que carga con un problema no resuelto de la teoría de la probabilidad, a saber, el problema de la clase de referencia (Coffa, 1974). En todo caso, también en el modelo EI son las leyes, sólo que formuladas como generalizaciones probabilísticas inferidas inductivamente, las que tienen poder explicativo.

ley de un enunciado general, pues se caería en una circularidad: la verdad de una ley depende de la verdad de otras leyes que a su vez depende de la verdad de otras.

Filósofos de la ciencia como Ernst Nagel argumentaron que la solución de dicha problemática está en el carácter de "necesidad", éste hace que las generalizaciones legaliformes expresen algo que debe de ser de esa manera y no de otra. Nagel sostiene que el concepto de ley "expresa una conexión «más fuerte» entre condiciones antecedentes y condiciones consecuentes que la de una mera concomitancia de hecho" (Nagel, 2006, p. 80). De esta conexión "más fuerte" se puede entender que hay una "necesidad" entre el antecedente y el consecuente.

Para Nagel, a diferencia de otras nociones de necesidad que han sido tomadas para caracterizar el concepto de ley (como la necesidad causal, física, real, etc.), la noción de *necesidad lógica* es la única que puede esclarecer el análisis, pues "[su] significado de necesario es transparente; y la teoría lógica, en verdad, suministra un análisis sistemático y generalmente aceptado de tal necesidad" (p. 82). Cabe resaltar que Nagel está de acuerdo en que es una noción problemática porque "ninguno de los enunciados como leyes en las diversas ciencias son, de hecho, lógicamente necesarios, puesto que puede demostrarse que sus negaciones formales no son contradictorias" (p. 83). Sin embargo, sostiene que el uso que se le ha dado a las leyes en las ciencias apunta a una noción de necesidad similar, mas no igual, a la de necesidad lógica. Así, para Nagel entender la necesidad natural en términos semejantes de necesidad lógica es el único camino plausible.

La concepción del carácter de necesidad en las leyes en términos semejantes a los de necesidad lógica queda claramente expuesta en el modelo ND, pues ahí el carácter necesario de las leyes no proviene de una necesidad metafísica, sino de la estructura deductiva de las explicaciones. Esto conlleva a considerar como una vía plausible la idea de que lo que distingue a una ley de una generalización accidental

es la capacidad de apoyar contrafácticos (Goodman, 1947), i. e., cuando se concibe una situación que no ha ocurrido, en caso de que ocurriera tendría que ocurrir de acuerdo con la ley. Una generalización accidental simplemente no aportaría nada en la situación contrafactual, pues no diría si tendría que ocurrir de esa forma o no.

Es importante resaltar aquí que la noción de necesidad se ha concebido como una noción dicotómica opuesta a la noción de contingencia. Esta última entendida, en este contexto, como lo que pudo o puede ser de otra manera, muchas veces asociada a lo accidental o azaroso. En este sentido, las generalizaciones accidentales por considerarse contingentes no son generalizaciones en las que se pueda apoyar el conocimiento. En cambio, la necesidad de una ley provee un piso firme para la ocurrencia de un fenómeno; no sólo implica lo que es verdadero sino lo que *debe* ser verdadero. De aquí que se diga que el carácter de necesidad hace que las leyes tengan la capacidad de "apoyar" contrafactualmente y también lo que las hace los elementos epistémicamente relevantes en la explicación científica.

No obstante, el mayor problema que me interesa remarcar de esta concepción es que al considerar que una generalización es epistémicamente relevante si y sólo si es universal y necesaria, la mayoría de las generalizaciones utilizadas en las ciencias no podrían considerarse como epistémicamente relevantes, pues no cumplen con estas dos características. Sin ir más allá, las generalizaciones utilizadas para explicar el proceso de crecimiento de los cristales de nieve no pueden considerarse como universales y necesarias pues los procesos en los cuales se expresan refieren a mecanismos particulares que emergen en condiciones materiales específicas. Estos mecanismos no se presentan de igual manera en procesos de crecimiento de otro tipo de cristales, sino que son propios de la manera en la que se van estructurando las moléculas de agua en un rango de condiciones ambientales específicas. Más aún, incluso considerando el mismo proceso de crecimiento de los cristales de nieve, hay mecanismos que se despliegan en ciertas condiciones (por ejemplo, el mecanismo

de nucleación-limitada cuando el cristal de nieve es muy pequeño), una vez cambian se despliegan otros (por ejemplo, la inestabilidad de Mullins-Sekerka cuando el cristal adquiere un tamaño propicio y aumenta la sobresaturación). Esto implica que la manera en la que se coordinan los mecanismos del faceteo y la ramificación no permite esgrimir una relación unívoca entre "unas condiciones de un tipo especificado F" con "ciertas condiciones de otro tipo G", pues aún en el caso ideal de mantener constantes las condiciones F siempre se tendrá un resultado distinto ( $G_i$ ).

Claramente la noción tradicional de ley no nos ayuda a entender el papel explicativo de las generalizaciones utilizadas en la explicación de la formación de cristales de nieve, pero funge como punto de partida a partir del cual es posible concebir nociones de ley más flexibles con las que se puede caracterizar una generalización epistémicamente relevante. De ahí que haya sido importante exponer la noción tradicional de ley. A continuación, abordo una noción de ley más flexible que resulta más adecuada para responder en qué sentido las generalizaciones utilizadas en la explicación de la formación de los cristales de nieve son explicativas.

## *2.2. Una crítica a la noción tradicional de ley*

Como lo vimos, en la perspectiva nomotética de la explicación las leyes, entendidas como generalizaciones universales y necesarias, son los únicos elementos con valor epistémico en las explicaciones científicas. Esta noción de ley implica una conexión causal infalible entre el antecedente y el consecuente que se cumplirá para todo tiempo y espacio sin excepción. Sin embargo, ambas características la hacen una noción sumamente estricta a partir de la cual es difícil que una generalización utilizada en la ciencia sea concebida como ley. A este respecto, Sandra Mitchell (1997; 2000) argumenta que el problema de entender a una ley de esta manera es

que filosóficamente se deja a la mayoría de las generalizaciones utilizadas en las ciencias fuera de este concepto tradicional o “normativo” de ley, como ella lo llama, y, por tanto, no es claro cómo jugarían un papel epistémico para explicar, predecir e intervenir.

Para Mitchell el problema tiene que ver con concebir al carácter necesario de las leyes en términos semejantes a los de necesidad lógica. El problema radica en que “la necesidad lógica carga la garantía más fuerte posible desde la verdad de las premisas a la verdad de la conclusión – la conclusión no podría ser falsa” (Mitchell, 2000, p. 248). Es decir, dada la verdad de la premisa es imposible que se dé la falsedad de la conclusión, por lo que no podría aceptarse excepción alguna. Trasladando el requerimiento lógico al mundo natural, una ley no podría tener excepciones, sin embargo, la mayoría de las leyes en la ciencia, si no es que todas, las presenta. Por tanto, caracterizar la noción de ley de esta manera implicaría que no habría leyes en la ciencia.

El problema de asociar la necesidad lógica a las leyes está estrechamente relacionado con la noción de universalidad. Como se mencionó, gracias al carácter universal es que una ley puede separarse del contexto empírico en el cual fue articulada y así aplicarse sin restricciones a cualquier tiempo y espacio. Sin embargo, particularmente en la biología evolutiva, la mayoría de las generalizaciones implementadas para explicar fenómenos evolutivos presentan excepciones, por lo que la excepción es la regla. Las generalizaciones como “la Primera Ley de Mendel”, “el Dogma Central de la Biología Molecular” o “la Ley de Kleiber” (Godfrey-Smith, 2014, p. 12-13) son un ejemplo de ello. Así, el hecho de que las generalizaciones biológicas presenten excepciones implica que se tratan de generalizaciones que

están restringidas a contextos específicos, i. e., no son universales y, por tanto, tampoco necesarias<sup>27</sup>.

Un argumento con el que se deja ver que el concepto tradicional de ley resulta inadecuado para tratar a las generalizaciones biológicas como generalizaciones epistémicamente relevantes es el que plantea John Beatty (1995). Él sostiene que las generalizaciones biológicas son consecuencia de la acción de agentes evolutivos como la mutación aleatoria, la hibridación, la selección natural, la deriva aleatoria, etc. Estos agentes tienen la capacidad tanto de crear como de romper "reglas" (generalizaciones), es decir, una generalización biológica puede surgir debido a estos agentes, pero también ellos pueden hacer que la generalización deje de intervenir en el desarrollo evolutivo de los organismos (se rompe la regla). En este sentido, las generalizaciones biológicas son "estados de la naturaleza evolutivamente contingentes" (Beatty, 1995, p. 46), no son una cuestión de necesidad sino de evolución histórica. "Pueden ser verdaderas, pero nada en la naturaleza necesita su verdad" (p. 52). Por ello, para Beatty no hay leyes genuinamente biológicas (en tanto que sean necesarias y universales), si acaso los únicos tipos de ley que limitan, mas no determinan, los procesos biológicos son leyes físicas o químicas<sup>28</sup>. Dicho planteamiento es lo que Beatty llama la *Tesis de la Contingencia Evolutiva* (TCE).

### *2.3. Leyes pragmáticas y una metodología integrativa*

El planteamiento de Beatty deja en claro un problema en torno a la manera tradicional de concebir una generalización epistémicamente relevante pues niega que puedan existir algo así como "leyes" en la biología evolutiva. Como lo vimos, en

---

<sup>27</sup> Vale puntualizar que al menos no una noción de necesidad semejante a la de necesidad lógica.

<sup>28</sup> Aun mencionando esta posibilidad, Beatty sugiere que, en el fondo, las generalizaciones de la física y la química deben de entenderse como generalizaciones cosmológicamente contingentes.

el modelo ND el carácter de necesidad y universalidad es lo que le da la fuerza explicativa a una ley y, por tanto, es lo que lleva a considerarlas como los únicos elementos epistémicos de la explicación científica. Pero si hay explicaciones en las que no hay "leyes" entonces debe de replantearse el concepto de ley, o bien, el de explicación científica.

Hoy en día pocos filósofos de la ciencia siguen defendiendo que las leyes estrictamente deban tener un carácter universal y necesario, al contrario, se han propuesto maneras más flexibles de entenderlas. Este es el caso de las discusiones en torno a las leyes *ceteris paribus* en las que se pueden enumerar bastantes propuestas con distintos enfoques como el de Cartwright (1983; 1989) o el de Fodor (1991). Pero para propósitos del escrito me enfocaré en exponer la propuesta de Sandra Mitchell (1997; 2000; 2003).

Mitchell plantea que no es necesario llegar al punto de decir que no hay leyes en la biología, como Beatty lo sugiere, sino que más bien se requiere entenderlas de manera más flexible tomando una perspectiva pragmática enfocada en el *uso* que se le da a las generalizaciones en las ciencias y no una perspectiva normativa enfocada en cómo deben de ser. La perspectiva pragmática le permite incorporar a la contingencia como un factor constitutivo de la misma noción de ley, en contraste con la concepción tradicional en la que se antepone.

Para Mitchell todas las leyes científicas "son contingentes en dos sentidos. Primero, son de manera evidente lógicamente contingentes<sup>29</sup>. Segundo, todas han 'evolucionado' en tanto que las relaciones descritas en la ley dependen de ciertas

---

<sup>29</sup> Para Mitchell que sean lógicamente contingentes implica que no hay ninguna relación legal que pueda ser descrita en términos de necesidad lógica, es decir, que la verdad de un enunciado legal depende directamente de la verdad de las condiciones empíricas en las que fue identificada. En otras palabras, la verdad de una relación legal ( $A \rightarrow B$ ) obtenida y aplicada en un contexto específico ( $I_1$ ) no implica que se conserve en otro contexto ( $I_2$ ). Un enunciado legal descrito en términos de necesidad lógica sería verdadero para cualquier contexto  $I_i$  (Mitchell, 2003, p. 131).

condiciones existentes" (Mitchell, 2003, p. 135). Ambos sentidos en los que concibe contingencia apuntan a la idea de que las estructuras del mundo no son lógicamente necesarias, o algo parecido, pues las relaciones descritas por estas leyes dependen de condiciones del mundo que han evolucionado contingentemente. La implicación que tiene esto es que para que una generalización sea epistémicamente relevante no debe estar fundamentada en una estructura lógicamente necesaria, sino en algún contexto específico que le dio lugar.

Lo anterior apunta a que muy pocas veces se puede dar una situación donde sea posible separar a las leyes del tipo de condiciones que les dieron lugar y aplicarlas a todas las regiones espaciotemporales, lo que daría pie a una ley irrestricta. Al contrario, la mayoría de las leyes utilizadas en las ciencias no pueden separarse del tipo de condiciones que las apoyan. De este modo, las leyes, en general, no son aplicadas con certeza deductiva, más bien proveen "*expectaciones confiables* de la ocurrencia de eventos y patrones de propiedades" (p. 124, cursivas mías) en una variedad de contextos. La confianza que se tendrá de aplicar una ley para explicar, predecir o intervenir dependerá de saber cuándo y dónde se aplicará. Por lo que un requisito para utilizar una ley será saber las condiciones específicas en las que fueron obtenidas y han sido aplicadas con anterioridad. Estas condiciones específicas es lo que Mitchell llama *condiciones de aplicabilidad*.

En la propuesta de Mitchell no es suficiente con expresar enunciados de forma general para representar estructuras del mundo, se necesita dar cuenta de sus condiciones de aplicabilidad. Éstas constituyen un elemento central de su concepto de ley, al que se refiere como *ley pragmática*, por lo que su valor epistémico no proviene de una necesidad lógica, sino de las condiciones en las cuales el enunciado general es aplicable. Esta manera de concebir una ley reconoce al contexto como un factor epistémico, por lo que deja de ser un mero elemento enmarcador como sucede en el modelo ND.

Asimismo, el hecho de que el contexto tenga valor epistémico implica que en última instancia, la contingencia juega un papel explicativo en tanto que la fuerza epistémica de una ley depende de condiciones que se presentaron de manera contingente durante el desarrollo evolutivo del universo y no de una estructura subyacente que gobierna los fenómenos. Con esto Mitchell no sólo parece aceptar la TCE de Beatty, sino que busca generalizarla para todas las ciencias, con la diferencia de que no ve productivo negar la existencia de leyes, sino que se requiere concebirlas como generalizaciones contingentes de diversos tipos.

Ahora bien, la problemática respecto a la distinción entre una ley y una generalización accidental no tiene cabida en la propuesta de Mitchell, pues el valor epistémico de una ley pragmática tiene que ver con sus condiciones de aplicabilidad y no con el carácter de necesidad y universalidad. La cuestión importante aquí, más bien, es cómo diferenciar unas de otras, puesto que no tienen las mismas características. Tomemos como ejemplo la Ley de la Conservación de la Energía y la Ley de Caída Libre de Galileo. La primera puede ser descrita como una ley irrestricta porque no parece presentar excepciones, mientras que la segunda sólo se aplica a regiones relativamente cercanas a la superficie terrestre, es decir, no se cumple en otros cuerpos celestes o incluso a distancias lejanas de la superficie terrestre. Esta consideración lleva a Mitchell a desarrollar un marco a partir del cual poder caracterizar y evaluar los distintos tipos de leyes científicas (Mitchell, 2003).

El marco evaluativo de Mitchell está constituido por múltiples dimensiones descritas por parámetros asociados a propósitos pragmáticos, como pueden ser ontológicos, de simplicidad, de precisión, de gestión cognitiva, etc. Cada uno de ellos describe un continuo de posibles valores, reflejando los aspectos que contribuyen a la confiabilidad de la expectación al aplicar la ley. En particular, el parámetro con el que caracteriza el aspecto ontológico es el parámetro de la estabilidad. Éste no sólo refleja el grado de contingencia asociado a la ley, i. e., si es más o menos estable,

sino también el tipo de contingencia asociado<sup>30</sup>. Esto remarca que las diferencias ontológicas entre las generalizaciones científicas no tienen que ver con la cuestión respecto a si se tratan de una ley o no, sino con el tipo y grado de contingencia asociado a las leyes.

El concepto de ley pragmática le permite a Mitchell (2009) plantear una *metodología integrativa* para entender fenómenos complejos estudiados en las ciencias contemporáneas desde una perspectiva centrada en leyes. La metodología integrativa está relacionada con su *pluralismo integrativo* con el cual afirma que la explicación de un fenómeno complejo se da por la integración de distintos modelos teóricos, cada uno de ellos enfocados en la descripción de diferentes aspectos o niveles organizacionales del fenómeno particular (Mitchell, 2003). Esta integración no debe confundirse con un unificacionismo, pues Mitchell sostiene que cada caso es único en tanto que es producto de una "multiplicidad de trayectorias causales y de la contingencia histórica del fenómeno" (Mitchell, 2003, p. 218), factores que "precede[n] una unificación global y teórica" (p. 217). Por ejemplo, la explicación de la división de trabajo en abejas se debe a la integración de varios tipos de modelos teóricos, pero estos no son los mismos que se utilizan en la explicación de la división de trabajo en hormigas. Aunque se hable del fenómeno de "la división de trabajo de organismos sociales", cada caso requiere de una integración de modelos locales que abordan aspectos particulares del fenómeno en cuestión. A lo que apunta Mitchell con ello es que en muchos casos no es posible desarrollar un modelo general, sino un conjunto de modelos locales que integran distintos elementos contingentes.

Su metodología integrativa y concepto de ley pragmática resultan más acorde a lo que se plantea para la explicación de la formación de los cristales de nieve, pues en ese caso no se busca desarrollar un modelo general que busque explicar todos

---

<sup>30</sup> Mitchell (2002) distingue distintos tipos de contingencia como la contingencia lógica, las contingencias evolutivas débil y fuerte, la multinivel y la multicomponente.

los aspectos del crecimiento de cristales sino modelos locales que explican aspectos específicos de distintas etapas del crecimiento. Además, estos modelos son específicos del fenómeno formativo de los cristales de nieve y no pueden aplicarse de igual manera a otros procesos de crecimiento, por ejemplo, de cristales minerales. Los modelos que explican aspectos específicos de los cristales minerales, si bien pueden ser similares a los aplicados para los cristales de nieve, involucran formulaciones matemáticas distintivas (Sunagawa, 2005). Tal como ocurre con la explicación sobre la división de trabajo de las abejas y las hormigas.

Dicho lo anterior, la propuesta de Mitchell parece ser adecuada para analizar la explicación de la formación de los cristales de nieve, ya que se puede afirmar que para explicar el fenómeno se integran una serie de modelos constituidos por leyes pragmáticas que explican aspectos específicos del proceso (como la cinética de acoplamiento o la difusión de partículas). Sin embargo, aunque su concepto de ley pragmática resulta esclarecedor para saber en qué sentido las generalizaciones incorporadas en los modelos juegan un papel explicativo, resulta limitada para entender el aspecto histórico reflejado en la manera en la que se coordinan los procesos estables e inestables que conforman el proceso de crecimiento de los cristales de nieve.

Como vimos en el primer capítulo, un aspecto importante en la explicación del proceso de crecimiento de los cristales de nieve es dar cuenta de la manera en la que se ordenan los sucesos particulares (cómo se van adhiriendo las moléculas del agua ambientales en el cristal de nieve). Este ordenamiento refleja un carácter histórico del fenómeno que, si bien es constreñido por mecanismos, no es completamente determinado por ellos por lo que no puede ser capturado por medio de leyes. En la sección 3.3 se verá que la retroalimentación entre factores particulares y generales reflejada en la coordinación entre procesos estables e inestables se puede entender mejor a partir del concepto de dependencia de trayectoria, pero

antes comentaré brevemente un caso estudiado por Mitchell para ilustrar por qué considero que las leyes pragmáticas no pueden capturar el carácter histórico de ciertos fenómenos.

El caso que Mitchell aborda para mostrar la pertinencia de su concepto de ley pragmática y su metodología integrativa es el del *Desorden Depresivo Mayor* (DDM), la enfermedad psiquiátrica más común que afecta a adultos y niños, y que está distribuida entre varios grupos étnicos y socioeconómicos. El DDM “es un comportamiento complejo de un sistema complejo que es dependiente de múltiples causas en múltiples niveles de organización (químico, físico, biológico, neurológico, psicológico y social)” (Mitchell, 2009, p. 7). Por lo que no es explicable sólo en términos de un “gen de la depresión”, es decir, no es posible entender el fenómeno optando por una estrategia reduccionista de la explicación<sup>31</sup>, ya que no hay una sola causa que dispare el desorden, ni tampoco un conjunto de causas a partir de las cuales se dé el efecto. Más bien, su explicación tiene que ver con el hecho de dar cuenta de la *interacción* entre componentes básicos, los genes, y el contexto sociohistórico de la persona.

Más precisamente, la explicación del DDM tiene que ver esencialmente con la interacción entre el gen 5-HTT y los acontecimientos vividos por la persona. Esto quiere decir que el gen y eventos estresantes por separado no son suficientes ni necesarios para explicar la enfermedad, sino que la probabilidad de que un adulto la desarrolle aumentará en función de la interacción entre el gen y el contexto social. Si el adulto tiene este gen y no vive eventos estresantes, la probabilidad de desarrollar el DDM es baja y, viceversa, si no tiene el gen, pero vive eventos estresantes también la probabilidad es baja. Para Mitchell, esto quiere decir que los componentes básicos sólo son relevantes al interactuar con un contexto, pues se

---

<sup>31</sup> Una estrategia reduccionista de la explicación consiste en reducir la explicación a relaciones agregativas entre constituyentes fundamentales, como los genes.

debe entender el rol de los genes "como sensible al contexto y el sistema en el cual opera como exhibiendo una plasticidad contingente de alto grado" (Mitchell, 2009, p. 9).

Una manera de interpretar lo que está sugiriendo Mitchell con el estudio de este caso es que, si bien hay una interacción e integración entre distintos niveles organizacionales (genético y social), el enunciado general que compone la ley pragmática parece relacionarse más con el nivel genético y el contexto en el cual es relevante el enunciado general se da a nivel social. Si este es el caso, hay una relación jerárquica entre niveles organizacionales, pues a un nivel organizacional se le asocia un enunciado general (el rol de los genes) y a otro nivel las condiciones de aplicabilidad (sensibilidad al contexto). Pero entenderlo de esta manera sugiere que el concepto de ley pragmática es la que integra jerárquicamente los distintos niveles organizacionales (el peso epistémico está en el rol de los genes; el aspecto sociohistórico de la persona sólo constituye las condiciones en las que se aplica el enunciado general asociado al nivel genético), perdiéndose así el valor pluralista de su propuesta y acercándose a un reduccionismo.

Otra manera de entender lo propuesto por Mitchell es que a cada nivel organizacional se le asocian leyes pragmáticas propias. Así, a nivel molecular se desarrolla un modelo que incorpora una ley pragmática asociada a los genes, el cual se integra con otro modelo desarrollado para entender el comportamiento humano a nivel social. Es decir, hay una integración entre modelos pertenecientes a distintos niveles organizacionales los cuales incorporan sus propias leyes pragmáticas. Aquí sí hay una integración pluralista como la sugiere Mitchell, sin embargo, considero que si la entendemos de este modo se presenta la problemática respecto a que las leyes pragmáticas no son suficientes para dar cuenta del carácter histórico del fenómeno. Esto es, hay ciertos niveles organizacionales, como los referentes a situaciones sociohistóricas, en los que se requiere articular una secuencia (o dar cuenta de un

orden) de eventos contingentes (i.e. una historia) para entender las relaciones que influyen en el acaecimiento del fenómeno<sup>32</sup>, por lo que las leyes, aún asociadas a un contexto, no son las que juegan el papel central en la explicación de este nivel organizacional.

Aquí se presenta una situación similar a la que señalo con los cristales de nieve, la diferencia es que en el caso del DDM estamos hablando de niveles organizacionales muy distintos (social y genético) que interactúan, mientras que con los cristales de nieve hablamos de un nivel organizacional molecular o de niveles organizacionales que giran en torno a éste. No obstante, considero que en ambas explicaciones la relación entre factores generales (leyes pragmáticas) y particulares (eventos contingentes) no debe verse como una relación jerárquica sino de apoyo mutuo para entender por qué ocurrió un resultado específico, ya sea una morfología cristalina particular o el hecho de que una persona manifieste el DDM o no.

Antes de examinar algunas propuestas que abordan la relación de apoyo mutuo entre factores generales y particulares en las explicaciones científicas, en la siguiente sección (2.4) expongo cómo se ha planteado en la filosofía de la ciencia el papel epistémico de lo contingente sin tener que ser asociado al concepto de ley (como lo hace Mitchell). Esto tiene que ver con el modo en que se explican acontecimientos históricos, como el referente al nivel organizacional sociohistórico del DDM, el cual apunta al uso de narrativas para integrar una serie de eventos contingentes que llevan al acaecimiento de un hecho.

---

<sup>32</sup> El nivel organizacional relacionado con la historia de vida de una persona, como su nombre lo indica, sugiere ser analizado desde una perspectiva sociohistórica o psicológica. Desde estas perspectivas, si bien se pueden generalizar ciertos aspectos de comportamientos de individuos, lo que es explicativo es la integración narrativa de una serie de eventos contingentes que llevan al acontecimiento a explicar (léase, por ejemplo, Sterelny (2016)).

## 2.4. El papel de lo contingente en las explicaciones narrativas

Como se ha expuesto, el tema de la explicación científica en la filosofía de la ciencia tradicionalmente se ha abordado desde una perspectiva nomotética. Sin embargo, no todas las maneras de explorar, explicar y entender el mundo en las ciencias encajan en un molde nomotético, particularmente en la historia, en las ciencias naturales históricas y paradigmáticamente en la biología evolutiva. En muchas de las explicaciones construidas en estas ciencias se reconoce la relevancia explicativa de elementos contingentes al ser incorporados en narrativas.

Una propuesta que aclara la manera en la que elementos contingentes juegan un papel explicativo es la de Robert Richards (1992). Él muestra que un suceso de la biología evolutiva, el acontecimiento central, es explicado por medio de una narrativa, la cual permite conectar temporal y causalmente una serie de acontecimientos contingentes que llevan al acontecimiento central. Para Richards las conexiones de estos acontecimientos deben entenderse a partir de una base estructural conformada por cinco dimensiones temporales implicadas en la narración<sup>33</sup> y tipos de causalidad asociados a cada dimensión temporal. Este tipo de explicación narrativa es una construcción lingüística en donde se relacionan las dimensiones temporales y causales permitiendo dar cuenta de conexiones entre acontecimientos que anteceden al acontecimiento central y a éste mismo. Así, *el orden temporal*, fijado por la narración misma, resulta ser el principio vinculador o lo que integra a los acontecimientos contingentes de la explicación narrativa.

En la propuesta de Richards la función central de las narrativas es la de conectar temporal y causalmente una serie de eventos contingentes para explicar un

---

<sup>33</sup> El tiempo de los acontecimientos, el tiempo de los acontecimientos narrados, el tiempo de la narración y el tiempo de la construcción narrativa.

*sujeto central*<sup>34</sup>. Dicha función apunta a otra manera de indagar el valor epistémico de una explicación científica, pues el peso epistémico no recae en leyes<sup>35</sup> sino en el modo en el que se conectan una serie de eventos contingentes. De este modo, lo contingente puede jugar un papel epistémico en la medida que es integrado por una narrativa.

Cabe resaltar que hay distintas maneras de abordar el concepto de narrativa. Éste es un concepto polivalente que ha sido definido de diversas formas, dependiendo de la disciplina y del énfasis a las características que se quiera remarcar. Por ejemplo, en la filosofía de la historia hay propuestas en las que la temporalidad juega un papel importante (e. g. (Gallie, 1964)), pero también otras en las que el orden temporal no es el principio vinculador sino, más bien, lo que integra es una síntesis interpretativa o un “juicio total y sinóptico” en la que se “configuran” u ordenan un conjunto de elementos de tal modo que se apoyen mutuamente (Mink, 1966; 1970). También se las ha concebido como historias con un estado de salida, un evento o proceso transformativo y un estado de llegada (Ferraro, 2015). O, incluso, como una “estructura cognitiva que conecta enunciados individuales y crea alguna trama general coherente, significado o interpretación del pasado” (Kuukkanen, 2012, p. 342).

Aunque haya diferentes maneras de entender a las narrativas las distintas propuestas apuntan, en general, a que su función principal es la de integrar distintos tipos de factores (eventos, acciones, contextos, conceptos, etc.) para dilucidar el hecho a explicar, hecho que generalmente refiere a un evento histórico único (e. g.

---

<sup>34</sup> El término *sujeto central* es acuñado por David Hull y refiere a una entidad histórica cuyo papel “es formar la hebra principal alrededor de la cual se teje la narración histórica” (Hull, 1975, p. 255).

<sup>35</sup> Recordemos que el concepto de ley puede ser interpretado de distintas maneras. De aquí en adelante cuando en el texto se apele al término ley, éste no referirá a un concepto tradicional de ley como el hempeliano, sino a uno más flexible como el de ley pragmática. Esto porque una definición de ley necesaria y universal hace que una narrativa no tenga importancia epistémica.

el inicio de la primera guerra mundial, la extinción de los dinosaurios o la evolución de una especie).

En particular, la filósofa de la ciencia Mary Morgan elucida dicha integración en términos de la creación de “un orden productivo entre materiales con el propósito de responder las preguntas por qué y cómo” (Morgan, 2017, p. 86). Para ella, en contraste con Richards, el principio vinculador de elementos no es necesariamente el tiempo, sino el *ordenamiento*, es decir, “la posibilidad de ser capaz de ordenar eventos – de elegir un conjunto de elementos relevantes y ponerlos en orden, esto es, en relación unos con otros” (p. 87). El tiempo es sólo una manera de ordenar elementos.

El *ordenamiento* al que apela Morgan es un concepto que es importante considerar en este escrito para aclarar cómo lo contingente juega un papel explicativo en la explicación de fenómenos contingentes, porque refiere no sólo a la conexión entre eventos particulares, sino también a la conexión con “categorías, conceptos, teorías y otros tipos genéricos de materiales que son pertinentes para dar una explicación de fenómenos en cualquier sitio y contexto científico específico” (p. 87). Este planteamiento sugiere que las narrativas no sólo son apropiadas para explicar eventos históricos únicos, como el origen de la vida, sino también fenómenos que pueden reproducirse, como la formación de los cristales de nieve. Esto, pues el ordenamiento involucrado en la narrativa enfatiza una relación entre factores particulares (eventos específicos) y factores generales (teorías, modelos, generalizaciones).

El planteamiento de Morgan resalta una característica de las narrativas que en muchas discusiones relativas al tema no se le da el suficiente peso o simplemente no se visibiliza, a saber, el papel que juegan factores generales y su relación con factores particulares. Si bien en muchas de las discusiones en torno a las narrativas

no se descarta que factores generales puedan jugar un papel explicativo, se enfatiza sólo la manera en la que eventos contingentes se conectan unos a otros para dar cuenta de un fenómeno histórico único. Este énfasis ha llevado a plantearse cómo analizar el valor epistémico de las explicaciones narrativas, pues no cualquier narrativa es válida para comprender un fenómeno<sup>36</sup>.

Richards buscó responder dicha cuestión al proponer que, a diferencia de las narrativas literarias, a las narrativas de las ciencias naturales históricas las distingue un *índice de realidad* el cual refiere a un parámetro local asociado a cada acontecimiento incorporado en la narrativa y a un parámetro global asociado a la narrativa como un todo y compuesto por el conjunto de los valores locales. El valor del índice local depende de dónde se obtienen ciertos acontecimientos que componen la narrativa, es mayor si son obtenidos de un experimento bien realizado y aceptado por una comunidad que si son una simple suposición o ejercicio mental. En este sentido, factores generales como las leyes sólo tienen la función de aumentar el valor de índices de realidad locales asociados a esos eventos, es decir, de apoyar o darles fuerza explicativa. Así, una narrativa será mejor que otra si tiene un índice de realidad global mayor. Sin embargo, por un lado, no es claro cómo se conforma su "índice de realidad global" a partir de los "índices de realidad locales" y, por otro lado, no parece ser un criterio efectivo para ser aplicado a muchos otros patrones narrativos de la explicación, particularmente, al patrón explicativo que abordo en el proyecto.

Para Morgan la relevancia epistémica de las explicaciones narrativas tiene que ver, particularmente, con un proceso de ordenamiento por coligación y yuxtaposición de elementos y no necesariamente por un ordenamiento temporal o

---

<sup>36</sup> Esta es una cuestión relevante pues en la biología evolutiva es posible elaborar distintas explicaciones narrativas igualmente convincentes para un mismo fenómeno, léase (Lewontin & Gould, 1979). Cuestión problematizada también en la historiografía (Ankersmit, 1983).

secuencial, como antes se mencionó. Con este ordenamiento se busca crear una imagen global, como un mosaico, "donde los muchos elementos individuales ganan su sentido y rol sólo por su posición con relación a la presencia de los otros elementos" (Morgan, 2017, p. 96). Esto sugiere que la fuerza explicativa del tipo de explicaciones narrativas que Morgan aborda se asocia al alcance explicativo que se logra más allá de un caso particular explicado, es decir, que el tipo de ordenamiento efectuado pueda extrapolarse a otros ámbitos.

No obstante, al igual que sucede con la propuesta de Richards, la manera en la que Morgan busca dar cuenta de la relevancia epistémica de las explicaciones narrativas se centra en casos muy específicos como lo son las explicaciones de investigaciones basadas en casos en las ciencias sociales. Por este motivo, aunque su idea de ordenamiento resulta esclarecedora para el propósito de esta tesis, su análisis no es del todo adecuado para tratar a casos como la explicación de la formación de los cristales de nieve. Esto es porque el carácter temporal del fenómeno requiere de una comprensión que contemple el seguimiento de su despliegue temporal. Este aspecto se aborda en el capítulo 3 y se asocia al concepto de árbol de posibilidades en el capítulo 4.

Dicho lo anterior, vemos que así como hay distintas maneras de concebir una narrativa también las hay para abordar la cuestión sobre su relevancia epistémica. Notamos también que la explicación de la formación de los cristales de nieve apunta a ciertos aspectos propios de las explicaciones narrativas, pero aun así todavía no es del todo claro que su explicación deba ser asociada a un patrón narrativo. Esto pues, si bien podríamos decir que parte importante de la explicación requiere ordenar una serie de eventos contingentes (adhesión de moléculas de vapor de agua en la superficie del cristal de nieve) para dar cuenta de cómo estos se conectan unos con otros hasta dar con la morfología final, también es importante ver cómo ese ordenamiento es propiciado y constreñido por mecanismos asociados a leyes y

descritos por modelos teóricos. Es decir, se tendría que incorporar a la explicación tanto el ordenamiento de los eventos contingentes como los modelos teóricos que guían este ordenamiento. Asimismo, aunado al comentario anterior, no estamos hablando estrictamente de un fenómeno histórico único, ya que, aunque a detalle cada cristal de nieve sea único, se pueden identificar patrones morfológicos hacia los que tienden a crecer, es decir, hay una suerte de repetibilidad o convergencia.

Esta situación es similar a lo que ocurre con el caso del DDP que Mitchell aborda. Una explicación narrativa enfocada en dar cuenta principalmente de la conexión entre eventos contingentes podría incorporar los acontecimientos particulares que una persona específica vivió para entender los aspectos personales y sociales que la llevaron a desarrollar la enfermedad, pero claramente hay factores generales (expresados en el papel de los genes) que forman parte de la explicación y que hacen que no se trate de un fenómeno histórico único (más de una persona puede presentar esta enfermedad). La enfermedad de una persona específica es un evento único, pero la explicación no sólo tiene que ver con lo que le ocurra a esta persona particular, sino también con algo que les es común a otras personas que desarrollan la misma enfermedad.

El hecho de reconocer que muchos tipos de fenómenos estudiados en las ciencias requiere de apelar a factores generales y particulares invita a abordar de una manera alternativa el tema de la explicación científica en el que se reconozca la importancia de las narrativas. La propuesta de Morgan es sugerente en este sentido, ya que abre la posibilidad a las narrativas de interrelacionar factores generales y particulares a través de la idea de ordenamiento (idea que apunta y se relaciona con el concepto de dependencia de trayectoria abordado en el tercer capítulo), pero su análisis se enfoca en casos muy distintos en los que la temporalidad no es central, por lo que su planteamiento en general no es del todo adecuado para analizar el

valor epistémico de la contingencia en la explicación de fenómenos como la formación de los cristales de nieve.

Recientemente, se han elaborado propuestas que buscan responder la cuestión sobre el valor epistémico de las explicaciones narrativas en las que éstas se ven apoyadas por modelos teóricos y se reconoce el papel de la historicidad de los fenómenos. En la siguiente sección abordo una de estas propuestas cuya tesis central es mostrar que factores generales como los modelos teóricos tienen una relación complementaria con las narrativas, es decir, las narrativas condicionan que modelos teóricos utilizar y los modelos teóricos constriñen que factores contingentes seguir.

### *2.5. Una relación entre las narrativas y los modelos teóricos en las explicaciones científicas*

En la sección 2.1 expuse que la perspectiva tradicional centrada en leyes para abordar el valor epistémico de la explicación científica. Mostré que esta perspectiva resulta inadecuada para analizar la explicación de la formación de cristales de nieve, aun considerando el concepto de ley pragmática en el que se reconoce la importancia del contexto en las explicaciones científicas, no como un factor enmarcativo y periférico, sino como uno que le da sentido y constituye la misma noción de ley. Esto, pues deja a un lado el papel epistémico que puede jugar la historicidad de los fenómenos. En la sección 2.4. expuse una perspectiva explicativa en la que dicha historicidad puede abordarse a partir de narrativas, pero que generalmente se enfatiza la conexión entre una serie de eventos contingentes que llevan a la ocurrencia de un fenómeno histórico único. En esta sección, abordo los planteamientos de Currie (2013, 2018) y Currie & Sterelny (2017) para exponer una propuesta que busca integrar estas dos perspectivas. Su propuesta radica en mostrar que los modelos teóricos y las narrativas son dos recursos epistémicos que se

complementan mutuamente para explicar fenómenos estudiados en las ciencias naturales históricas.

En sus trabajos, tanto Currie como Sterelny notan que, a diferencia de la mayoría de los historiadores, los científicos históricos no sólo apelan a hechos contingentes para explicar un fenómeno, también implementan modelos teóricos. Esto lleva a Currie (2013) a distinguir el uso de dos estrategias explicativas narrativas en ciencias naturales históricas como la paleontología y la geología.

La primera de ellas se implementa cuando el objeto particular a explicar (o sujeto central) requiere de poca información o detalle causal para ser entendido. Lo que le permite al científico construir un modelo general que integra la información causal relevante y a partir del cual se explica el objeto “como una ocurrencia de una regularidad” (Currie, 2013, p. 7). Este tipo de estrategia explicativa es implementada, por ejemplo, en la explicación de la glaciación del Neoproterozoico. Para explicarla se utiliza un modelo teórico donde se recurre a relaciones generales de factores como el albedo, una capa atmosférica delgada, bajas temperaturas y la concentración de masa continental. La explicación que resulta de implementar dicha estrategia (con la que se articula una “narrativa simple”) apunta a que el peso epistémico está en los patrones generales o leyes que se incorporan en el modelo teórico.

La segunda estrategia explicativa, en cambio, radica en desarrollar una “narrativa compleja” que consiste en explicitar una secuencia causal que incorpora a detalle las causas particulares de las cuales depende. Esta estrategia es implementada cuando no es posible subsumir la explicación a un modelo teórico debido a la influencia de una gran cantidad de causas contingentes que llevan a la conformación del fenómeno. Un ejemplo es la explicación del gigantismo de los Saurópodos. En tal caso la explicación incorpora en forma de una secuencia causal

detallada una diversidad de aspectos contingentes como las distintivas características fisiológicas primitivas que propiciaron su desarrollo peculiar, adaptaciones particulares en respuesta a presiones evolutivas u otros factores relevantes que comprenden distintos granos de análisis.

A diferencia de una narrativa simple, en una narrativa compleja el peso epistémico yace en la manera en cómo se integran los factores contingentes. Esto indica que la fuerza de la explicación no depende de leyes, como sucede con la narrativa simple, sino de la manera en la que la explicitación de una secuencia causal va incorporando una diversidad de elementos contingentes que hacen sentido al sujeto central. Esto nos remite a una idea muy similar a la planteada por Richards (ver sección 2.4).

Para Currie una mejor explicación, o bien, una explicación que proporciona mayor comprensión es la que incorpora más causas o detalles, más información, por lo que el ideal explicativo en las ciencias naturales históricas es la articulación de narrativas complejas. Este ideal explicativo contrasta con la perspectiva nomotética de la explicación en la que las causas que explican un acontecimiento de las ciencias naturales históricas buscan reducirse o unificarse en leyes.

En el planteamiento de Currie (2013, 2018) la unificación y fuerza de la explicación se da por la narrativa misma. Esto no implica que los modelos teóricos, los cuales incorporan leyes, se dejen a un lado, al contrario, cumplen la función de *apoyar* a los eventos particulares que conforman la narrativa (idea que sintoniza con lo sugerido por Richards). Tal planteamiento es relevante puesto que reafirma que una explicación narrativa puede apoyarse en modelos teóricos y, con ello, leyes para explicar un fenómeno histórico único. No obstante, vale la pena preguntarse si el peso epistémico de los modelos teóricos sólo tiene que ver con el hecho de que

apoyan la ocurrencia de eventos particulares o si pueden tener un papel más allá de ello.

En Currie & Sterelny (2017) la cuestión anterior se decanta por lo segundo, es decir, que los modelos teóricos en las explicaciones de las ciencias naturales históricas van más allá del simple hecho de apoyar eventos particulares que conforman la narrativa al hacer ver que hay una interrelación entre los modelos teóricos y las narrativas. Esto es, los modelos teóricos constriñen los aspectos contingentes a considerar, pero al mismo tiempo la narrativa condiciona qué modelos teóricos utilizar. Así, "en cuanto a reconstruir el pasado, entonces, narrativas y modelos forman un conjunto de herramientas epistémicas de constreñimiento -y de apoyo- mutuo" (Currie & Sterelny, 2017, p. 20).

Dicho planteamiento los lleva a considerar a la *coherencia* como un criterio que contribuye en el análisis de la relevancia epistémica de las explicaciones narrativas en las ciencias naturales históricas. Pero no la conciben sólo en términos lógicos, sino que también requieren satisfacer constreñimientos teóricos y evidenciales. En este sentido una mejor narrativa es aquella que es consistente tanto con principios y leyes incorporadas en modelos teóricos como con factores contingentes que caracterizan el contexto en el cual está inmerso el objeto de estudio.

Por ejemplo, en la paleontología los fósiles funcionan como material evidencial que carga información relevante del pasado con la que se construye la hebra principal de la narrativa, pero ésta adquiere forma sólo "en conjunción con un conjunto complejo de cuerpos de conocimiento que van desde la información acerca de características locales del ambiente hasta regularidades de grupos filogenéticos, procesos físicos y procesos químicos de decaimiento" (Currie & Sterelny, 2017, p. 18). Es decir, la información relevante para construir la narrativa viene de la evidencia

material, pero también de cuerpos de conocimiento que refieren a patrones generales, principios teóricos y factores contextuales. Así, la narrativa no sólo integra de manera coherente factores particulares, también patrones generales o leyes. Esta integración es lo que da sentido al explanandum.

Con su propuesta, lo que quieren mostrar Currie y Sterelny es que “mientras más rica sea nuestra imagen general de un entorno causal, más constreñida estará cualquier hipótesis narrativa acerca de una trayectoria a través de ese entorno” (Currie & Sterelny, 2017, p. 18), por lo que “nuestro rico conocimiento de las estructuras causales del pasado provee constreñimientos estrictos de admisibilidad” (p. 19). De este modo, una buena narrativa debe conectar coherentemente todo el trasfondo causal (constreñimientos teóricos, evidenciales y contextuales); mientras más enriquecido sea, más constreñida resulta la narrativa y, por tanto, podemos afirmar que tratamos con una mejor narrativa, o bien, con una narrativa epistémicamente relevante.

Las propuestas de Currie y Sterelny establecen una línea de análisis clara para dar cuenta de la relevancia epistémica de las explicaciones narrativas, por lo que avanzan en la comprensión de cómo lo contingente juega un papel explicativo en tanto que hay una relación de apoyo mutuo entre factores generales y particulares. Con su criterio de coherencia, que es más exigente que una coherencia lógica, plantean una relación retroalimentativa entre narrativas y modelos teóricos que constriñe y redirige significativamente la gran cantidad de información proveniente de factores teóricos y contextuales. Esta relación lleva a la construcción de narrativas epistémicamente relevantes para entender fenómenos históricos únicos estudiados en las ciencias naturales históricas.

La propuesta de Currie y Sterelny parece ser una propuesta plausible para abordar el valor epistémico en la explicación de la formación de los cristales de nieve.

Sin embargo, la explicación de este tipo de fenómenos se diferencia de fenómenos estudiados en las ciencias naturales históricas, como los tratados por Currie y Sterelny, en tanto que se requiere de un análisis que elucide cómo se estabiliza su proceso de desarrollo. En la siguiente sección abordo el caso de la explicación de la estabilidad del Sistema Solar para sustentar el requerimiento de este tipo de análisis para la comprensión de sistemas dinámicos complejos en el que, además, modelos y narrativas no deban verse como recursos epistémicos con funciones diferenciadas.

## *2.6. La explicación de la estabilidad del Sistema Solar*

Desde la postulación de las leyes de la mecánica clásica y la ley de gravitación universal de Newton se han explicado de manera satisfactoria muchos de los movimientos de los cuerpos celestes del Sistema Solar a partir de ellas, pero bajo el supuesto de idealizaciones tales como que la interacción entre planetas es insignificante. Sin embargo, desde el siglo XIX el filósofo William Whewell (1874) hizo ver que quedaba sin responder la cuestión sobre cómo el Sistema Solar había adquirido la estabilidad que podemos observar.<sup>37</sup>

La cuestión sobre la estabilidad del Sistema Solar es una cuestión que esgrimió Whewell para criticar una idea positivista de progreso epistémico basado en la “acumulación de verdades [hechos y leyes] que ninguna investigación posterior puede llegar a modificar” (Martínez, 2007, pp. 29-30). En su crítica apeló a modelos en los que se mostraba “que las variaciones producidas por las causas perturbadoras no tenían por qué llevar al sistema más cerca del estado de equilibrio” (p. 30). Estos modelos le llevaron a afirmar que una explicación basada en leyes y hechos que no cambian con el desarrollo de la ciencia no podría dar cuenta de aspectos centrales

---

<sup>37</sup> Tomo en particular la discusión de esta problemática de (Martínez, 2007) y el desarrollo histórico del problema de la estabilidad del Sistema Solar de (Peterson, 1993).

de la dinámica de sistemas físicos, como la estabilidad del Sistema Solar. Esta situación junto con el hecho de que sistemas dinámicos como el Sistema Solar presentan una "constante fricción y disipación de energía", siendo éste un fenómeno no explicable por medio de "leyes deterministas de la física", lo llevó a concluir que para que el Sistema Solar permanezca estable tendría que actuar una fuerza o causa no mecánica (teológica) (Whewell, 1874; Martínez, 2007, pp. 30-31).

El argumento de Whewell afirma que las leyes no son capaces de explicar todos los aspectos de un sistema dinámico como el Sistema Solar. Según Whewell nada nos dice que la estabilidad es o deba ser un aspecto necesario del Sistema Solar, por lo que sólo una causa teológica puede hacerla posible. Lo que me interesa remarcar con su argumento no es la respuesta teológica que da, sino la problemática que plantea respecto a la insuficiencia de las leyes para dar cuenta de un aspecto muchas veces ignorado en las discusiones filosóficas, pero de sumo interés en la física (ciencia paradigmáticamente asociada a explicaciones nomotéticas). La cuestión aquí es, si no me interesa apelar a una causa teológica, cómo explicar este aspecto contingente de los sistemas dinámicos.

Las explicaciones que no consideran una causa teológica para dar cuenta de la estabilidad de sistemas dinámicos se comenzaron a sugerir con los análisis cualitativos de ecuaciones diferenciales ideados por Henri Poincaré a finales del siglo XIX y principios del XX, pero sobre todo con el desarrollo posterior de teorías matemáticas como la teoría del caos o las de procesos estocásticos. En particular, con la teoría del caos se busca entender sistemas dinámicos deterministas modelados matemáticamente que presentan comportamientos erráticos o caóticos. Esto es, comportamientos que tienden a cambiar drásticamente con pequeñas variaciones en las condiciones iniciales, promoviendo una predictibilidad limitada. Este tipo de comportamiento se presenta al resolver las ecuaciones de movimiento de un sistema de tres cuerpos o más como es el caso del Sistema Solar. Por este

motivo se ha sugerido que los modelos basados en la teoría del caos son dignos candidatos para explicar la estabilidad del Sistema Solar (Peterson 1993).

Podría pensarse entonces que la explicación de la estabilidad de sistemas dinámicos complejos apunta a un tipo de explicación nomotética basada en leyes de movimiento caóticas. Sin embargo, es importante reconocer que dicha explicación e, inclusive, el mismo desarrollo de la teoría del caos no habría sido posible sin el desarrollo y uso de modelos computacionales. Estos modelos han permitido resolver sistemas caóticos al manejar una cantidad ingente de datos y variables. Para ello requieren de métodos matemáticos no analíticos, como el análisis numérico, en los que se establecen *reglas o normas* a partir de las cuales es posible desplegar una serie de simulaciones que representan escenarios posibles del desarrollo de un sistema dinámico. Como lo nota Martínez (2007), muchas de las normas utilizadas para simular no se deducen de la teoría del caos, sino que son producto de la "historia del desarrollo de modelos computacionales, y la nada despreciable tecnología asociada" (Martínez, 2007, p. 41). Esto implica que el tipo de explicación involucrado va más allá tanto de la simple referencia a leyes basadas en teorías o modelos teóricos, como de la articulación de una secuencia de eventos particulares que configuran una trayectoria de desarrollo.

En particular, para entender y explicar la dinámica del Sistema Solar en la actualidad se recurre a modelos computacionales que simulan los escenarios en los que se desarrollan las distintas trayectorias históricas que el sistema planetario puede tener. Con el avance de la tecnología se han podido simular trayectorias históricas para tiempos cada vez más largos<sup>38</sup>. Como antes se mencionó, las trayectorias simuladas en cada uno de los escenarios posibles no pueden ser cualesquiera sino aquellas construidas a partir de ciertas normas aceptables por una

---

<sup>38</sup> La cantidad de datos y el tiempo de desarrollo que puede desplegarse en la simulación depende del poder computacional derivado de los avances tecnológicos.

comunidad científica<sup>39</sup>. En este sentido, para Martínez la explicación de la estabilidad del Sistema Solar tiene que ver con la construcción de escenarios posibles en los que se puede desarrollar históricamente el Sistema Solar.

Asimismo, para Martínez la credibilidad de la explicación de la estabilidad del Sistema Solar se relaciona fuertemente con la “robustez de la predicción”. Esto es, la convergencia predictiva de distintos modelos computacionales, desarrollados de manera independiente, que apunta hacia la estabilidad del sistema por al menos tres mil millones de años más y la semejanza en el comportamiento de las distintas trayectorias históricas en las que se puede desarrollar el Sistema Solar es lo que le da sustento y credibilidad a la explicación. De este modo, en este caso, la credibilidad de la explicación no se da en términos de los dominios en que pueden ser aplicadas las leyes, sino en la convergencia predictiva a la que apunta el conjunto de simulaciones construidas por normas asociadas a distintos modelos computacionales.

Ahora bien, considerando lo anterior podemos decir que la relación complementaria entre modelos y narrativas en el tipo de explicación que Currie y Sterelny plantean (en el que los modelos tratan con aspectos regulares o generales y las narrativas dan cuenta de secuencias causales) no puede aplicarse en este contexto. Esto, pues las trayectorias históricas posibles simuladas del Sistema Solar (las cuales podrían ser entendidas como representaciones de secuencias causales) son construidas por los mismos modelos computacionales. En este caso, tales modelos tienen una función similar al de las narrativas, por lo que no parece ser el caso apelar a dos tipos de recursos epistémicos con funciones diferenciadas para

---

<sup>39</sup> Al respecto, Martínez afirma que este tipo de normas juegan “el papel de sancionar inferencias de la misma manera que lo hacen las leyes en explicaciones por leyes. En este sentido esta norma puede verse como una generalización del concepto de ley” (Martínez 2007, 52). Esta afirmación nos remite a otra manera de entender ley en términos de normas articuladas en el desarrollo de sistemas tecnológicos.

explicar el fenómeno. Más bien, los modelos computacionales apuntan, como lo veremos claramente en el cuarto capítulo, a un entendimiento narrativo en el que se requiere contemplar el conjunto de escenarios en los que se puede desarrollar históricamente el sistema.

La explicación de la estabilidad del Sistema Solar, siguiendo a Martínez, es posible gracias a normas articuladas en el contexto del desarrollo de sistemas tecnológicos (modelos computacionales), las cuales permiten estabilizar y construir escenarios del posible comportamiento del sistema. Asimismo, porque se asumen hipótesis razonables que consideran posibles variantes de interacciones entre los planetas<sup>40</sup>. Sin embargo, es importante notar que el valor de estas normas no reside en saber cuál es su contexto de aplicación, como sucede con las leyes pragmáticas, sino en su capacidad de construir escenarios que muestran los posibles desarrollos de la historia del Sistema Solar o, en general, de sistemas planetarios.

La posibilidad de construir escenarios gracias a las normas implementadas en modelos computacionales permite comprender el proceso formativo de los sistemas planetarios de manera similar al modo en que se comprende el proceso de crecimiento de los cristales de nieve. Esto, pues el proceso formativo de algún sistema planetario que parte desde cierto origen, digamos una explosión de supernova, pasa por el enfriamiento y aglomeración de materiales, y sigue hasta la conformación y estabilidad del sistema (o incluso hasta su enfriamiento y colapso) se comprende a la luz de la construcción de un conjunto de escenarios conformados por trayectorias posibles de desarrollo. Para el caso de la formación de los cristales de nieve el proceso de crecimiento de igual forma es un proceso histórico (con un

---

<sup>40</sup> Por ejemplo, si se asume que Júpiter por alguna razón explota en unos cuantos millones de años el futuro del Sistema Solar sería muy diferente a lo que esos modelos predicen.

origen y desarrollo contingentes) que, en gran medida, es explicado al apelar al conjunto de morfologías posibles en las que puede crecer cada cristal de nieve.

Esta similitud nos sugiere que responder a la pregunta sobre la estabilidad de sistemas dinámicos complejos no sólo elucida la dinámica de sistemas físicos como los sistemas planetarios, puede elucidar también otro tipo de sistemas en los que se requiera dar cuenta de la historicidad de su proceso formativo, como es el caso de la formación de los cristales de nieve. En ambos tipos de sistemas lo que se busca es identificar un conjunto de posibles trayectorias de crecimiento o desarrollo que nos permitan inferir los procesos que llevan a su estabilización. La diferencia respecto al caso del estudio del Sistema Solar es que en la formación de cristales de nieve es posible utilizar también sistemas experimentales que permiten reproducir el fenómeno en un laboratorio y contrastar los resultados con las simulaciones computacionales.

Dicho lo anterior, la necesidad de elucidar trayectorias históricas de desarrollo de los sistemas dinámicos complejos como el Sistema Solar para comprender su proceso formativo, al responder cómo éste se estabiliza, nos muestra la importancia de reconocer el papel epistémico de la contingencia. Sólo que aquí el papel de lo contingente no se expresa a través de una única secuencia causal o trayectoria de desarrollo, como ocurre comúnmente en la explicación de fenómenos históricos únicos, sino a través de un conjunto de escenarios posibles de desarrollo. Esto sugiere una manera distinta de analizar la relevancia epistémica de la contingencia, ya que el proceso formativo de dichos sistemas se comprende como un producto de la interrelación entre factores particulares que propician la novedad y, por ende, la diversificación de posibilidades de desarrollo y factores generales que constriñen esta diversificación.

En el siguiente capítulo, para dilucidar el tipo de interrelación entre factores generales y particulares que sugiero en el párrafo anterior, argumento que el proceso formativo o de crecimiento de sistemas dinámicos complejos, en particular el de la formación de cristales de nieve, debe entenderse como un proceso dependiente de trayectoria. Concebirlo de esta forma me lleva a plantear una manera de analizar el valor epistémico de lo contingente en ciertas explicaciones científicas en términos de la configuración de un conjunto de escenarios posibles en los que puede desarrollarse un fenómeno. Más precisamente, muestro que la manera de abordar el valor epistémico de lo contingente en explicaciones donde se tiene que reproducir el proceso de crecimiento de un fenómeno por medio de sistemas experimentales (e. g. modelos computacionales o cámaras de convección) tiene que ver con la construcción de *árboles de posibilidades*. Concepto central del proyecto que dilucido en el capítulo 4.

## **Capítulo 3. Dependencia de trayectoria y reproducción del fenómeno**

En este capítulo elucido el concepto de dependencia de trayectoria y muestro que el proceso de crecimiento de los cristales de nieve debe verse como un proceso dependiente de trayectoria. Argumento que concebir al proceso de crecimiento como dependiente de trayectoria refleja un tipo de relación retroalimentativa entre factores generales y particulares que ayuda a entender la manera en la que se coordinan los procesos de faceteo y ramificación, coordinación que da pie a la diversidad morfológica de los cristales de nieve.

Para ello, en la sección 3.1 abordo el concepto de contingencia histórica con el fin de aclarar por qué aspectos contingentes de fenómenos históricos, particularmente los de la biología evolutiva, juegan un papel genuinamente explicativo que no puede ser reducido a leyes. Asimismo, dicho concepto me ayudará a dilucidar algunas de las características que son importantes considerar para tener mayor claridad del concepto de dependencia de trayectoria. En la sección 3.2 y 3.3 argumento que el proceso de crecimiento de los cristales de nieve debe verse como un proceso dependiente de trayectoria para entender la dinámica de la coordinación entre los procesos de faceteo y ramificación. Finalmente, en la sección 3.4, me apoyo en la manera en que los modelos computacionales permiten simular el proceso de crecimiento para sustentar que dicho proceso es un proceso dependiente de trayectoria configurado tanto por factores particulares (e. g. eventos aleatorios) como por factores generales (e. g. normas).

Con el concepto de dependencia de trayectoria que aquí desarrollo, planteo el reconocimiento de una dimensión interactiva y material en la construcción de la explicación y apunto a un patrón explicativo de tipo narrativo en donde su valor

epistémico se relaciona con un conjunto de trayectorias posibles al que llamaré en el cuarto capítulo árbol de posibilidades.

### *3.1. Contingencia histórica*

En el capítulo anterior discutí dos cuestiones principales: cómo considerar una generalización epistémicamente relevante (enfaticando por qué no son los únicos elementos explicativos en muchas explicaciones científicas) y cómo lo contingente puede jugar un papel explicativo (al incorporarse en una narrativa). No obstante, la respuesta a la segunda cuestión se abordó brevemente apelando a las narrativas como un recurso en el que se reconoce el papel epistémico de lo contingente, pero falta profundizar en la cuestión sobre por qué aspectos contingentes no pueden ser subsumidos a leyes y, por ende, por qué para fenómenos históricamente contingentes se amerita una narrativa. Responder dicha cuestión aclarará algunas de las características de los aspectos contingentes que entran en juego en la explicación de la formación de los cristales de nieve y otros fenómenos que requieren su reproducción por medio de modelos computacionales.

Anteriormente me he referido por contingencia como aquello que no puede ser capturado por leyes, aquello que no ocurre por necesidad o algo que pudo ocurrir de otra manera. No obstante, es importante explicar más a detalle dicha noción para dejar en claro por qué la comprensión de muchos fenómenos estudiados en las ciencias requiere la construcción de narrativas, más que la simple referencia a leyes. En otras palabras, qué es lo que hace que ciertos fenómenos contingentes requieran ser explicados, al menos en parte, por la integración u ordenamiento de una serie de factores contingentes que llevan a un resultado (a un suceso o a la formación de un objeto, como en el caso de los cristales de nieve).

Una manera de responder dicha cuestión, principalmente en la literatura de la biología evolutiva, es mostrando que “la historia importa”. A grandes rasgos lo que quiere decir tal afirmación es que para entender por qué se dio una forma biológica es crucial dar cuenta de una serie de eventos antecedentes que llevaron a su ocurrencia, es decir, su historia. Estos eventos generalmente son eventos contingentes por lo que para mostrar que la historia importa se ha apelado a la noción de *contingencia histórica*, la cual considero está estrechamente relacionada con el concepto de *historicidad*. Esta noción ha sido interpretada de distintas maneras (Lewontin, 1967; Sober, 1988; Gould, 1989; Beatty, 2006; Desjardins, 2011), pero una interpretación que, si bien no está consensuada, identifica ciertas características clave para entender el sentido en el que juega un papel epistémico es la de Beatty (2006).

Beatty identifica dos características complementarias de la contingencia histórica en el trabajo *Wonderful Life* (1989) de Gould: la *impredictibilidad* y la *dependencia causal*. La primera se refiere a la impredictibilidad de la ocurrencia de estados antecedentes que llevan a una forma biológica y la segunda a la dependencia causal entre ellos y la forma biológica. La relación entre estas dos maneras de entender contingencia enfocadas en la historicidad de los procesos evolutivos implica que los estados que anteceden al resultado evolutivo a explicar son necesarios (dependencia causal), pero insuficientes (impredictibilidad). Más adelante aclaro esta idea.

Para aclarar la idea de dependencia causal imaginemos una canica que se deja caer desde la orilla de un tazón hacia su fondo. Aquí no importa desde qué punto se deje caer la canica, siempre se dirigirá al fondo del tazón, es decir, cualquier punto inicial de la trayectoria y, por tanto, cualquier trayectoria que se tome, llevará inexorablemente al mismo resultado. Este caso es uno en el que la historia *no* importa, porque para explicar por qué la canica cae al fondo del tazón no tendrían

que expresarse los estados antecedentes, o bien, la trayectoria particular de la canica. Únicamente se requeriría explicitar las constricciones de la forma del tazón (condiciones de frontera) y la ley de la fuerza de la gravedad, expresando así una explicación de tipo nomológico-deductivo.

Ahora bien, la historia importa cuando se agrega un segundo pozo al tazón. Este sistema canica-tazón tiene la posibilidad de presentar dos resultados: que la canica caiga en el primer pozo o en el segundo pozo. El resultado depende no sólo de la forma del tazón y de la fuerza de la gravedad, sino también de la posición inicial desde donde se deje caer la canica. Aquí la historia importa en tanto que el resultado final depende del estado o estados antecedentes. En otras palabras, la historia es importante cuando el resultado depende esencialmente del origen y de la trayectoria del proceso.

El análogo evolutivo a esta situación es representado por el diagrama llamado "paisaje adaptativo", expuesto por Sober (1988) y recuperado por Beatty & Desjardins (2009). Este diagrama puede verse como un plano cartesiano, cuyo eje vertical corresponde a la adecuación adaptativa (*adaptive fitness*) y el eje horizontal al genotipo/morfología de la especie, y la función graficada refiere al pico adaptativo de una especie, es decir, a la adecuación óptima de un rasgo en cierto ambiente (figura 8). Una explicación adaptacionista concebiría sólo un pico adaptativo que correspondería a la situación del tazón con un solo pozo. En este caso, no importa cuál es el pasado de la especie, ésta se adaptará inevitablemente hacia ese pico adaptativo. Por otro lado, si el paisaje adaptativo presentase dos o más picos adaptativos los estados antecedentes son cruciales para determinar hacia cuál pico adaptativo se dirigirá la especie. En este segundo caso la historia es requerida para dar cuenta del resultado evolutivo.

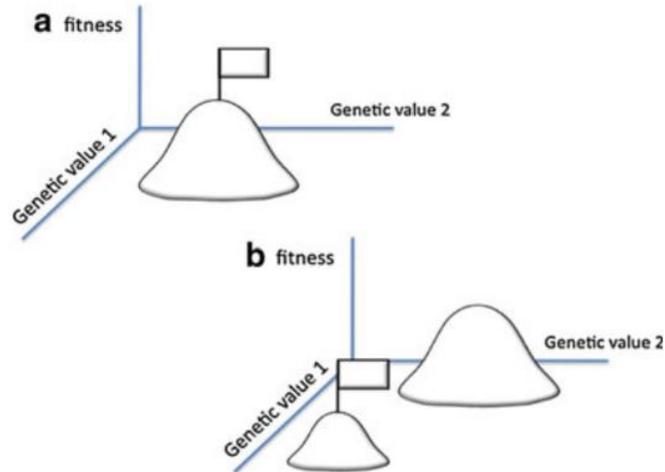


Figura 8. Dos situaciones de un paisaje adaptativo<sup>41</sup>.

Sin embargo, considero que la relevancia explicativa de la historia no se ve reflejada sólo si se apela a la dependencia causal de los estados antecedentes que llevan a una forma biológica. La dependencia causal por si sola refiere a los estados de la trayectoria que tienen que darse *necesariamente*<sup>42</sup> para que una forma particular ocurra, pero considerar sólo este aspecto no llevaría a una explicación muy diferente de una nomotética, puesto que la dependencia causal de un estado antecedente se podría entender como la dependencia del resultado a ciertas condiciones iniciales, o bien, a condiciones de aplicabilidad de una ley pragmática.

Los ejemplos del tazón y la canica y el paisaje adaptativo resultan esclarecedores para entender la importancia de la dependencia causal de la trayectoria evolutiva, pero no dejan ver claramente la otra característica que define a la contingencia histórica. Para ello valdrá la pena exponer la idea que engloba el experimento pensado "*Replaying Life's Tape*" de Gould (1989) con base en la interpretación de Beatty (2006). Éste consiste en imaginar a la historia evolutiva de

<sup>41</sup> Imagen tomada de Desjardins (2011).

<sup>42</sup> La "necesidad" a la que refiere Beatty no hay que entenderla como una necesidad lógica o siquiera como una necesidad asociada a leyes, sino sólo como una necesidad que refiere a la conexión entre los estados antecedentes y el resultado. Otra forma de referirse a ella es decir que un resultado es dependiente o contingente *respecto a* estados antecedentes particulares.

la vida como una cinta de video. La cuestión radica en que si fuese posible retroceder la cinta hasta un punto lejano en el pasado y a partir de ahí reprodujésemos la cinta ¿qué sucedería? Un posible resultado sería que ocurriesen exactamente las mismas trayectorias evolutivas de las especies que se han presentado hasta la actualidad. Si fuera éste el caso, la evolución no sería una cuestión de contingencia histórica, puesto que esta situación sugeriría que las formas biológicas estarían determinadas de antemano. Otra situación es que la cinta de video presentase una película radicalmente distinta a la que se tenía con anterioridad. En esta situación incluso comenzando con el mismo origen o las mismas condiciones de algún pasado se obtendrían distintas formas biológicas, por lo que éstas no estarían determinadas de antemano, el desenlace evolutivo sería contingente. La segunda situación es por la que apuesta Gould y en la que Beatty identifica la característica de impredecibilidad de la contingencia histórica.

Es importante notar que cuando se habla de impredecibilidad se tiende a pensar en la impredecibilidad de una forma biológica resultante, sin embargo, como lo remarcan Beatty & Carrera (2011), la impredecibilidad debe entenderse como impredecibilidad de los eventos pasados y no como impredecibilidad del futuro, pues la segunda no deja en claro por qué la historia importa: "¿Si un punto particular en el pasado deja abiertos futuros posibles alternativos, entonces en qué sentido ese punto en el pasado importa?" (Beatty & Carrera, 2011, p. 473). Esta pregunta deja ver que comprender impredecibilidad en términos del futuro o de la forma biológica resultante no tiene sentido, pues de hecho ésta se conoce<sup>43</sup>. A partir de éste se construyen en retrospectiva los estados antecedentes y se deja ver la dependencia

---

<sup>43</sup> Huelga decir que esta manera de entender impredecibilidad resulta adecuada en el contexto de explicaciones de fenómenos históricos únicos, pero no se aplica en fenómenos en los que no se busca explicar un resultado particular sino un conjunto de resultados posibles, como el caso de la explicación de la formación de cristales de nieve. Esta observación quedará clara más adelante, en las secciones 3.3 y 4.1, cuando abordemos dicho caso.

causal para dar cuenta de la forma biológica en cuestión. Asimismo, la impredecibilidad del futuro llevaría a pensar más en que el proceso es puramente azaroso o descriptible sólo en términos probabilísticos, perdiendo de vista la historicidad. Más bien, "la impredecibilidad del pasado mismo es la llave. La historia importa cuando un futuro particular depende de un pasado particular que no tuvo que pasar, pero lo hizo" (p. 471).

Otra forma de nombrar a esta característica, que puede ser más adecuada para no caer en la confusión, es como *contingencia per se* y hace referencia a variaciones aleatorias de los procesos evolutivos cuyas fuentes de contingencia pueden ser la mutación aleatoria o la deriva genética, por mencionar sólo dos. Huelga decir que no debemos confundirla con el azar, puesto que, como sugiere Beatty, lo que los diferencia es que el azar tiene que ver con "la persistencia diferencial de la variación existente" y la contingencia con el "origen y la dirección de la variación" (Beatty, 2006, p. 361).

Ahora bien, estas dos características de contingencia se interrelacionan para comprender la historicidad de los procesos evolutivos en tanto que "una secuencia históricamente contingente de eventos es tal que estados antecedentes son necesarios o fuertemente necesarios, pero insuficientes para que se dé un resultado" (Beatty, 2006, p. 340). Es decir, la dependencia causal hace que la ocurrencia de los estados antecedentes sea necesaria para que se dé un resultado particular, pero la impredecibilidad hace que, aun siendo necesarios, estos mismos sean insuficientes, puesto que pudieron haber sido distintos.

La dependencia causal y la impredecibilidad son dos características complementarias que conforman y definen a la noción de contingencia histórica. Por un lado, porque si sólo consideramos la dependencia causal perdemos de vista la idea de que los procesos evolutivos siempre pueden ser de otra forma, es decir,

caeríamos en la idea de que sólo puede haber una trayectoria histórica que lleva a un resultado particular. Pero esto nos colocaría en una situación muy similar al criticado programa adaptacionista (postura en la que se argumenta que la explicación de formas biológicas se logra principalmente apelando a la selección natural), puesto que sólo importaría dar cuenta de una historia causal que nos lleve inexorablemente a un resultado particular. Por otro lado, si sólo consideramos la impredecibilidad de un suceso o estado perdemos de vista la importancia de dar cuenta de los eventos pasados (la historia), lo que nos podría llevar a adoptar una explicación que apele a leyes probabilísticas. Es decir, a intentar encontrar relaciones legales probabilistas entre el ambiente y la especie para dar cuenta de un resultado particular, cayendo así en una explicación nomotética.

Dicho lo anterior, la complementariedad entre la dependencia causal y la impredecibilidad que definen la contingencia histórica muestra por qué es importante dar cuenta de la historia para explicar y comprender muchos de los fenómenos evolutivos. En otras palabras, muestra por qué es importante reconocer a la temporalidad como un elemento explicativo en sí mismo. Este reconocimiento queda expresado en un tipo de explicación que dé cuenta del origen y el desenlace hacia un posible estado posterior de un fenómeno (de una estructura etiológica), esto es, de una explicación narrativa, y no de una explicación que apele únicamente a leyes de la naturaleza.

### *3.2. Dependencia de trayectoria*

La manera en la que Beatty concibe contingencia histórica es importante porque remarca dos características que, si bien pueden adquirir distintos matices como veremos, sitúan un camino para aclarar el sentido en que la contingencia juega un papel epistémico en las explicaciones científicas. Otra propuesta que contribuye en

esta dirección, la cual resulta más adecuada para entender la contingencia que se presenta en el proceso de crecimiento de los cristales de nieve, es la planteada por Eric Desjardins (2011).

En su propuesta Desjardins señala tres condiciones con las cuales identificar a un fenómeno evolutivo como históricamente contingente, a saber, que tenga "1. Múltiples estados pasados posibles (diferentes estados iniciales); 2. Múltiples resultados posibles; 3. *Dependencia causal*: la probabilidad de un resultado dado debe cambiar en función de las condiciones históricas realizadas en una ocasión dada" (Desjardins, 2011, p. 348, cursivas mías). Estas tres condiciones, a su vez, lo llevan a plantear dos formas de contingencia histórica<sup>44</sup> en los procesos evolutivos: como *dependencia de las condiciones iniciales* y como *dependencia de trayectoria*.

La forma de contingencia histórica como *dependencia de las condiciones iniciales* se refiere a que la ocurrencia de una forma biológica depende específicamente de estados iniciales que originan el despliegue del proceso evolutivo. Es decir, que la probabilidad de ocurrencia de una forma resultante dependerá exclusivamente de un conjunto de condiciones iniciales y no de lo que pueda ocurrir durante el proceso. Por tanto, el papel explicativo de la contingencia en este tipo de contingencia histórica recae exclusivamente en las condiciones iniciales. Esta forma de contingencia no deja en claro el papel explicativo de la contingencia, pues lo anterior sugiere que es suficiente implementar modelos o mecanismos generales para describir el proceso desde ciertas condiciones iniciales

---

<sup>44</sup> Desjardins prefiere hablar de formas de historicidad que de formas de contingencia histórica para distanciarse tanto de la manera de entender dependencia causal como del concepto de impredecibilidad que para él es conflictivo. Sin embargo, considero que su idea de dependencia de trayectoria, más que problematizar, matiza las características de dependencia causal y de impredecibilidad expuestas en la sección anterior al asociar una idea de probabilidad fundamentalmente distinta de lo que tradicionalmente se ha entendido, es decir, de una probabilidad asociada a los axiomas de Kolmogorov.

hasta el resultado evolutivo, por lo que el papel de la contingencia se reduce a enmarcar el modelo en cuestión.

En cambio, la *dependencia de trayectoria* como forma de contingencia histórica hace ver que el papel explicativo de la contingencia no puede reducirse a un modelo o mecanismo general, pues la historia importa no sólo respecto a las condiciones iniciales sino también respecto a todo el proceso evolutivo. Esto lleva a que la condición de dependencia causal de un proceso dependiente de trayectoria involucra los estados intermedios, que son contingentes, entre las condiciones iniciales y la forma biológica, por lo que la probabilidad de ocurrencia de una forma particular irá cambiando en función de cada uno de los estados antecedentes ocurridos.

Para aclarar la idea observemos el diagrama de árbol de ramificación que se muestra en la figura 9. En este diagrama se puede observar que el estado resultante  $E_3$  es más probable que se obtenga si anteriormente ocurrió el estado  $E_1$ . Si después del estado  $E_0$  hubiese ocurrido el estado  $E_2$  la probabilidad de que ocurra  $E_3$  sería mucho menor. La consecuencia de esto es que no es posible atribuir una probabilidad a un resultado evolutivo (digamos  $E_3$ ) dadas unas condiciones iniciales ( $E_0$ ), sino que tenemos un panorama mucho más complejo donde la probabilidad de ocurrencia de un resultado ( $E_3$ ) no sólo dependerá de considerar la trayectoria  $E_0$ - $E_1$ - $E_3$  sino el conjunto de trayectorias posibles (en este caso:  $E_0$ - $E_1$ - $E_3$ ,  $E_0$ - $E_1$ - $E_4$ ,  $E_0$ - $E_2$ - $E_3$  y  $E_0$ - $E_2$ - $E_4$ ).

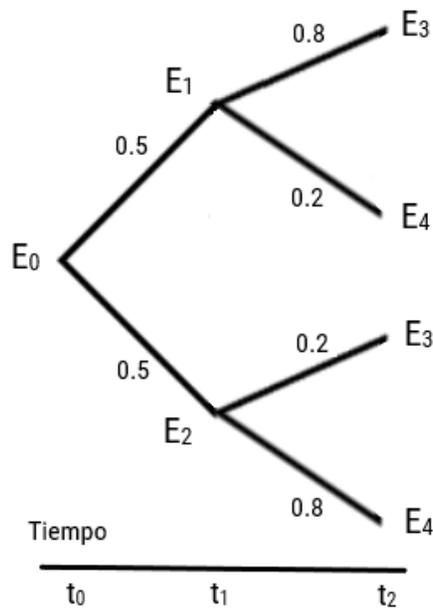


Figura 9. Dependencia de trayectoria visualizada en un diagrama de árbol de ramificación.

La manera en la que Desjardins entiende esta forma de contingencia histórica es otra manera de mostrar por qué “la historia importa” en un proceso evolutivo. Aquí, la forma biológica o estado evolutivo resultante no puede ser determinado o siquiera ser asociado a una distribución de probabilidad dadas ciertas condiciones iniciales, sino que dependerá de la trayectoria específica que tome a la luz de un conjunto de otras posibles trayectorias que pudo haber tomado, pero no lo hizo. Esto hace que la probabilidad de ocurrencia de un resultado esté determinada en función de la trayectoria histórica tomada en conjunción con sus trayectorias posibles no actualizadas. En este sentido, la idea de dependencia de trayectoria debe apelar a una noción de probabilidad fundamentada en el proceso histórico de los fenómenos<sup>45</sup>.

<sup>45</sup> Una posible manera entender probabilidad asociada a un proceso dependiente de trayectoria es en términos de cadenas de Markov como se utiliza en la teoría estocástica de sistemas. No obstante, aunque pudiera resultar útil para tratar matemáticamente algunos de los aspectos de un proceso dependiente de trayectoria, entra en conflicto con la misma idea de dependencia de trayectoria, pues

De este modo, esta noción de dependencia de trayectoria apunta a que el papel explicativo de lo contingente no sólo recae en la explicitación de una sola trayectoria histórica o secuencia causal, sino en un conjunto de trayectorias históricas posibles. Como lo veremos en la siguiente sección, esta idea es central para dar cuenta del papel explicativo de los procesos de crecimiento en la formación de entidades complejas, como los cristales de nieve.

### *3.3. La dependencia de trayectoria del proceso de crecimiento de los cristales de nieve*

La noción de contingencia histórica y en particular su interpretación como dependencia de trayectoria nos ayuda a entender no sólo procesos evolutivos o procesos de las ciencias naturales históricas, también otro tipo de procesos complejos ajenos a estas ciencias como el proceso de crecimiento de los cristales de nieve.

Recordemos que en el proceso de crecimiento de dichas entidades intervienen dos tipos de procesos: el faceteo y la ramificación. El faceteo refiere a un proceso en el que la adhesión de las moléculas de vapor de agua del entorno propicia un crecimiento estable del cristal de nieve hacia una morfología hexagonal. El faceteo se trata de un proceso estable pues cuando éste interviene no importa el orden y el modo en que las moléculas de vapor de agua se vayan adhiriendo, siempre propiciará que el cristal crezca hacia una forma hexagonal. La ramificación refiere a un proceso inestable en el que el orden en el que se vayan adhiriendo las moléculas de vapor de agua al cristal de nieve en formación será decisivo para su morfología resultante. La coordinación entre los dos procesos es lo que hace que ningún cristal

---

las cadenas de Markov cumplen con la propiedad de Markov, la cual básicamente elimina la influencia de la historia para determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento.

de nieve sea idéntico a otro, pero que aun así estos tiendan a estabilizarse en una diversidad de patrones morfológicos.

Ahora bien, tomando en cuenta lo anterior ambos tipos de procesos pueden considerarse como procesos históricamente contingentes, pues cumplen las tres condiciones que plantea Desjardins (2011). La primera condición (el comienzo con distintas condiciones iniciales) se cumple puesto que el crecimiento del cristal puede comenzar desde un amplio abanico de valores de humedad y temperatura; la segunda (múltiples resultados posibles) también, pues los cristales de nieve pueden crecer en una diversidad de morfologías; y la tercera (dependencia causal) también, ya que cada resultado posible depende, al menos, de las condiciones iniciales.

Respecto a las dos formas de contingencia histórica que Desjardins distingue, para el faceteo en específico considero que debe verse como un proceso histórico dependiente de condiciones iniciales, puesto que esta forma de contingencia histórica refiere a que la ocurrencia de un resultado depende específicamente de estados iniciales que originan el despliegue del proceso evolutivo. Es decir, que la probabilidad de ocurrencia de un resultado dependerá de un conjunto de condiciones iniciales y no de lo que pueda ocurrir durante el proceso. Notemos que esta forma de contingencia histórica lleva a que el faceteo pueda ser explicado apelando simplemente a leyes que se aplican en un rango de condiciones específicas de temperatura y sobresaturación. Éstas explican aspectos específicos de un cristal de nieve simple (con una simetría estrictamente hexagonal), como la cinética de acoplamiento o la difusión de calor.

En contraste, la ramificación debe entenderse como un proceso histórico dependiente de trayectoria porque lo que ocurra durante el proceso determina la morfología resultante. Aquí, las leyes, aun entendiéndolas como leyes pragmáticas, no son suficientes para explicar el proceso de crecimiento ni tampoco la morfología

resultante, se requiere dar cuenta de la trayectoria particular que recorre, pero también de otras posibilidades que pudo haber tomado, pero no lo hizo. Contrario al faceteo, la ramificación hace que el crecimiento del cristal sea inestable en tanto que eventos minúsculos (adhesión de una molécula en una región específica) llevan a resultados morfológicos totalmente distintos, por lo que, en vez de constreñir el resultado a formas generales, *posibilita la novedad o la emergencia* de nuevas morfologías. Este proceso hace que la dinámica del proceso de crecimiento global tenga un grado de complejidad que requiere el uso de modelos computacionales para construir un conjunto de trayectorias posibles de crecimiento.

La ramificación no puede verse simplemente como un proceso dependiente de condiciones iniciales, pues no es suficiente con establecer condiciones iniciales para explicar la formación (por ejemplo, de una "rama"), sino también los sucesos (adhesión aleatoria de moléculas de agua en la superficie) que ocurren durante el proceso. Por tanto, resulta más adecuado verlo como un proceso dependiente de trayectoria. Vale la pena notar que si nos fijamos en el diagrama de árbol de ramificación (figura 9) podemos asociar esta etapa del proceso, de manera muy simplificada, a las trayectorias  $E_0-E_1$  y  $E_0-E_2$ , donde  $E_1$  y  $E_2$  se refieren a regiones de acoplamiento de la faceta. Aquí, la probabilidad de que ocurra  $E_1$  o  $E_2$  dado  $E_0$  es la misma. En este caso, debido a que las regiones de acoplamiento de la faceta dependen del número de puentes de hidrógeno ( $i$ ) que pueden establecerse el diagrama de árbol refiere a un número de estados posibles  $E_i$  dado el estado  $E_0$  (que refiere a la faceta del cristal).

Una vez que la primera molécula se adhiere a algún punto aleatorio de la superficie la probabilidad de que la siguiente molécula del ambiente se adhiera alrededor de la primera es mayor que la probabilidad de que se adhiera a cualquier otro punto de la superficie. Por un lado, porque se establecen más puentes de hidrógeno en esa región y, por otro lado, porque esa región está más expuesta a las

demás moléculas del ambiente. Esto hará que el crecimiento en esa región sea más rápido que en cualquier otra región de la superficie, lo que propiciará la emergencia de una "rama". Aquí nos encontramos en una situación similar que se expresa en el diagrama de árbol antes mencionado, pero en la siguiente etapa del proceso histórico. Una vez que la molécula de vapor de agua se acopla en una región específica, digamos la región  $E_1$ , la siguiente molécula del ambiente tendrá una mayor probabilidad de acoplarse en torno a la región  $E_1$  (teniendo como resultado el estado  $E_3$ ) que en otra región de la faceta, digamos  $E_2$  (como posible resultado  $E_4$ ).

Este breve análisis nos muestra que el proceso de ramificación puede entenderse como un proceso dependiente de trayectoria. Por un lado, porque se puede representar como un diagrama de árbol de ramificación sólo que con un número muy elevado de trayectorias posibles. Por otro lado, porque la ocurrencia de una serie de eventos aleatorios durante el proceso de crecimiento *influye de manera crucial* en la morfología resultante del cristal de nieve, pero, a su vez, la morfología resultante depende de cada uno de los eventos que ocurrieron (dependencia causal). La breve explicación que di al apelar al diagrama de árbol de ramificación sólo es una idealización sumamente simplificada de una etapa del proceso de crecimiento de los cristales de nieve. Debe entenderse que estos eventos aleatorios se irán repitiendo y propiciarán la reconfiguración del crecimiento del cristal a lo largo del proceso.

Ahora bien, en el proceso de crecimiento de la mayoría de los cristales de nieve no sólo interviene un solo tipo de proceso (faceteo o ramificación), sino que se da una coordinación entre ambos, por lo que ésta nos provee una imagen más completa de la formación de los cristales de nieve que si sólo consideramos el faceteo o la ramificación por separado. En este caso, claramente no es adecuado entender al proceso de crecimiento como un proceso histórico dependiente de condiciones iniciales, porque, debido a que la ramificación actúa en al menos alguna

etapa del proceso de crecimiento, hechos particulares que se presenten durante el proceso tienen la suficiente fuerza para modificar la trayectoria de crecimiento, en consecuencia, influyen crucialmente en la morfología adoptada por el cristal de nieve. Por este motivo considero que el proceso de crecimiento de los cristales de nieve debe entenderse como un proceso dependiente de trayectoria.

Sin embargo, a diferencia del concepto de dependencia de trayectoria propuesto por Desjardins, es importante considerar no sólo el valor explicativo de hechos particulares que conforman un conjunto de trayectorias históricas, como el acoplamiento de una molécula de agua particular del ambiente en una región aleatoria de la faceta del cristal, sino también las fuerzas estabilizadoras que constriñen los posibles resultados, como las que intervienen en los mecanismos del faceteo y que pueden representarse como leyes incorporadas en modelos teóricos.

La cuestión aquí, entonces, es cómo entender la dependencia de trayectoria siendo que también entra en juego el proceso de faceteo como un proceso estabilizador. En otras palabras, cómo entender la coordinación entre procesos estables e inestables en términos de dependencia de trayectoria. En la siguiente sección respondo la pregunta al analizar la simulación de procesos de crecimiento por medio de modelos computacionales.

### *3.4. El papel de los modelos computacionales en la reproducción del fenómeno*

La formación de los cristales de nieve es un fenómeno intrínsecamente complejo que no puede ser explicado simplemente por una teoría o un modelo general. Requiere del análisis de cada una de sus partes y de la manera en cómo va interactuando el cristal con su entorno bajo distintas condiciones para dilucidar los distintos procesos

físicos que intervienen en su formación. Para tener una mejor comprensión del fenómeno se utilizan modelos computacionales que integran los distintos procesos físicos analizados por separado. En los resultados y en la manera en la que se integran estos procesos físicos es en donde se puede apreciar el carácter dependiente de trayectoria del fenómeno. Para dejar en claro esta afirmación explicaré cómo se construyen estos modelos y en qué sentido dilucidan el carácter dependiente de trayectoria del fenómeno.

Para explicar la formación de los cristales de nieve se han implementado varios modelos computacionales como el modelo de campo-fase (*phase-field*), el modelo de seguimiento-delantero (*front-tracking*) y el modelo del autómata celular (AC). Cada uno con sus ventajas y desventajas buscan dar cuenta de los cristales de nieve que pueden presentarse en la naturaleza. Todos ellos comparten la misma manera de abordar el problema:

comenzando con un pequeño *crystal de nieve digital*, primero se resuelve numéricamente la *ecuación de difusión* alrededor de él, asumiendo todas las *condiciones de frontera apropiadas*. De esta solución se extrae la *tasa de crecimiento* en todos los puntos de la superficie y luego se usa esta información para "hacer crecer" el cristal una pequeña cantidad que produzca un cristal ligeramente más grande. Se repite. Después de muchas iteraciones, el cristal se desarrolla hasta una morfología compleja que con suerte se parecerá a un cristal de nieve de laboratorio producido bajo las mismas condiciones físicas (Libbrecht, 2021, p. 147, cursivas mías).

Esta forma de proceder deja en claro los pasos que se siguen para simular procesos como la formación de cristales de nieve, pero también, como veremos más adelante, otros relacionados con la formación de estructuras complejas como las plantas. Se parte de ciertas condiciones iniciales y de frontera, en este caso el pequeño cristal

de nieve digital y los parámetros que representan condiciones ambientales como la sobresaturación y la temperatura. Aunado a ello, se incorporan las “reglas” (que también podríamos entenderlas como normas en el sentido que Martínez (2007) le da) que guiarán el crecimiento de ese pequeño cristal de nieve digital en relación con sus condiciones de frontera. Estas reglas pueden ser de diversa índole, pero para considerar que la simulación arrojará resultados realistas se tienen que implementar reglas basadas en procesos físicos como lo es la ecuación de difusión. Dicha ecuación es la regla básica que guiará el crecimiento, pero no es suficiente para simular la gran variedad de morfologías de los cristales de nieve. Para ello, en el modelado se introducen otras reglas, basadas igualmente en otros procesos físicos que matizaran el modo en que crece (tasa de crecimiento) el sistema.

Lo que se busca con estos modelos es desarrollar métodos numéricos que reproduzcan el crecimiento facetado y ramificado del cristal de nieve, apegándose a las condiciones físicas reales del sistema. Sin embargo, cada uno de ellos, al aproximarse al problema desde distintos ángulos y técnicas, dan cuenta de ciertos aspectos del proceso de crecimiento prescindiendo de otros. Esto lleva a que cada modelo sea adecuado para explicar algunas morfologías e inadecuado para explicar otras.

Por ejemplo, la ventaja del método de seguimiento-delantero es que logra modelar eficazmente los problemas de solidificación (vapor-hielo) de cristales de nieve lo suficientemente pequeños. Su desventaja, por un lado, es que se requieren algoritmos altamente complejos y, por otro lado, resulta complicado lidiar con la anisotropía y el crecimiento por facetado. En cuanto al método de campo-fase su ventaja es que, al partir de una cuadrícula coordinada fija, facilita el tratamiento de superficies facetadas en comparación con el método de seguimiento-delantero, permitiéndole modelar adecuadamente la fusión de frentes de solidificación (característica más común en la metalurgia, pero presente en el crecimiento de

cristales de nieve). Pero, al igual que con el primer método, es difícil lidiar con el crecimiento por facetado y con cinéticas de acoplamiento anisotrópico (Libbrecht, 2021).

En cuanto al método del AC su mayor ventaja que tiene respecto a los anteriores es que puede incorporar fácilmente cinéticas de acoplamiento altamente anisotrópicas. Pero también tiene la ventaja técnica de producir modelos simples de definir y construir, lo que permite que los tiempos de simulación sean relativamente cortos y que la parametrización de la cinética de acoplamiento y otros efectos físicos sea directa (Libbrecht, 2021, p. 158).

Para Libbrecht estas ventajas lo llevan a considerar que el modelo del AC sea el modelo con mayor potencial para la indagación de la formación de los cristales de nieve. Motivo por el cual su investigación se ha centrado en la construcción de modelos de cristales de nieve de AC donde no sólo le ha prestado atención “a las morfologías sino también al desarrollo de *reglas cuantitativas* de AC que con precisión reflejan los procesos físicos subyacentes que gobiernan el crecimiento del cristal de nieve” (p. 159, cursivas mías).

La facilidad que propician los modelos AC de desarrollar reglas asociadas a procesos físicos permite al científico saber con mayor claridad qué tipo de procesos entran en juego (por ejemplo, de ramificación o faceteo) y cómo se relacionan unos con otros para producir los distintos tipos de morfologías. Esto es, su enfoque no sólo tiene la virtud de identificar y asociar a procesos físicos reglas cuantitativas de manera clara, sino también de facilitar la integración de reglas asociadas a distintos tipos de procesos físicos (estables e inestables) y, por consiguiente, de simular la manera en la que procesos estables e inestables se coordinan para hacer crecer un objeto de estudio. Esto abre las puertas para explorar cómo ciertos modelos

computacionales reflejan el carácter dependiente de trayectoria del proceso de crecimiento.

El enfoque de la investigación de Libbrecht hacia las reglas que permiten simular morfologías complejas realistas es un sello característico que no es propio de la simulación del crecimiento de cristales de nieve (ni de los modelos de AC), sino que también se presenta en distintos tipos de modelos computacionales con los que se busca entender procesos de crecimiento de fenómenos naturales. Tal es el caso de los *modelos de lenguaje formal* como el modelo de sistema-L con el que se ha buscado entender, de manera muy similar al proceso de crecimiento de los cristales de nieve, el proceso de crecimiento de las plantas (Green et al., 2020).

A continuación, para mostrar cómo los modelos computacionales pueden integrar distintos tipos de procesos estables e inestables y, por consiguiente, reflejar el carácter dependiente de trayectoria del proceso, expondré la manera de proceder de los modelos de sistema-L. Esto por dos razones. Por un lado, por simplicidad y claridad de la exposición, ya que aunque el modelo de AC sea relativamente fácil de definir y construir sigue teniendo un grado de complejidad que, para los propósitos del escrito, prefiero evitar. Por otro lado, para mostrar que la propuesta del presente proyecto no es exclusiva de la formación de los cristales de nieve, es decir, que se puede generalizar a otros casos.

Ahora bien, al igual que con los cristales de nieve la comprensión del proceso de crecimiento de las plantas se ha abordado desde distintas perspectivas. Desde la formulación de modelos teóricos (“modelos reduccionistas o top-bottom”) enfocados en el estudio de los constreñimientos que actúan en las plantas (los cuales ignoran los detalles morfológicos y la estructura de la planta), hasta la construcción de modelos que capturan la organización de patrones de ramificación de las plantas.

Uno de estos últimos son los modelos de sistema-L, un tipo de modelo de lenguaje formal. La importancia de estos modelos es que permiten “capturar patrones de crecimiento repetitivo, tal como la ramificación, como reglas” (Green et al., 2020, p. 26). Un ejemplo simple de este modelo es un sistema-L con dos reglas (2.1). Éste consiste de un axioma A que establece, digamos, la existencia del elemento A, y las reglas “A implica B” y “B implica AB”, con B como otro elemento. Posteriormente, se procede con una iteración utilizando estas reglas y teniendo como resultado distintas etapas, con la etapa inicial empezando con el axioma A (ver tabla 1). Cabe notar que el modelo por sí mismo no tiene fuerza explicativa sino hasta que se le da significado a los símbolos y a las reglas. Por ejemplo, en el contexto de la formación de plantas, si se establece que A y B refieren a tipos de ramas de un árbol, las reglas denotarían la organización de la ramificación.

| Sistema-L 2.1 |                    |
|---------------|--------------------|
| Axioma        | A                  |
| Regla 1       | $A \rightarrow B$  |
| Regla 2       | $B \rightarrow AB$ |

| Etapa | Patrón   |
|-------|----------|
| 0     | A        |
| 1     | B        |
| 2     | AB       |
| 3     | BAB      |
| 4     | ABBAB    |
| 5     | BABABBAB |

Tabla 1. a) Sistema-L 2.1; b) Iteración del sistema-L 2.1.

Los modelos de sistema-L utilizan una técnica de *reescritura paralela* la cual tiene la función de “construir objetos complejos al reemplazar sucesivamente partes de objetos iniciales simples usando reglas de reescritura” (Green et al., 2020, p. 27). El objetivo de esta técnica es “capturar procesos simultáneos de expansión, división e iniciación de muchas células diferentes o partes de plantas al mismo tiempo” (p. 27).

Asimismo, al igual que con los modelos utilizados para estudiar la formación de los cristales de nieve, si las reglas y los símbolos no están asociadas con procesos físicos, fisicoquímicos o fisiológicos la simulación nos puede arrojar resultados, a lo más ilustrativos, pero no un conocimiento verosímil del crecimiento de las plantas. Por ello, se refinan los modelos con la introducción de diversas reglas asociadas a algunos de dichos procesos dando pie a *sistemas-L paramétricos*. Por ejemplo, se pueden introducir reglas de crecimiento asociadas al ángulo de incidencia de la luz en sus hojas, a la intensidad o longitud de onda de la luz, a la acumulación de sustancias, etc. Estos refinamientos permiten dar cuenta de muchos “detalles” de las plantas, como puede ser la orientación espacial o los cambios en módulos o partes de la planta (tallos, ramas, hojas).

Un ejemplo simple de un modelo refinado es el sistema-L 2.2 (tabla 2), cuya parametrización produce formas como las de un arbusto o un árbol (figura 10).

a)

| Sistema-L 2.2 |                        |
|---------------|------------------------|
| Axioma        | X                      |
| Regla 1       | $X \rightarrow F[A]FY$ |
| Regla 2       | $Y \rightarrow F[B]FX$ |
| Regla 3       | $A \rightarrow X$      |
| Regla 4       | $B \rightarrow Y$      |

b)

| Etapa | Patrón  |
|-------|---|
| 0     | X   |
| 1     | F[A]FY  |
| 2     | F[X]FF[B]FX   |
| 3     | F[F[A]FY]FF[Y]FF[A]FY   |
| 4     | F[F[X]FF[B]FX]FF[F[B]FC]FF[X]FF[B]FX                              |
| 5     | F[F[F[A]FY]FF[Y]FF[A]FY]FF[F[Y]FF[A]FY]<br>FF[F[A]FY]FF[Y]FF[A]FY |

Tabla 2. a) Sistema-L 2.2; b) Iteración del sistema-L 2.2.

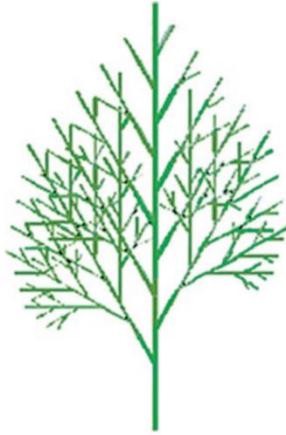


Figura 10. Patrón de ramificación producido por el sistema-L 2.2.<sup>46</sup>

Los dos modelos simples que expuse son modelos que reproducen morfologías relacionadas de manera unívoca con ciertas condiciones iniciales y reglas. El resultado en cada etapa está determinado y, por ende, se producirá un resultado morfológico específico. Por tal motivo, dichos modelos simulan procesos que pueden ser entendidos como procesos históricos dependientes de condiciones iniciales. Tal como se planteó respecto al proceso de faceteo en la sección 3.3.

No obstante, los sistemas-L también pueden ser refinados introduciendo reglas estocásticas, las cuales representan “variaciones naturales” (p. 30). A estos modelos se les llama *sistemas-L estocásticos*. Tales modelos permiten que el sistema tenga la posibilidad de elegir una opción entre dos o más reglas alternativas que se pueden aplicar a cada etapa, “con cada regla teniendo cierta probabilidad de ocurrencia” (p. 30). Un ejemplo sencillo de un sistema-L estocástico se obtiene al reemplazar la regla 3 del sistema-L 2.2 por dos reglas. Una regla 3a asociada a una probabilidad de ocurrencia de 0.8 y otra regla 3b asociada a una probabilidad de ocurrencia de 0.2 (Tabla 3).

---

<sup>46</sup> Imagen obtenida de (Green et al., 2020).

|          |                         |
|----------|-------------------------|
| Regla 3a | (0.8) $A \rightarrow X$ |
| Regla 3b | (0.2) $A \rightarrow F$ |

Tabla 3. Reglas de un sistema-L estocástico.

El refinamiento hará que durante la simulación el sistema tenga varias alternativas de producir distintos tipos de módulos de la planta virtual en cada etapa, por consiguiente, cada vez que se corra una simulación se obtendrá una morfología distinta. La tabla 4 muestra tan solo tres posibles patrones de crecimiento de una planta considerando la regla estocástica de la tabla 3. La tabla 4 a) refiere al patrón posible 1.1 en el que se aplicó la regla 3a en la etapa 2 y en la etapa 3. La tabla 4 b) muestra el patrón que se presenta al aplicarse la regla 3b en la etapa 2 y en la etapa 3. La tabla 4 c) muestra el patrón que se presenta al aplicarse la regla 3b en la etapa 2 y la regla 3a en la etapa 3.

a)

| Etapa | Patrón posible 1.1                   |
|-------|--------------------------------------|
| 0     | X                                    |
| 1     | F[A]FY                               |
| 2     | F[X]FF[B]FX                          |
| 3     | F[F[A]FY]FF[Y]FF[A]FY                |
| 4     | F[F[X]FF[B]FX]FF[F[B]FC]FF[X]FF[B]FX |

b)

| Etapa | Patrón posible 2.1         |
|-------|----------------------------|
| 0     | X                          |
| 1     | F[A]FY                     |
| 2     | F[F]FF[B]FX                |
| 3     | F[F]FF[Y]FF[A]FY           |
| 4     | F[F]FF[F[B]FX]FF[X]FF[B]FX |

c)

| Etapa | Patrón posible 2.2         |
|-------|----------------------------|
| 0     | X                          |
| 1     | F[A]FY                     |
| 2     | F[F]FF[B]FX                |
| 3     | F[F]FF[Y]FF[A]FY           |
| 4     | F[F]FF[F[B]FX]FF[F]FF[B]FX |

Tabla 4. Posibles patrones de un sistema-L estocástico.

La introducción de las reglas estocásticas hace que se abra la posibilidad de obtener morfologías distintas incluso partiendo de las mismas condiciones iniciales. Esto refleja que las morfologías producidas por la simulación dependen de las pequeñas variaciones que ocurran durante el proceso y, por tanto, que la morfología final dependa de la "trayectoria" de esas variaciones.

Este caso simple me permite sostener que el proceso simulado por los sistemas-L estocásticos se trata de un proceso dependiente de trayectoria, pues el resultado no sólo depende de las condiciones iniciales, sino también de lo que ocurra durante el proceso. Más aún, la contingencia del desarrollo del sistema es modelada por reglas estocásticas que configuran un sistema-L, las cuales representan

variaciones que se producen en el crecimiento de las plantas. Esto matiza el concepto de dependencia de trayectoria de Desjardins, pues él sólo enfatiza el papel explicativo de eventos contingentes durante un desarrollo histórico, sin dejar claro cómo factores generales podrían jugar un papel explicativo. El matiz que muestro aquí apunta a que la fuerza explicativa viene de una relación retroalimentativa entre eventos aleatorios y reglas incorporadas en los modelos. Esta relación puede entenderse así porque, dado cierto evento, las reglas estocásticas propiciarán que un evento ( $E_1$ ) u otro ( $E_2$ ) ocurra y al mismo tiempo, dependiendo del evento ocurrido, se aplicará una regla (3a) u otra (3b), y así sucesivamente para cada etapa del proceso hasta el fin del crecimiento.

Cabe señalar que, aunque parezca que las reglas (factor general) son las que establecen qué tipo de evento ocurrirá posteriormente (como si la ocurrencia del evento estuviese sustentada por la regla), los sistemas-L estocásticos no apuntan a explicaciones nomotéticas probabilísticas (como el modelo estadístico-inductivo de Hempel, por poner un ejemplo). Esto, porque, aunque las reglas expuestas en la tabla 3 puedan ser asociadas a leyes probabilísticas, éstas se van desplegando durante el proceso, mas no determinan el proceso. Es decir, a una explicación nomotética probabilística le basta establecer las condiciones iniciales y las leyes probabilísticas pertinentes, sin importar lo que ocurra durante el proceso. En cambio, en la explicación que se construye al utilizar modelos computacionales, en particular modelos de sistemas-L estocásticos, el peso epistémico no sólo está en las reglas (asociadas a ciertas leyes), sino también en el ordenamiento particular que se da en cada etapa del proceso.

Con el modelo de sistema-L estocástico que expuse se observa de una manera simple cómo procesos de crecimiento reflejan un carácter dependiente de trayectoria cuando se integran una serie de procesos estables (modelados por reglas deterministas) e inestables (modelados por reglas estocásticas). Esto apunta a que la

coordinación entre procesos estables e inestables queda expresada en el mismo procedimiento que va redirigiendo el proceso de acuerdo con el tipo de regla que se aplica en cada etapa. En ciertas etapas se aplica un tipo de regla (e. g. determinista) en otras otro tipo (e. g. estocástica) sin que haya un conflicto o inconsistencia en su aplicación durante el procedimiento.

Dicho lo anterior, no pretendo afirmar que el científico deba utilizar exclusivamente modelos estocásticos. Al igual que con el estudio de los cristales de nieve, para estudiar el proceso de crecimiento de las plantas no es pertinente decir que hay un modelo mejor que otro, cada uno puede dar formas que se asemejan más a unas especies que a otras. Por ejemplo, un cierto tipo de parametrización del sistema-L puede arrojar morfologías que se asemejan más a arbustos y otro tipo de parametrización produce simulaciones similares a los árboles (figura 11).

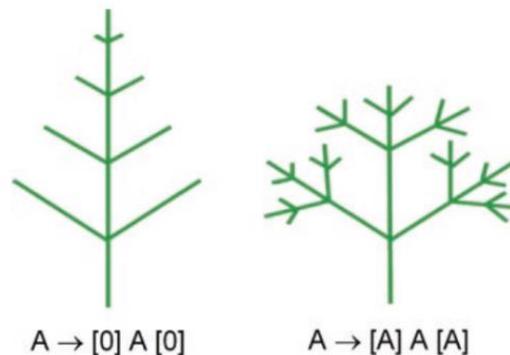


Figura 11. Diferencias en las formas de crecimiento producidos por dos modelos distintos de sistema-L.<sup>47</sup>

Cada modelo simula y hace ver una manera distinta en la que pueden interactuar los objetos u organismos con su entorno. En el caso de los cristales de nieve, generalmente se consideran factores ambientales como la temperatura y la sobresaturación, pero también hay modelos que estudian cómo campos eléctricos

<sup>47</sup> Imagen obtenida de (Green et al., 2020).

modifican el crecimiento de los cristales de nieve (Libbrecht, 2021, pp. 235-267). En el caso del crecimiento de las plantas, hay modelos que simulan una forma frondosa, la cual podría representar un arbusto en el desierto “barrido por el viento donde su forma ofrece poca resistencia al viento” (Green et al., 2020, p. 32), o bien, modelos que simulan un tipo de forma arbórea, la cual podría representar un árbol que aprovecha las aberturas de luz en un bosque. Esto deja ver que tales procesos de crecimiento no pueden ser capturados en su totalidad por un único modelo, o bien, por un modelo general, pues hay una miríada de condiciones en las que los objetos pueden interactuar con su entorno.

Lo anterior apunta a que el quehacer del científico en estos casos es ir explorando los escenarios posibles que cada modelo reproduce al incorporar diferentes tipos de reglas recursivas (normas), parámetros asociados y estados iniciales para conocer los elementos y procesos involucrados en la formación de estructuras orgánicas como las plantas o estructuras cristalinas como los cristales de nieve. Es gracias a esta exploración que se obtiene un mayor entendimiento de los procesos de crecimiento en cuestión, puesto que, por ejemplo, para el caso de las plantas, “por un lado, los modelos de crecimiento pueden ayudarnos a entender el desempeño de las plantas en diferentes tipos de paisajes. Por otro lado, si podemos identificar las similitudes y diferencias entre especies relacionadas en la organización de crecimiento, entonces eso nos daría un entendimiento más profundo de cómo y por qué surgen las diferencias genéticas, y de los mecanismos involucrados” (p. 34).

La *construcción de escenarios posibles* es un método de análisis contrafáctico propio de los modelos computacionales en el que se hacen preguntas “¿qué pasaría si...?” con las que se busca dilucidar “qué hará el sistema bajo un conjunto de circunstancias particulares” (p. 182). Al ir explorando cada una de las posibilidades de crecimiento guiándose de preguntas contrafácticas, el científico va generando una imagen más robusta de un proceso que no puede capturarse en su totalidad

debido a su alta complejidad. Este método también le permite al científico interactuar constantemente con el sistema con el objetivo de conocer qué resultados se obtienen dadas ciertas acciones que puedan ocurrir durante el proceso. Esto le facilita, si bien no predecir con detalle, tener una *expectativa certera* de lo que pueda ocurrir en diferentes escenarios o circunstancias. Lo que nos recuerda a las *expectativas confiables* que proveen las leyes pragmáticas de Mitchell (consúltese sección 2.3) o, más precisamente, a la credibilidad de la explicación basada en la idea de *robustez de la predicción* de Martínez, es decir, en la convergencia predictiva a la que apuntan el conjunto de simulaciones construidas por normas asociadas a distintos modelos computacionales (sección 2.6).

Dicha exploración también se realiza para entender otros fenómenos complejos como el estudio de los incendios forestales. Estos son notablemente difíciles de predecir, desde su origen (podría ser un rayo, una fogata, etc.) hasta su despliegue depende de diversidad de factores como la dirección del viento, la distribución de objetos inflamables, temperatura, humedad, etc. En este tipo de fenómenos complejos se pueden presentar una infinidad de factores y circunstancias cambiantes donde, como sucede con el caso de las plantas, "un modelo ecológico puede explicar cómo se forma una distribución de plantas [o cómo puede distribuirse el incendio], pero no predecir la distribución exacta [del incendio o] de una especie en un paisaje real" (Green et al., 2020, p. 184). Para entenderlos y, con ello, para intervenir de manera más adecuada no es suficiente con la simulación de una posibilidad de crecimiento, sino que se procede con la simulación de distintas maneras en las que pueden crecer dadas distintas circunstancias y factores.

Es importante mencionar que la exploración de posibilidades de crecimiento, en muchas ocasiones, no se realiza sólo por medio de modelos computacionales, también es posible su exploración utilizando otros sistemas experimentales, como las cámaras de convección para el caso de la formación de los cristales de nieve

(Libbrecht, 2022). Recordemos que en la sección 1.2 vimos que la plausibilidad de la explicación que Libbrecht esgrime se debe en gran medida gracias a la reproducción material de cristales de nieve por medio una cámara de convección. Con este sistema experimental Libbrecht, guiándose de preguntas contrafácticas, interactúa con el proceso de crecimiento al variar las condiciones ambientales (de la cámara) durante todo el proceso. Esto le permite explorar posibilidades materiales y contrastarlas con las posibilidades virtuales de las simulaciones computacionales para así construir la explicación de la formación de los cristales de nieve.

Esto nos muestra que la explicación aquí es construida a partir de una interacción constante con los sistemas experimentales que “hacen crecer” el fenómeno. En esta interacción se van explorando escenarios contrafácticos reales del fenómeno y se van integrando una serie de elementos tanto teóricos como materiales para hacer sentido del fenómeno. Esto conlleva a que la explicación no debe verse simplemente como una construcción lingüística acabada (ya sea como una historia particular o como un argumento sustentado por leyes) sino como un recurso epistémico más complejo en constante crecimiento.

Para finalizar este capítulo valdrá la pena preguntarnos ahora: si la explicación en este contexto tiene que ver con la identificación de los procesos y mecanismos que conforman el proceso de crecimiento, pero también con la exploración de un conjunto de trayectorias de crecimiento (o escenarios posibles) en las que el fenómeno puede crecer, entonces cómo conectar lo anterior para abordar la cuestión sobre el papel epistémico de lo contingente en la explicación de la formación de los cristales de nieve (y en otros fenómenos como la formación de plantas).

Recordemos, por un lado, que el *proceso de crecimiento* es un concepto central de la explicación que debe entenderse en términos de constricciones y

novedades que surgen de la coordinación entre tipos de procesos estables e inestables. El reconocimiento de esta coordinación es la que nos explica cómo y por qué se puede estabilizar el crecimiento de distintas maneras (específicamente en patrones morfológicos para el caso de los cristales de nieve). Por este motivo, considero que el concepto de proceso de crecimiento es central para el análisis del valor epistémico de lo contingente en este contexto.

Por otro lado, dicho proceso no puede capturarse sólo por medio de modelos teóricos, pero sí puede modelarse computacionalmente o visualizarse por medio de sistemas experimentales (e. g. cámaras de convección). Esto implica que para abordar el valor epistémico del proceso de crecimiento se debe aclarar qué tipo de entendimiento arroja el uso de este tipo de herramientas. De entrada, los modelos computacionales permiten simular posibles trayectorias de crecimiento de los cristales de nieve y ayudan a entender la manera en la que la coordinación entre tipos de procesos constriñe el resultado y posibilita la novedad en la formación de los cristales de nieve.

Siguiendo esta idea, en el siguiente y último capítulo, muestro que la identificación del *proceso de crecimiento* en la explicación de la formación de cristales de nieve implica un entendimiento narrativo relacionado con la localización de una morfología realizada dentro de un conjunto de posibles morfologías que pudieron haberse realizado, pero no lo hicieron. Esto me lleva a argumentar que el proceso de crecimiento promueve la configuración de *árboles de posibilidades* (conjunto de posibilidades de crecimiento del fenómeno en cuestión), los cuales pueden ser considerados como un recurso que permite analizar el valor epistémico de los procesos de crecimiento en la explicación.

## Capítulo 4. Árboles de posibilidades y explicaciones narrativas

El objetivo del último capítulo es elucidar el concepto de árbol de posibilidades y mostrar por qué se trata de un recurso epistémico que permite la comprensión de fenómenos complejos reproducibles, como el caso de la formación de los cristales de nieve o la formación de las plantas. Argumento en la sección 4.1 que los árboles de posibilidades de los cristales de nieve (representados en tipos de clasificaciones) tienen valor epistémico en la medida que ejemplifican los patrones morfológicos en los que se puede estabilizar el proceso de crecimiento de los cristales de nieve.

En la segunda sección del capítulo (4.2), relaciono el concepto de árbol de posibilidades con un tipo de entendimiento narrativo (Hawthorn 1991, Beatty 2017, Wise 2017). Su relación me ayuda a mostrar que el tipo de explicación de nuestro caso de estudio es una explicación narrativa cuyo logro epistémico es obtener un entendimiento narrativo basado en una relación dialéctica entre el seguimiento de una trayectoria y el reconocimiento de posibilidades alternativas o, en otras palabras, en la localización de una trayectoria de crecimiento que de hecho ocurrió (lo actual) en su árbol de posibilidades (lo potencial).

### *4.1. El árbol de posibilidades como recurso epistémico*

A lo largo del escrito se recorrió un camino argumentativo con el cual se buscó mostrar que la contingencia juega un papel explicativo fundamental para la comprensión de sistemas complejos, particularmente respecto a la formación de los cristales de nieve. El enfoque hacia el concepto de contingencia en la explicación científica no pretende desplazar el papel explicativo de los factores generales como

las leyes, al contrario, se mostró que factores generales y particulares juegan papeles explicativos irreducibles que se complementan mutuamente para entender el proceso contingente que guía el desarrollo de un sistema complejo. En particular, la dilucidación de este proceso, al que he llamado proceso de crecimiento, y de los factores que lo conforman (mecanismos estables e inestables) es crucial para explicar la formación de los cristales de nieve.

Una explicación que apele simplemente a modelos teóricos no provee una comprensión adecuada porque el proceso de crecimiento tiene un carácter históricamente contingente o, más precisamente, dependiente de trayectoria. Esto quiere decir que la morfología de los cristales no está determinada de antemano por mecanismos que conforman el proceso de crecimiento, más bien los mecanismos (que conforman los procesos de faceteo y ramificación) surgirán y se desplegarán en dependencia del tipo de circunstancias que se vayan presentando durante el proceso<sup>48</sup>. En consecuencia, siempre se generará una morfología distinta en cada ocasión en que comience un proceso de crecimiento. Sin embargo, aunque el proceso propicie una infinidad de soluciones o morfologías resultantes, éstas presentarán ciertos patrones que pueden observarse en muchos cristales de nieve. Este aspecto es lo que ha permitido hacer clasificaciones de tipos de *morfologías posibles* como las de Nakaya (1954) o las de Libbrecht (2006)<sup>49</sup>.

Aunado a ello, al concebir al proceso de crecimiento como un proceso dependiente de trayectoria se deja en claro que la explicación de la formación de un cristal de nieve no sólo requiere expresar la trayectoria de crecimiento en la que se

---

<sup>48</sup> Esta idea sugiere una manera alterativa a la tradicional, incluso incluyendo el llamado "nuevo mecanicismo" (Glennan, 2017), de entender mecanismo y que se relaciona con la TCE de Beatty vista en la sección 2.2, es decir, se sugiere que los mecanismos son consecuencia del desarrollo contingente del fenómeno (y no que el desarrollo del fenómeno sea gobernado por los mecanismos).

<sup>49</sup> Como se mencionó en la sección 1.1, ambos realizaron tablas de clasificación donde se incluyen formas como las dendritas estelares, estrellas simples, platos hexagonales, agujas, estrellas ramificadas, columnas sólidas, por mencionar algunas.

despliega el cristal, sino también un conjunto de trayectorias que pudo haber seguido, pero no lo hizo. Esta explicación se construye en gran medida por la *intervención* en el proceso formativo de la entidad cristalina, ya sea por medio de modelos computacionales o por sistemas experimentales que reproducen y modifican las condiciones propicias para el crecimiento de los cristales de nieve.

La intervención en la reproducción del proceso de crecimiento apunta a un concepto que, como veremos, juega un papel central en la comprensión de la formación de los cristales de nieve, a saber, el concepto de *árbol de posibilidades*. Por este concepto, de manera preliminar, me refiero a la representación del conjunto (susceptible a modificación) de las *posibilidades de desarrollo relevantes* en las que puede crecer un cristal de nieve.

Las clasificaciones de Nakaya y Libbrecht son ejemplos de lo que me refiero por posibilidades de desarrollo relevantes. Éstas no ilustran cada uno de los cristales de nieve observados, sino sólo un número limitado de imágenes y descripciones representativas de patrones morfológicos. Cabe resaltar que las imágenes por sí mismas no tienen un valor explicativo sino hasta que son entendidas como ejemplificaciones de los modos en los que se puede estabilizar el proceso de crecimiento al coordinarse procesos estables (faceteo) e inestables (ramificación)<sup>50</sup>. Esto es lo que hace que dichas clasificaciones sean mejores que una clasificación cualquiera (por ejemplo, de alguien que sólo haya tomado fotos de copos de nieve al azar). Por ello, las imágenes y descripciones de las clasificaciones más que representaciones de cosas o estructuras son *ejemplificaciones*<sup>51</sup> del proceso de

---

<sup>50</sup> El diagrama morfológico de Nakaya deja más clara esta idea. Recordemos que con este diagrama (figura 5b) se observa que el faceteo domina en el crecimiento de cristales de nieve en un rango amplio de temperaturas, pero a baja sobresaturación. Pero la ramificación domina en condiciones de mayor sobresaturación.

<sup>51</sup> Utilizo el término "ejemplificación" como Catherine Elgin (2009; 2011) lo concibe. Esto es, la ejemplificación "refiere a algunas de sus propiedades; las exhibe, las destaca, las muestra, las hace

crecimiento. Otra manera de concebir a este tipo de clasificación es que cada imagen refiere a un *patrón morfológico procesual* que ejemplifica la tendencia de una trayectoria de crecimiento.

No deben verse a los patrones morfológicos procesuales como representaciones de "clases naturales" de los cristales de nieve porque no refieren a estructuras básicas o propiedades intrínsecas de los cristales de nieve. Como hemos visto, para entender una morfología cristalina es insuficiente recurrir a leyes, se requiere dar cuenta de su historia y esta historia es la que refleja el carácter procesual, siempre cambiante, de los patrones morfológicos, tal como sucede con las especies biológicas. Este carácter hace que el valor epistémico de dichas clasificaciones no deba abordarse desde una perspectiva tradicional, centrada en leyes, pues durante el proceso se desplegarán distintos tipos de mecanismos según qué circunstancias o condiciones ambientales se vayan presentando. Lo que propongo es que su valor epistémico debe abordarse en términos de posibilidades de crecimiento constreñidas por la interacción contingente entre procesos (conformados por mecanismos) estables e inestables.

La interacción de dichos procesos, como lo vimos en el capítulo 3, hace que un cristal de nieve pueda crecer en infinidad de formas (hay novedad o emergencia), pero éstas no pueden ser cualesquiera. Las formas en las que pueden hacerlo, aunque emergentes e ilimitadas, están al mismo tiempo constreñidas. De este modo, el valor epistémico de los patrones morfológicos procesuales radica en que representan las constricciones y tendencias en las que se puede estabilizar el crecimiento de los cristales de nieve.

---

manifiestas. La ejemplificación requiere tanto la referencia como la instanciación de las propiedades ejemplificadas" (Elgin, 2011, p. 400).

Teniendo en cuenta lo anterior, el árbol de posibilidades en la explicación de la formación de los cristales de nieve refiere, más precisamente, al conjunto de *patrones morfológicos procesuales* hacia los que el crecimiento de los cristales de nieve tiende a estabilizarse debido a las constricciones y novedades generadas por la interacción entre procesos estables (faceteo) e inestables (ramificación). Así, considero que concebir al árbol de posibilidades de esta manera muestra que se trata de un recurso epistémico cuyo valor radica en que es capaz de capturar globalmente las constricciones y novedades (o factores emergentes) posibilitadas por el proceso de crecimiento en términos de patrones morfológicos procesuales. Más adelante abordaré con mayor detalle esta idea, pero antes valdrá la pena puntualizar dos características del concepto de árbol de posibilidades.

#### *4.1.1. Intervención y dependencia de trayectoria en el árbol de posibilidades*

El concepto de árbol de posibilidades que aquí propongo es similar al concepto de *espacio de posibilidades* como lo conciben Hawthorn (1991) o Wise (2017), como lo muestro más adelante, pero se diferencia del concepto de espacio de posibilidades tal como lo plantea Williamson (2018). Para Williamson el espacio de posibilidades puede concebirse como un espacio fase de un sistema físico, es decir, como “el espacio de sus estados *instantáneos* posibles” (Williamson, 2018, p. 198, cursivas mías). Se trata de un espacio que contempla los estados posibles que un sistema puede tener en un tiempo dado. A diferencia del concepto de árbol de posibilidades que aquí planteo, en el espacio de posibilidades de Williamson la historia no importa o, a lo más, importa sólo como dependencia de las condiciones iniciales, por lo que la carga explicativa se sigue asociando solo a un modelo o un conjunto de modelos teóricos y el papel de lo contingente queda asociado a lo más a las condiciones

iniciales. Esto, pues una vez que se sepan las condiciones iniciales se puede saber con certidumbre el futuro de una trayectoria particular del sistema en cuestión.

La observación anterior resalta dos razones por las que opto por el concepto de *árbol* y no de *espacio*: el énfasis en la *temporalidad histórica* o *historicidad* de las posibilidades y la consecuente constante *modificación* del recurso epistémico. La idea de espacio da a entender que estamos hablando de posibilidades estáticas y dadas de antemano, perdiendo de vista así el carácter procesual y transformativo en el que se ve envuelto el recurso epistémico. Si un modelo teórico fuese suficiente para estudiar y entender, por ejemplo, la formación de los cristales de nieve, la temporalidad no tendría un peso explicativo. Sin embargo, este no es el caso pues para comprender el fenómeno se requiere utilizar modelos computacionales que dan cuenta de las contingencias ocurridas durante el proceso de crecimiento y cámaras de convección con las que se interviene en su proceso de crecimiento. Esto implica que la temporalidad juega un papel explicativo importante.

Asimismo, los modelos computacionales les permiten a los científicos simular virtualmente el proceso de crecimiento modificando parámetros para visualizar las consecuencias de estas modificaciones y así bosquejar distintas posibilidades de crecimiento (y con ello identificar patrones de crecimiento). También otros sistemas experimentales permiten interactuar con el proceso de crecimiento, como la cámara de convección que utiliza Libbrecht con la cual recrea las condiciones ambientales propicias para generar y hacer crecer cristales de nieve, capaz también de modificar las condiciones durante su proceso de crecimiento. De esta intervención, tanto con los modelos computacionales como con la cámara de convección, se van construyendo constantemente, conforme la investigación avanza, trayectorias de crecimiento que serán incorporadas al árbol de posibilidades en cuestión. Esto refleja la susceptibilidad del árbol de posibilidades de ser modificado constantemente,

tratándose así de un recurso *abierto* o, en otras palabras, de un recurso *en crecimiento*.

La idea de temporalidad que busco enfatizar con el concepto "árbol de posibilidades" se relaciona con la noción de dependencia de trayectoria asociada al proceso de crecimiento de los cristales de nieve que se trabajó en la sección 3.3. Recordemos que en la sección 3.2 argumenté que el proceso de crecimiento de los cristales de nieve debe entenderse como un proceso dependiente de trayectoria similar al planteado por Desjardins (2011). Esto es, un proceso en el que el estado final o resultante del crecimiento de un fenómeno depende causalmente tanto del estado inicial como de lo que ocurra durante el proceso. Sin embargo, resalté que la noción de dependencia de Desjardins no aclara cuál es el papel que pueden jugar factores generales en la conformación del proceso. Para aclarar tal cuestión en la sección 3.4 analicé cómo con cierto tipo de modelos computacionales (modelos de sistemas-L) se interrelacionan factores particulares (eventos contingentes) y factores generales (reglas o normas) para simular el proceso de crecimiento.

A partir del análisis de los modelos de sistemas-L, en particular los sistemas-L estocásticos, planteé una manera de entender un proceso dependiente de trayectoria en el que eventos contingentes y normas se interrelacionan para configurar al mismo. Esto, en la medida en que tales modelos incorporan una serie de reglas y parámetros con los que se simula la coordinación entre mecanismos estables e inestables.

Lo interesante de esta manera de entender dependencia de trayectoria es que, aunque la historicidad (o contingencia histórica) del fenómeno simulado se relaciona con procedimientos estocásticos basados en reglas o normas, lleva a una comprensión basada no tanto en la explicitación de las reglas incorporadas al

modelo sino, más bien, en el conjunto de escenarios posibles simulados, es decir, en su árbol de posibilidades.

Es importante remarcar la distinción entre el concepto de árbol de posibilidades y el de espacio de posibilidades de Williamson, porque en muchos estudios sobre sistemas complejos, particularmente sobre sistemas termodinámicos fuera del equilibrio, se ha reconocido la relevancia de dar cuenta de posibilidades de desarrollo para lograr tener una mejor comprensión de tales sistemas, sobre todo respecto al tema de su estabilidad. Sin embargo, el reconocimiento que se le ha dado a las posibilidades de desarrollo comúnmente se ha relacionado con el modo en que Williamson entiende espacio de posibilidades, es decir, con un modo en el que la historicidad no es relevante.

En la siguiente sección muestro por qué, si bien análisis teóricos, como la teoría de bifurcaciones o la teoría del caos (que entran en consonancia con el concepto de espacio de posibilidades de Williamson), pueden dilucidar ciertos aspectos importantes de sistemas termodinámicos fuera del equilibrio, son limitados para dar cuenta de características que juegan un papel relevante en el modo en que se estabilizan. Esta discusión motivará la idea de que el conocimiento logrado por el uso de modelos computacionales u otros sistemas experimentales con los que se construyen árboles de posibilidades apunta a un conocimiento genuinamente narrativo en el que se reconoce la historicidad de los fenómenos. Esta idea se abordará en la última sección del capítulo.

#### *4.1.2. La limitación explicativa de las teorías de sistemas termodinámicos fuera del equilibrio*

Los sistemas termodinámicos fuera del equilibrio son sistemas abiertos que están sujetos a un constante flujo de materia y energía. En dichos sistemas los procesos irreversibles son la regla y presentan un rol dual: "como destructores del orden cerca del equilibrio y como creadores de orden lejos del equilibrio" (Kondepudi & Prigogine, 2015, p. 421). Es decir, los procesos irreversibles hacen que en cuanto el sistema parece llegar a un estado de equilibrio (proceso estable) éste se rompe (pérdida de estabilidad) y empiezan a intervenir fluctuaciones o factores aleatorios (proceso inestable), haciendo que el sistema evolucione de manera "impredicible". En este contexto la impredictibilidad no implica una evolución azarosa, sino que "su estado no puede ser siempre especificado *de manera única* por ecuaciones de tasa macroscópicas" (p. 421, cursivas mías). Se trata de un sistema que puede evolucionar hacia muchos estados posibles dado un conjunto de condiciones específicas y en donde cada estado posible es un "estado ordenado". Por estados ordenados se refiere a estados que presentan patrones con una organización espaciotemporal tales como "patrones en un flujo fluido, inhomogeneidades en concentraciones que exhiben patrones geométricos con gran simetría o variaciones periódicas de concentraciones" (p. 421).

La formación de los cristales de nieve puede considerarse como un sistema termodinámico fuera del equilibrio cuyo proceso de crecimiento es un proceso irreversible. Esto, pues el cristal de nieve está constantemente incorporando materia (moléculas de agua) del entorno en un proceso de crecimiento conformado por una serie de mecanismos estables (representados en el proceso de faceteo) que propician que la semilla de nieve tienda hacia cierto estado de equilibrio, pero una vez que llega a éste entran en juego procesos inestables (representados por el

proceso de ramificación) desestabilizando el crecimiento y propiciando una evolución "impredecible" o múltiple del sistema. De este modo, se podría sugerir que dicho fenómeno debe analizarse y explicarse utilizando teorías de sistemas termodinámicos fuera del equilibrio, como la teoría de bifurcaciones o la teoría del caos. No obstante, como se mostrará, si bien pueden ser útiles para explicar algunos aspectos del fenómeno, son inadecuadas para entenderlo globalmente.

El comportamiento "impredecible" de los sistemas termodinámicos fuera de equilibrio ha sido estudiado por medio del análisis de ecuaciones diferenciales no lineales<sup>52</sup>. De este análisis se pueden determinar aquellas condiciones en las que el sistema es estable, así como aquellas en las que pierde esta estabilidad y a partir de las cuales se despliegan múltiples soluciones. Este punto de quiebre entre estabilidad e inestabilidad es lo que se llama el fenómeno de "bifurcación" o "ramificación". Para ilustrar este fenómeno consideremos la siguiente ecuación:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\alpha^3 + \lambda\alpha \quad (1)$$

Lo que se busca con esta ecuación es estudiar las *soluciones estacionarias* como función del parámetro  $\lambda$ . Pero lo interesante aquí no sólo es determinar las soluciones posibles del sistema sino también los valores de los parámetros en los que el sistema es estable y los valores en los que es inestable. Ahora bien, los estados estacionarios de esta ecuación diferencial son  $\alpha=0$  y  $\alpha=\pm\sqrt{\lambda}$ , y como queremos que esta ecuación represente un sistema físico consideraremos sólo las soluciones reales. En este caso para valores  $\lambda<0$  tenemos una única solución real, pero para valores  $\lambda>0$  tenemos tres soluciones (Figura 13).

---

<sup>52</sup> A diferencia del análisis de ecuaciones diferenciales lineales donde principalmente se busca encontrar soluciones únicas a un sistema de ecuaciones, con las ecuaciones diferenciales no lineales, al tener múltiples soluciones en la mayoría de los casos, se busca analizar cualitativamente cómo se comporta el sistema de ecuaciones, generalmente, en un plano fase.

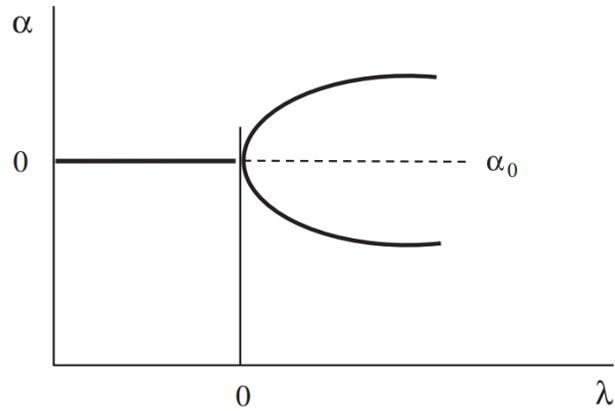


Figura 13. Diagrama de bifurcación de las soluciones estacionarias a la ecuación (1) como función del parámetro  $\lambda$ . La línea punteada representa una solución inestable.<sup>53</sup>

Notemos que en el intervalo donde se tiene una única solución ( $\lambda < 0$ ) el sistema se comporta de manera estable, por lo que estamos hablando de un estado estacionario. Esta estabilidad se mantiene hasta el punto  $\lambda = 0$ , pero a partir de ahí las soluciones se bifurcan, llevando a la pérdida de estabilidad. Por esta razón al punto  $\lambda = 0$  se le llama *punto de bifurcación*. Lo que indica este punto es que ahí el sistema dejará de tener una evolución determinada (única) y hará una transición a alguno de múltiples estados posibles. En este caso, a partir del punto donde se rompe la estabilidad (en  $\alpha = 0$  y  $\lambda = 0$ ) será susceptible a que las fluctuaciones aleatorias lleven a que el sistema haga una transición a uno de los dos nuevos estados posibles ( $\alpha = +\sqrt{\lambda}$  o  $\alpha = -\sqrt{\lambda}$ ). Así, la solución o el nuevo estado al que evolucionará el sistema dependerá de fluctuaciones aleatorias del mismo sistema.

La teoría de bifurcaciones ha sido una herramienta con la que se ha buscado entender cómo y por qué se da el juego entre la estabilidad y la inestabilidad de sistemas fuera del equilibrio y, en nuestro contexto de discusión, podría resultar pertinente para dar una mayor claridad a la relación entre estabilidad e inestabilidad

<sup>53</sup> Imagen obtenida de (Kondepudi & Prigogine, 2015).

del proceso de crecimiento de los cristales de nieve. Por ejemplo, si observamos el diagrama de Nakaya (figura 5b) podemos ver que los tipos de morfología en los que pueden crecer los cristales de nieve se relacionan con ciertos valores de sobresaturación y temperatura. De manera somera, podríamos decir que el crecimiento es estable (el proceso de faceteo domina) a valores de sobresaturación y temperatura debajo de la línea de la saturación del agua (*water saturation*), marcada en el diagrama de la figura 5b, e inestable (el proceso de ramificación domina) a valores superiores de tal línea.

Sin embargo, esta afirmación es muy general y vaga, además de que claramente estamos relacionando no sólo parámetros asociados a variables físicas (e. g. temperatura y sobresaturación), sino también tipos de morfologías que, como he mostrado, se asocian a un ordenamiento temporal de eventos o procesos. A lo más la teoría de bifurcaciones ayudaría a dar cuenta localmente de "*constreñimientos* – e. g. tasas de flujo o concentraciones mantenidas en un valor de no-equilibrio – que mantienen al sistema alejado del equilibrio" (Kondepudi & Prigogine, 2015, p. 423, cursivas mías), pero no nos proveería un conocimiento respecto a cómo se desarrolla temporalmente la coordinación entre procesos estables e inestables durante el crecimiento del cristal de nieve.

Ahora bien, a pesar de que en la teoría de bifurcaciones el desarrollo temporal no sea relevante en el análisis, tal teoría se ha asociado a otras teorías de sistemas termodinámicos fuera de equilibrio en las que sí se considera. Ilya Prigogine, quien ha sido uno de los principales contribuyentes en los análisis de sistemas termodinámicos fuera del equilibrio, afirma que "*en cierto sentido, la bifurcación introduce historia* a la física y a la química, un elemento que previamente parece haber sido reservado para ciencias que tienen que ver con la biología, lo social y los fenómenos culturales" (Prigogine, 1981, p. 106, cursivas mías). Con dicha afirmación parece ser que Prigogine tiene una intuición de que la historia (o, mejor, la

contingencia histórica) juega un papel importante. Una problemática con su aseveración es qué entiende por "historia", porque sus aportaciones teóricas con las que intenta capturar el carácter contingente de sistemas fuera del equilibrio han llevado a desarrollar teorías como la teoría del caos o la de procesos estocásticos. Teorías donde la contingencia histórica, como veremos, no es relevante.

Por un lado, aunque en la teoría del caos se contemple el desarrollo temporal de un sistema dinámico, el tiempo sigue siendo una variable independiente y el caos (que podríamos entender como una forma de contingencia) se concibe de manera determinista. La teoría del caos permite comprender la "impredictibilidad" del sistema, pero se asocia a la sensibilidad a las condiciones iniciales y no a lo que pueda ocurrir durante el proceso. Podríamos hablar aquí de una contingencia histórica dependiente de condiciones iniciales, pero no una dependiente de trayectoria. Por lo que, suponiendo que se sepa con certeza la condición inicial del sistema (aunque en la práctica esto no sea posible para sistemas caóticos), se sabrá su comportamiento para cualquier tiempo posterior. El caos determinista apunta a una dirección distinta a la que planteo con la idea de dependencia de trayectoria en la que la impredictibilidad del sistema no tiene tanto que ver con la sensibilidad del sistema a las condiciones iniciales, sino a la sensibilidad en torno a las condiciones y eventos que se van dando y transformando durante todo el proceso de crecimiento.

Por otro lado, en el enfoque de procesos estocásticos, aunque sí se busca entender procesos en los que eventos azarosos o aleatorios constituyen a los mismos (en contraste con el caos determinista), estos generalmente se conciben como procesos de Markov cuya característica principal es la propiedad de Markov. Tal propiedad básicamente refiere a que "la distribución de probabilidad del estado del proceso al tiempo futuro  $n+1$  depende únicamente del estado del proceso al tiempo  $n$ , y no depende de los estados en los tiempos pasados  $0, 1, 2, \dots, n-1$ " (Rincón, 2012, p. 28). En otras palabras, la historia del proceso no es relevante para

conocer la probabilidad de cambio entre estados temporalmente adyacentes, lo que implica que los cambios (o evolución) del proceso son independientes de su historia. Así, al igual que con la teoría de bifurcaciones, esta teoría podría dilucidar aspectos locales del proceso de crecimiento, pero no una comprensión global de éste.

Los estudios que utilizan estas teorías o métodos matemáticos son eficaces para abordar una diversidad de sistemas complejos, pero no pueden dar cuenta de fenómenos dependientes de trayectoria como el caso de la formación de los cristales de nieve. De hecho, el estudio del crecimiento de cristales de nieve no apunta a una teoría que explique el fenómeno, sino a múltiples modelos que explican aspectos específicos del proceso, unos enfocados a su estabilidad, otros a su inestabilidad y su transición entre estados. Incluso se ha llegado a reconocer que hay distintos tipos de mecanismos que propician distintos tipos de estabilidad (e. g. cinética de acoplamiento de nucleación-limitada o la nucleación explanar (*terrace nucleation*)) y distintos tipos de inestabilidades (e. g. inestabilidad de Mullins -Sekerka o inestabilidad de afilado de bordes (*edge-sharpening*)) que pueden aparecer durante el proceso de crecimiento (Libbrecht, 2022). Todos estos aspectos deben contemplarse para entender el fenómeno del crecimiento de los cristales de nieve, por consiguiente, una teoría o modelo general simplemente no sería capaz de capturar la complejidad de este tipo de fenómenos.

Como veremos más adelante, entender ese tipo de complejidad requiere de articular una narrativa que integra todos estos recursos y herramientas epistémicas utilizados para investigar y explicar el fenómeno. Esta integración lleva, además, a reconocer la importancia de dar cuenta tanto de la trayectoria particular del cristal de nieve que de hecho ocurrió como de sus trayectorias posibles.

### 4.1.3. Hacia el concepto de árbol de posibilidades en el análisis de sistemas termodinámicos fuera del equilibrio

La afirmación de Prigogine "la bifurcación introduce historia a la física y a la química", no debe entenderse sólo a partir de análisis teóricos, sino considerando también los análisis provenientes del uso de modelos computacionales. Estos análisis apuntan a un tratamiento de sistemas complejos análogo al que aquí propongo respecto a la formación de los cristales de nieve. Este tratamiento se aprecia en el ejemplo que aborda Prigogine (1981) respecto a cómo evoluciona un sistema urbanizado en función de su economía (tomado de P. M. Allen y colaboradores (1977)). Este caso es analizado utilizando como punto de partida la siguiente ecuación:

$$\frac{dX}{dt} = KN(N - X) - dX \quad (2)$$

Tal ecuación es utilizada para describir el crecimiento de una población  $X$  en un entorno dado. Donde  $K$  se relaciona con la tasa de nacimiento,  $d$  con la tasa de mortandad y  $N$  con una medida de la capacidad del entorno para mantener la población. La solución de la ecuación puede ser expresada como una *ecuación logística* por lo que la evolución del sistema es determinista.

Ahora bien, para el caso de la evolución de un sistema urbanizado se utiliza como base la ecuación (2) pero se le agrega una *función económica*  $k$  al punto  $i$  (que representar una "ciudad")  $S_i^k$ :

$$\frac{dX_i}{dt} = KX_i \left( N + \sum_k R^k S_i^k - X_i \right) - dX_i \quad (3)$$

Donde  $R^k$  es un coeficiente de proporcionalidad. En este caso, la función económica actuará como si fuese una *fluctuación del sistema* ya que "destruirá la uniformidad inicial de la distribución de población al crear oportunidades de empleo que concentran a la población en un punto" (Prigogine, 1981, p. 125). Esta función hace

que la ecuación (3) requiera ser resuelta por medio de modelos computacionales, pues estos permiten resolverla utilizando variables aleatorias. Debido al comportamiento estocástico que propicia la función económica se obtendrán infinidad de soluciones. Una de ellas es la que se muestra en la figura 13, la cual “representa una *historia posible* para tal sistema y que corresponde a una secuencia particular de eventos estocásticos” (Allen, 1980, p. 171, cursivas mías).

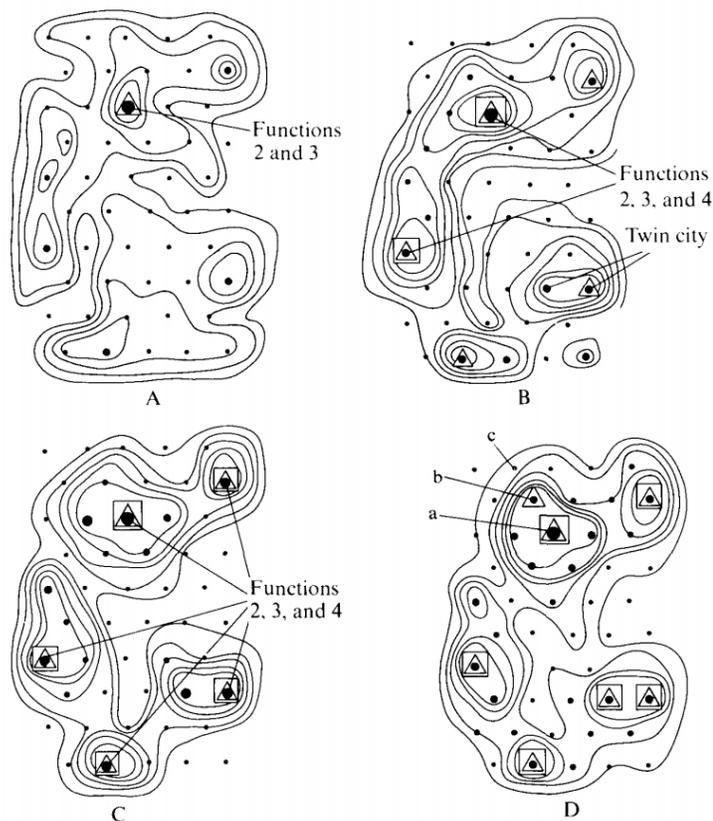


Figura 13. Una historia posible de urbanización de una región inicialmente uniforme.<sup>54</sup>

Cabe resaltar que, si bien esta solución o “historia posible” por sí sola ilumina ciertas características del proceso de urbanización, para obtener una mayor comprensión

<sup>54</sup> Imagen obtenida de Prigogine (1981).

de su dinámica es imprescindible simular otras historias posibles para contrastarlas unas con otras. Prigogine no enfatiza esta observación, pero nota que de la contrastación entre diferentes historias se pueden identificar ciertas propiedades estructurales que se conservan entre ellas. "Por ejemplo, el número y la separación promedio de grandes centros son aproximadamente los mismos para sistemas que tienen los mismos valores de los parámetros, aunque experimenten diferentes historias" (Prigogine, 1981, p. 126). Esto arrojará un conocimiento que no se vislumbra con el análisis de una sola historia o solución.

Con el ejemplo, Prigogine parece sugerir una manera de entender el fenómeno de la evolución de un sistema urbanizado semejante a la manera aquí explorada respecto a la formación de los cristales de nieve, en la que hay un reconocimiento de la historia que apunta al concepto de árbol de posibilidades. Claramente, este reconocimiento surge cuando considera el uso de modelos computacionales con los que se simulan diversas trayectorias o "historias posibles" y no simplemente por los análisis matemáticos de ecuaciones diferenciales no lineales o por teorías. El uso de modelos computacionales da otro sentido al análisis de ecuaciones diferenciales no lineales y con los que se observa que "el resultado final [de la historia posible] depende de una interacción de leyes económicas deterministas y de una sucesión probabilista de fluctuaciones" (Prigogine, 1981, p. 126). Esta afirmación apunta a una idea similar a la planteada en el presente escrito, a saber, que el proceso de crecimiento o desarrollo de ciertos tipos de sistemas complejos es guiado por una interacción entre distintos tipos de mecanismos estables ("deterministas") e inestables ("probabilistas").

Lo anterior no nos remite al concepto de espacio de posibilidades de Williamson, sino al de árbol de posibilidades aquí planteado. Esto es, a un concepto considerado como un recurso epistémico en constante transformación y que apunta a un carácter dependiente de trayectoria (asociado a la coordinación entre procesos

estables e inestables) del proceso de crecimiento o desarrollo de ciertos sistemas complejos. Este recurso nos permite dar cuenta de su carácter dependiente de trayectoria al mostrar el conjunto de posibilidades en las que puede desarrollarse. Además, nos provee un conocimiento que no es posible obtener por medio de métodos matemáticos analíticos (asociados a explicaciones nomotéticas). Un conocimiento que surge de la contrastación entre las distintas trayectorias de crecimiento que conforman el árbol de posibilidades y que, como veremos en la siguiente sección, conlleva a un entendimiento narrativo.

#### *4.2. Explicación y entendimiento narrativo*

He mostrado que el concepto de árbol de posibilidades es un recurso epistémico cuyo valor radica en que es capaz de capturar globalmente constricciones y factores emergentes posibilitados por procesos de crecimiento en términos de patrones morfológicos procesuales. Específicamente, el árbol de posibilidades expresado en las clasificaciones de Nakaya y Libbrecht forma parte de la explicación de la formación de cualquier cristal de nieve observado en la naturaleza, ya que para entender por qué creció de la manera en la que lo hizo éste tiene que ser contrastado con los otros posibles patrones morfológicos hacia los que pudo haber crecido, pero no lo hizo. La contrastación de un resultado morfológico particular en su árbol de posibilidades permite identificar las constricciones, tendencias y factores emergentes que lo llevaron a su acaecimiento a la luz de las trayectorias de crecimiento que pudieron haber ocurrido, pero no lo hicieron.

Esta contrastación también se hace para entender la evolución de un sistema urbanizado en función de su economía, ejemplo mencionado en la sección anterior, y la formación de plantas en un contexto ecológico, abordado en la sección 3.4. Para el primer caso, gracias a la contrastación entre "historias posibles" se identifican

propiedades estructurales (constricciones), pero también variaciones que pueden ocurrir en el desarrollo (factores emergentes). Para el segundo caso, la contrastación lleva, igualmente, a identificar patrones de crecimiento de las plantas en distintos ambientes y “detalles” morfológicos propios de cada especie.

El entendimiento que se logra al contrastar, o bien, como el historiador Geoffrey Hawthorn (1991) expresa, al “localizar” un resultado histórico (o, en nuestro caso, una trayectoria de crecimiento) dentro de un conjunto de posibilidades de desarrollo relevantes apunta a una forma de *entendimiento narrativo*. Para Hawthorn (1991) lo que caracteriza a una explicación histórica es que el entendimiento generado por ella se logra al *localizar* lo actual (i. e. la historia que de hecho ocurrió) en un “espacio de posibles”. Por el “espacio de posibles” Hawthorn se refiere a los contrafactuales que sugiere la historia que de hecho ocurrió. Esto implica que la explicación histórica se relaciona con una forma de entendimiento donde es indispensable mostrar o, al menos, sugerir las posibilidades que pudieron haber ocurrido, pero no lo hicieron y cuya referencia a ellas es lo que le da plausibilidad a la misma explicación.

Como lo expuse en la sección 2.4, en la literatura es común considerar a las explicaciones históricas como una forma de narrativa, en la que lo explicativo radica en la conexión de una serie de eventos contingentes que llevan al acaecimiento de un evento particular y cuya estructura, generalmente, se concibe como una estructura lingüística con un inicio, un proceso transformativo y un final. Sin embargo, para Hawthorn el valor epistémico de la narrativa no proviene sólo de la manera en la que se *ordenan* o *conectan* una serie de eventos contingentes (lo que da lugar a una historia), sino también de los *contrafactuales* que sugiere. Por consiguiente, aquí estamos hablando de una noción de narrativa más amplia que incorpora tanto el ordenamiento de elementos particulares (la historia) como los contrafactuales que sugiere la historia. Dicha noción de narrativa, entonces, lleva a

cuestionarse en qué sentido los contrafactuales les dan valor epistémico o, en otras palabras, hacen significativas a las narrativas.

Un planteamiento que responde la pregunta anterior es el de Beatty (2016; 2017) quien argumenta que lo que hace significativo a las narrativas no sólo es que expresan lo que de hecho sucedió, sino que también refieren a historias posibles que pudieron haber sucedido. Para responderla Beatty utiliza un diagrama de árbol de ramificación (figura 14) con el cual ilustra cómo eventos que no sucedieron (historias posibles múltiples), pero pudieron haberlo hecho, están conectados con los eventos que de hecho ocurrieron (historia actual).

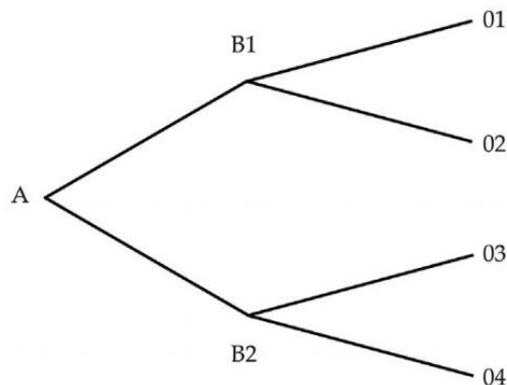


Figura 14. Diagrama de árbol de ramificación.<sup>55</sup>

El diagrama refiere a un tipo de estructura narrativa en tanto que tiene un principio, un proceso transformativo y un final. El evento A a partir del cual comienza la historia toma una trayectoria posible que puede pasar por una serie de eventos significativos (B1 o B2) hasta un resultado (O1, O2, O3 u O4). Este diagrama representa de manera simplificada las posibles trayectorias que un fenómeno contingentemente histórico pudo haber tenido y de las cuales sólo una se realizó (e. g. la trayectoria A-B1-O1). Cada una de estas trayectorias es contingentemente histórica si es constituida por eventos significativos que Beatty llama puntos de inflexión (*turning points*), pero que

---

<sup>55</sup> Imagen tomada de (Betty, 2017).

también podríamos llamar puntos de bifurcación (en este diagrama sería los puntos: A, B1 y B2). Estos puntos bifurcan la historia, es decir, son generadores de posibilidades porque presentan las dos características de la contingencia histórica: impredecibilidad (contingencia *per se*) y dependencia causal (contingencia *respecto a*).

Recordemos que, en la sección 3.2, estas dos características las asocié al concepto de dependencia de trayectoria de Desjardins en tanto que la probabilidad de un resultado depende tanto de la trayectoria histórica tomada (contingencia *respecto a*) como de las otras posibles trayectorias que pudieron haber ocurrido (contingencia *per se*). Además, los diagramas que utilizan ambos autores son idénticos en tanto que representan la misma estructura, la única diferencia es que Desjardins asocia una función de probabilidad a cada evento significativo (punto de inflexión) con la cual es posible dilucidar formalmente por qué una trayectoria se realizó y no otra, a la luz de sus otras posibilidades. Estas funciones de probabilidad le permiten mostrar a Desjardins cómo y por qué las trayectorias posibles no realizadas ayudan a dar cuenta del hecho a explicar, pues el valor que se les asocia a las funciones de probabilidad de cada evento de la trayectoria histórica depende tanto de la misma trayectoria como de las otras que no se realizaron. En todo caso, ambas perspectivas apuntan a que la explicación de cómo y por qué se dio un resultado depende de las posibilidades alternativas o trayectorias posibles que pudieron haberse realizado, pero no lo hicieron; explicación asociada a un entendimiento narrativo en el que "las narrativas hacen un uso productivo de tales posibilidades reales (muy reales) aunque no realizadas" (Beatty, 2017, p. 31).

La noción de dependencia de trayectoria de Desjardins ayuda a esclarecer por qué las posibilidades no realizadas, y no sólo la historia realizada, le dan valor explicativo a la narrativa. Sin embargo, vale la pena exponer un ejemplo, el caso de

la evolución de las orquídeas, abordado por Beatty (2016) para aclarar más esta cuestión.

La mayoría de las orquídeas tiene el pétalo "labellum" en la parte más baja del tallo –aunque al inicio de su crecimiento está en la parte más alta y durante su crecimiento gira hasta colocarse en la parte más baja– y sirve como una plataforma en la cual los insectos pueden aterrizar para comenzar la recolección de polen. Pero en el caso de la *Malaxis Paludosa* el labellum lo sigue teniendo en la parte más alta aún en su etapa adulta. Lo interesante es saber que en el proceso de crecimiento las otras especies de orquídea giran 180 grados a la derecha (podemos referir a este hecho como el punto B1 del diagrama de la figura 14) hasta que el labellum alcanza la parte más baja (O1), en contraste, la *Malaxis Paludosa* gira 180 grados a la izquierda (B2) lo que le permite seguir girando hasta los 360 grados y así hacer que el labellum regrese a la parte más alta (O4).

Ahora bien, recordemos que un punto de bifurcación en la trayectoria histórica de su evolución sería aquel en el que tiene dos posibilidades de desarrollo, en este caso una posibilidad es girar 180 grados a la izquierda (B2), la otra posibilidad es girar 180 grados a la derecha (B1). Cada una de estas posibilidades lleva a trayectorias históricas distintas y, por tanto, a resultados distintos (e. g. a O4 para la primera posibilidad y a O1 para la segunda). Esto es, en algún momento del desarrollo evolutivo de la especie "orquídea" se tuvo la posibilidad de evolucionar de distinta manera dependiendo hacia donde haya girado inicialmente en su evolución: si giró a la izquierda entonces le permitió seguir girando hasta los 360 grados donde el labellum quedó en la parte más alta (llevando a la subespecie *Malaxis Paludosa*); si giró a la derecha sólo le permitió girar hasta los 180 grados dejando al labellum en la parte más baja (llevando a la mayoría de las subespecies de orquídeas).

Este ejemplo ilustra dos trayectorias históricas posibles conformadas por puntos de bifurcación (i. e. dos contrafactuales) para entender el proceso evolutivo de una especie y con las que se muestra que el proceso evolutivo de cada especie de orquídea se comprende de mejor manera si se contrasta con la otra posibilidad que pudo haber sido. Si no se apelara a sus trayectorias históricas posibles, es decir, si sólo se expresara la trayectoria que de hecho ocurrió, sólo estaríamos hablando de una descripción particular de su desarrollo evolutivo que bien podría ser correcta o no. Contemplar sus trayectorias históricas posibles es lo que “hace sentido del resultado [la evolución de las orquídeas] en términos de eventos anteriores [como el giro a la izquierda o a la derecha] que bien podrían no haber ocurrido” (Beatty, 2017, p. 33). Esto permite contrastar la trayectoria histórica actual con otras opciones de desarrollo y ver si es verosímil en relación con ellas.

Las trayectorias históricas posibles a las que refiere Beatty están conformadas por eventos contingentes (puntos de bifurcación) que “deben hacer una diferencia al resultado” (p. 36). Es decir, eventos que si no hubiesen ocurrido de la manera en que lo hicieron, entonces otros alternativos hubieran tomado su lugar y hubieran llevado a un resultado distinto. Estos eventos como puntos de bifurcación no sólo abren posibilidades, también dirigen y dan sentido al siguiente evento que es contingente respecto a éste. De ahí la idea de que “hacen una diferencia” al resultado y lo que lleva a Beatty a plantear el concepto de *contrafactual histórico*. Concepto que utiliza para argumentar que las posibilidades no actualizadas más que funcionar como criterio para las narrativas *per se*, contribuyen a la validez de la narrativa como un medio genuinamente explicativo.

Con relación a lo anterior, el concepto de *contrafactual histórico* apunta a explicaciones narrativas que pueden concebirse como “una forma de explicación contrafactual que-hace-diferencias (*counterfactual, difference-making explanation*)” (Beatty, 2017, p. 31). Nombrar a las explicaciones narrativas como explicaciones

contrafactuales en el sentido que "hacen-diferencias" se relaciona con una amplia literatura en filosofía de la ciencia donde al apelar a contrafactuales se busca dilucidar una forma de razonamiento que permite el análisis de explicaciones causales. Sin embargo, a diferencia del concepto de contrafactual que tradicionalmente se ha considerado<sup>56</sup>, los contrafactuales históricos refieren a alternativas que "no son meramente posibilidades-no-cumplidas lógicas o físicas, sino alternativas posibles *narrativa* o *históricamente* más restringidas" (Beatty, 2017, p. 40). Esto es, la forma de contrafactual que Beatty asocia a las explicaciones narrativas no sólo refiere a que las alternativas posibles están restringidas lógicamente y físicamente, sino que también lo están por trayectorias históricas que *realmente* pudieron ocurrir.

Más precisamente, lo que propone Beatty es que "la narrativa A-B1-O2 *explica* O2 en el contexto de ramas circundantes. Tal narrativa es una explicación *causal* en el sentido que remarca los *eventos contrafactuales que-hacen-diferencia*" (Beatty, 2017, p. 32), la cual debe satisfacer dos condiciones. La primera es que si un evento contrafactual (representado como punto de bifurcación en el diagrama de árbol de ramificación y considerado como una causa), digamos B1, no ocurriese, entonces se haría una diferencia contrafactual respecto al resultado (O2), es decir, de no haber ocurrido B1 en su lugar habría ocurrido otro resultado (O3 u O4). La segunda condición es que las alternativas contrafactuales deben ser históricas o narrativamente posibles, es decir, situaciones que de hecho pueden ocurrir dado un contexto y un evento inicial A. En el caso de la evolución del labellum de las orquídeas, por ejemplo, ambas condiciones se satisfacen. La primera porque si no hubiera ocurrido B1 (giro de 180 grados a la derecha) habría ocurrido B2 (giro de

---

<sup>56</sup> Concepto de contrafactual en el que sólo sirve para analizar qué tan diferentes hubieran sido las cosas dadas *otras* circunstancias considerando preguntas tipo "¿y-si-las-cosas-hubieran-sido-diferentes?", e. g. como lo aborda (Woodward, 2003). En contraste, en el caso de los contrafactuales históricos se analiza qué tan diferentes hubieran sido las cosas dadas *las mismas* circunstancias.

180 a la izquierda), llevando a la evolución de una subespecie distinta. La segunda porque ambas posibilidades se han presentado en la naturaleza (la especie *Malaxis Paludosa* con el *labellum* en la parte más alta y otras subespecies de orquídeas con el *labellum* en la parte más baja). Por lo que su explicación puede considerarse como una explicación causal en el sentido que Beatty le da.

La idea de contrafactual histórico de Beatty aclara el planteamiento de Hawthorn respecto a que lo que hace significativas a las narrativas, o lo que les da valor epistémico, son los contrafactuales que sugiere. Asimismo, el contrafactual histórico también puede entenderse en términos de las posibilidades que conforman un proceso dependiente de trayectoria. Tanto el contrafactual histórico de Beatty como la dependencia de trayectoria de Desjardins apuntan a que eventos que no sucedieron (historias posibles múltiples o contrafactuales históricos), pero pudieron haber ocurrido, están *conectados* con los eventos que de hecho ocurrieron (con la historia actual). En ambas nociones el valor epistémico está relacionado con la alusión, explícita o implícitamente, a posibilidades no realizadas. En este sentido, es más claro ver que la relación entre lo *actual* (la trayectoria histórica que de hecho ocurrió para que se diera un resultado) y lo *potencial* (las posibles trayectorias históricas que pudieron haber ocurrido, pero no lo hicieron) es lo que hace a una narrativa un medio explicativo y no sólo uno descriptivo.

Dicho lo anterior, la noción de dependencia de trayectoria que he trabajado en este escrito se relaciona con la explicación narrativa a la que apuntan Hawthorn y Beatty. Esto es, a una explicación narrativa asociada a un entendimiento que se logra al localizar lo "actual" en su "espacio de posibles", o mejor, en su árbol de posibilidades. Sin embargo, el argumento que aquí expuse considera a la noción de dependencia de trayectoria de Desjardins, pero como lo mostré, la noción de dependencia de trayectoria que propongo en este escrito se diferencia en tanto que enfatiza el papel tanto de factores particulares como de factores generales. En la

siguiente sección, me apoyaré en la propuesta de Wise para mostrar que el patrón explicativo de fenómenos complejos reproducibles por medio de sistemas experimentales (particularmente, por modelos computacionales), como la formación de los cristales de nieve, la formación de plantas o la evolución de un sistema urbanizado, se trata de una explicación narrativa asociada a la idea de dependencia de trayectoria trabajada en este escrito.

#### *4.2.1. El árbol de posibilidades en la comprensión de fenómenos complejos reproducibles*

Los modos de comprender fenómenos han dado un giro en las ciencias contemporáneas, sobre todo por la implementación de sistemas tecnológicos novedosos. Uno de ellos, que actualmente se utiliza ampliamente, son las computadoras. Con estos sistemas es posible implementar modelos que permiten manejar una cantidad ingente de datos y variables que con anterioridad no era posible. Esto ha abierto nuevos campos de estudio focalizados en la comprensión de sistemas dinámicos complejos. En estos campos de estudio muchos de los modelos computacionales utilizados logran la estabilización de los fenómenos, pero, como lo vimos en la sección 3.4, no en el mismo modo en que los modelos analíticos lo hacen. Es decir, no se busca construir ecuaciones con soluciones únicas, situación que lleva a la idea de que hay leyes o principios que gobiernan el comportamiento de los fenómenos de manera única (una sola trayectoria lleva inexorablemente a un mismo resultado). Aquí la estabilización tiene que ver más bien con la capacidad de simular las trayectorias posibles de desarrollo que un fenómeno puede tener, pero dentro de un rango delimitado por constricciones y tendencias de desarrollo.

La simulación de trayectorias posibles de desarrollo o, de acuerdo con el tipo de casos que he abordado en este escrito, trayectorias posibles de crecimiento

claramente apunta a la idea de contrafactual histórico. Esto sugiere que el tipo de explicación que se construye con el uso de modelos computacionales se trata de una explicación narrativa similar a la planteada por Hawthorn y Beatty. Por lo que se diferencia de otras maneras de entender narrativa en las ciencias naturales históricas, como la planteada por Richards (véase sección 2.4) o, incluso, como la entienden Currie y Sterelny (véase sección 2.5).

Recordemos que para Currie y Sterelny las narrativas y los modelos teóricos son dos recursos epistémicos complementarios pero con funciones diferenciadas, ya que, para ellos, las primeras se enfocan en dar cuenta de la complejidad de un fenómeno al integrar factores particulares (e. g. eventos o variedad de elementos que conforman un contexto) en una secuencia causal y los segundos se enfocan en dar cuenta de regularidades o constricciones que guían el comportamiento del fenómeno, esto al incorporar factores generales (e. g. leyes). En contraste, en el contexto de los casos explorados en el presente escrito los modelos (computacionales) y las narrativas, más bien, están interrelacionados en tanto que los primeros reflejan un saber narrativo al integrar una serie de factores particulares y generales, propiciando un entendimiento narrativo asociado a la relación entre lo potencial y lo actual.

Esta idea es apoyada por Norton Wise (2017) quien muestra que un entendimiento narrativo asociado a la localización entre lo actual y lo potencial no sólo es pertinente asociarlo a explicaciones de fenómenos históricos únicos, como los casos históricos abordados por Hawthorn, también puede ser asociado a explicaciones de fenómenos complejos reproducibles por modelos computacionales. Para mostrar esta idea Wise analiza cómo se ha construido la explicación de la reacción química de Diels-Alder.

La reacción de Diels-Alder es una reacción estudiada en la química orgánica, la cual refiere a la formación de dos enlaces de carbono que producen un anillo de seis miembros a partir de dos reactantes. El interés de los científicos en esta reacción no sólo tiene que ver con su uso sino también con saber cuál es el *mecanismo* de la reacción enfocado en el tiempo (*timing*) de la formación de enlace y el modo en el cual se produce (i. e. si ocurre simultáneamente o en serie). Así, para comprender esta reacción es necesaria una explicación del tiempo y modo en que se produce la reacción. Esto queda expresado por los estudios de Kendall Houk con los que busca "entender cómo la reacción ocurre, no sólo que *a* va a *b* y *b* va a *c*, sino *de hecho siguiendo* cómo los enlaces se forman y cómo los átomos se mueven mientras estas cosas se unen" (Azar (2012) (entrevista a Houk), citado por Wise, 2017, p. 77).

La explicación de la reacción Diels-Alder no puede construirse considerando una solución matemática de la mecánica cuántica, ni por experimentación debido a que la reacción ocurre en femtosegundos ( $1 \times 10^{-15}$  s). La única manera que parece factible es por medio de simulaciones de alta resolución, opción a la que recurre Houk. Éstas le permiten al científico hacer un *seguimiento* del proceso de la reacción y, con ello, saber cuál es el tiempo y el modo en que se produce la reacción desde una posición inicial hasta su enlace. Wise nota que la capacidad de seguir el proceso (*followability*) es una característica propia de las narrativas, característica que se relaciona con que el lector tiene una expectativa de que la historia es arrastrada hacia un fin (Gallie, 1964). Esta característica le permite a Wise considerar que las simulaciones son similares a las narrativas en tanto que:

[ambas] conectan una cadena de eventos no sólo como una secuencia sino como un *despliegue natural* guiado por un *telos implícito*, un desarrollo en el cual el espectador está viendo hacia un fin, normalmente el doble enlace C-C, pero entonces ¡quizás no! Así, la narrativa tiene una *cualidad intencional* que hace parte de su estructura. Pero los resultados que se producen (o se revelan)

respecto al proceso de enlazamiento y al tiempo de enlace no son unos que pueden ser deducidos o predichos con base en un punto inicial y alguna condición general que gobiernen el cambio (Wise, 2017, p. 78 cursivas mías).

Notar esta similitud entre narrativas y simulaciones le permite a Wise considerar que el *mecanismo* involucrado en la reacción química deba entenderse como un “despliegue natural” en el que la relación entre el estado inicial y el final es contingente. Es decir, que los dos reactantes pueden seguir distintas trayectorias desde alguna posición inicial hasta su enlace implicando que el tiempo y el modo en que se produce la reacción varíe en cada ocasión. Esto hace que dicha relación apunte a una suerte de impredecibilidad del resultado<sup>57</sup> que se hace inteligible al *seguir* la simulación.

Cabe resaltar que Wise asocia la idea de *despliegue natural* con la idea de *mecanismo*, pero no un mecanismo gobernado por leyes o principios sino uno que se despliega en la medida en que se van presentando contingencias durante el proceso. Sin embargo, durante este tipo de despliegue no cualquier contingencia es aceptable para su incorporación, lo que conlleva a que no cualquier trayectoria de desarrollo es posible. Las que serán aceptables serán las que conserven una *relación* entre un estado inicial y el resultado o estado final al que pueden dirigirse las trayectorias. En el caso de las simulaciones de Diels-Alder este estado es el doble enlace C-C. Asimismo, en este contexto el despliegue natural está constreñido por las reglas o normas que conforman el modelo computacional. Éstas son las que permiten estabilizar el fenómeno y, en consecuencia, las que permiten “conservar la relación” entre los estados iniciales, los intermedios y los finales.

---

<sup>57</sup> Notemos que no es acertado referir a la impredecibilidad de que ocurra o no el enlace, pues generalmente siempre que se tienen dos reactantes de ciertas características se produce la reacción Diels-Alder. Más bien, aquí impredecibilidad del resultado refiere a la impredecibilidad del tiempo y trayectoria que siguen los reactantes hasta que se produce el doble enlace C-C.

En este sentido, el despliegue natural al que refiere Wise puede entenderse como un proceso dependiente de trayectoria análogo al planteado en la sección 3.3 y 3.4. Esto es, un proceso (conformado por la coordinación entre mecanismos que propician la estabilidad e inestabilidad) en el que el estado final depende tanto de las condiciones iniciales y de reglas o normas incorporadas en el modelo, como de las variaciones que ocurren durante el proceso. De igual modo que en el caso de la simulación del crecimiento de las plantas, las reglas incorporadas en el modelo de la reacción Diels-Alder son las que generan las variaciones que propician el despliegue de múltiples trayectorias de desarrollo. Esto implica que el entendimiento del proceso requiera de la construcción de un conjunto de las múltiples trayectorias que pueden seguir los reactantes desde una posición inicial a cierta temperatura hasta su doble enlace C-C.

En el caso de la reacción de Diels-Alder el conjunto de posibles trayectorias se representa en una serie de gráficas que relacionan parámetros relevantes como la velocidad de enlace, la duración del enlace, la distancia entre las moléculas, la energía potencial y la longitud de enlace. Estas gráficas explican partes específicas que se observan en las simulaciones y, además, explicitan las constricciones físicas que intervienen en la delimitación de las posibles trayectorias de enlace que la reacción puede tener. Wise arguye que estas representaciones reflejan un *espacio de posibilidades* reales de las trayectorias que pueden ocurrir para que se dé la reacción química.

Para Wise este espacio de posibilidades permite entender *como un todo* el proceso involucrado para obtener la reacción química, facilitándonos advertir los límites en los que se puede dar la reacción (en términos de trayectorias posibles) y, con ello, apreciar las consecuencias de las *constricciones* generadas por mecanismos que se expresan únicamente por medio de modelos computacionales. Esto implica que "la *credibilidad* de cualquier película actual o trayectoria depende de su lugar

dentro del espectro entero de las trayectorias posibles” (Wise, 2017, pp. 82-83, cursivas mías). Es decir, para Wise la credibilidad de la explicación de una trayectoria particular también radica en la posibilidad de localizarla en un espacio de posibilidades. De este modo, “la explicación (de actualidades) y el entendimiento (de posibilidades) están inherentemente enlazados. Una mejor explicación es la que hace a las alternativas cercanas más inmediatamente presentes a lo que de hecho ocurre en un caso dado” (p. 84).

No obstante, el planteamiento de Wise no señala que ahora el ideal explicativo sea configurar un espacio que abarque “todas” las posibilidades de desarrollo del sistema, como podría considerarse con la noción de espacio de posibilidades de Williamson (un espacio de posibilidades asociado al espacio fase físico). Si esto fuese el caso la contingencia ya no jugaría un papel explicativo relevante, pues tendríamos toda la información necesaria para saber qué es lo que ocurrió o lo que ocurriría ante cualquier nuevo despliegue de la reacción. En cambio, dicho espacio es un recurso que no está estrictamente definido, sino que se va modificando conforme la práctica científica va avanzando.

Para el caso del estudio de la reacción química Diels-Alder en una primera aproximación se corrieron una y otra vez diversas simulaciones ubicando aleatoriamente dos reactantes, etileno y butadieno (R1), en distintas posiciones iniciales a una temperatura de 298° K. De la ejecución múltiple de simulaciones se graficó el conjunto de posibles trayectorias de enlazamiento con el que se concluyó que el tiempo de enlazamiento ronda los 6 fs y las trayectorias se comportan de cierta forma hasta una zona de transición a partir de la cual son arrastradas con mayor rapidez al enlazamiento (figura 15A). Por otro lado, cuando se realizan múltiples simulaciones de la reacción a una temperatura de 1180° K el tiempo de enlazamiento ronda los 800 fs y la forma del conjunto de trayectorias graficadas son más irregulares que en el caso anterior (figura 15B). Asimismo, cuando se consideran

otros dos reactantes asimétricos (R8) aún a una temperatura de 298° K, el tiempo de enlazamiento aumenta a los 1400 fs y la forma del conjunto de trayectorias graficadas se observa todavía más irregular (figura 15C) (Black et al., 2012).

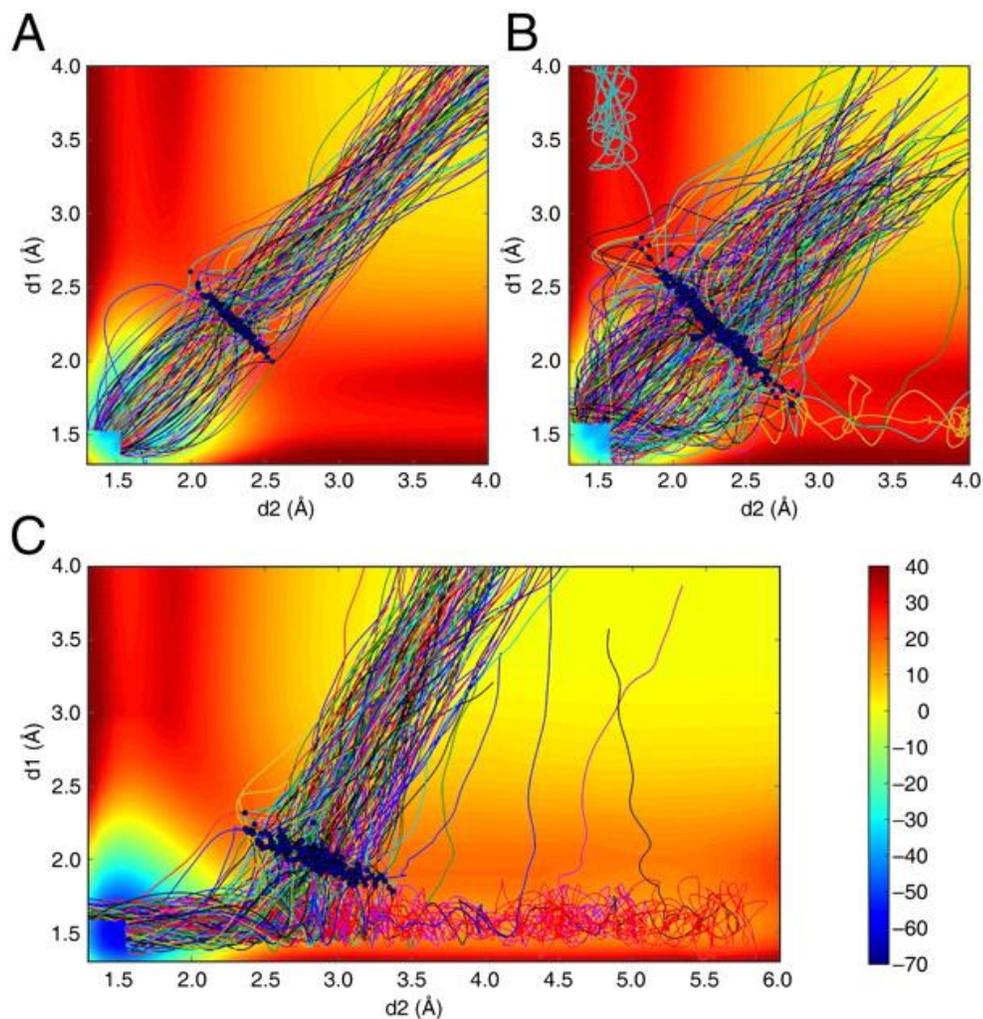


Figura 15. Distancias de los dos enlaces C-C en formación en las reacciones R1 a 298° K, R1 a 1180° K y R8 a 298° K.<sup>58</sup>

En este caso tenemos tres gráficas que representan un conjunto de posibilidades asociado a diferentes factores, apuntando cada uno a un mecanismo de reacción específico. El concepto de espacio de posibilidades al cual Wise se refiere integra los

<sup>58</sup> Imagen obtenida de <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1209316109#supplementary-materials>.

tres conjuntos de posibilidades, dejando abierta la posibilidad de integrar más y, por ende, de modificarse. Puede seguirse experimentando, cambiando la temperatura, los tipos de reactantes y las posiciones iniciales entre ellos, y se observará que en cada circunstancia hay un mecanismo específico que actuará de una manera particular, el cual se dilucida al hacer el *seguimiento* de las nuevas trayectorias de enlazamiento simuladas. Pero las circunstancias se van explorando conforme la práctica avanza: contemplando otros parámetros, introduciendo variaciones a los modelos computacionales o, incluso, utilizando nuevas tecnologías con las que se podría estudiar circunstancias más complejas que aún no son posibles de estudiar con el poder de cómputo actual. Esto hace que dicho espacio sea un recurso abierto que constantemente va integrando los distintos mecanismos que se van dilucidando y siguiendo en la práctica, lo que lleva, cada vez, a un mayor entendimiento de la reacción química de Diels-Alder.

Lo anterior nos indica que el espacio de posibilidades de Wise conlleva al entendimiento a partir de una relación dialéctica entre “la capacidad de seguir un proceso a través de su historia de desarrollo, o de seguir su crecimiento, y [de] simultáneamente aprender a reconocer diversas posibilidades alternativas” (Wise, 2017, p. 84).

La propuesta de Wise ayuda a aclarar el sentido en el que la contrastación o localización de una trayectoria de crecimiento particular con sus posibilidades no realizadas provee el entendimiento que entra en juego en la explicación de la formación de los cristales de nieve. Al igual que con la propuesta de Wise en nuestro caso se logra también un entendimiento narrativo con el que se puede asociar la fuerza de la explicación a la relación que hay entre un resultado morfológico particular del cristal de nieve con el conjunto de patrones morfológicos procesuales, es decir, con su árbol de posibilidades. Asimismo, el árbol de posibilidades de los cristales de nieve permite visualizar al proceso de crecimiento como un todo,

advirtiendo las posibilidades en las que el crecimiento de un cristal de nieve puede estabilizarse.

Una aparente diferencia entre la explicación de la reacción Diels-Alder y la formación de los cristales de nieve es que en la primera pareciera que estamos hablando de un resultado único, el doble enlace C-C, y en la segunda de múltiples resultados (diversidad morfológica de los cristales de nieve). Sin embargo, hay que notar que en la explicación de la reacción química no se busca dilucidar si se obtiene uno u otro tipo de enlace, sino el tiempo y el modo en que se produce. De aquí que, al igual que con los cristales de nieve, tenemos una multiplicidad de resultados posibles. Además, en ambos casos las circunstancias o los factores del entorno condicionarán el tipo de mecanismo que se despliega para producir ciertos tipos de resultados.

Por ejemplo, en la reacción química de Diels-Alder considerando dos reactante, etileno y butadieno, a una temperatura de 298° K domina un mecanismo que lleva a que el tiempo en que se produce el doble enlace C-C (resultado) sea de alrededor de 6 fs. Pero que en otras condiciones (por ejemplo, a una temperatura 1180° K) impere otro tipo de mecanismo que hace que el enlace se produzca en otra magnitud de tiempo (800 fs) (Black et al., 2012). En cuanto a la formación de cristales de nieve si se parte con una sobresaturación y temperatura bajas (entre -15° C y -30° C con una sobresaturación menor a los 0.1 g/cm<sup>3</sup>) el mecanismo de faceteo dominará y formará cristales de nieve con una simetría hexagonal simple. Pero si la sobresaturación del ambiente aumenta el mecanismo de ramificación empezará a dominar y conducirá a la formación de dendritas (Libbrecht, 2006). Vemos así que los mecanismos que entran en juego son mecanismos que guían el comportamiento del fenómeno en ciertas circunstancias específicas, pero no en otras, que pueden expresarse con más o menos fuerza durante el desarrollo del fenómeno e incluso interactuar con otros mecanismos,

como sucede en el caso del crecimiento de los cristales de nieve. Motivo por el cual resulta acertado concebir a dichos mecanismos como “despliegues naturales”, o bien, mecanismos contingentes.

Ahora bien, el entendimiento de cada caso no se logra simplemente por simular o reproducir el fenómeno bajo unas condiciones únicas, sino al hacerlo modificándolas de varias maneras. El cambio del valor de los parámetros hace que se explore y modifique constantemente el árbol de posibilidades. Al hacerlo se propicia una mejor comprensión de los tipos de mecanismos involucrados en el crecimiento o desarrollo del fenómeno. A diferencia de una ecuación general o ley que elucida sólo un tipo de mecanismo o aspecto del fenómeno, el árbol de posibilidades integra distintos tipos de mecanismos que no pueden ser unificados por un solo modelo teórico.

Así, tanto el espacio de posibilidades de Wise como el árbol de posibilidades propuesto permiten visualizar globalmente al proceso formativo de la entidad en términos de *trayectorias de crecimiento realistas* (contrafactuales históricos) y, con ello, facilitar la identificación de constricciones y factores emergentes que hacen que una trayectoria posible se trate de una trayectoria que realmente puede ocurrir. En el caso de la formación de cristales de nieve las constricciones se visualizan en los patrones morfológicos procesuales (clasificaciones de Nakaya y Libbrecht). Y en el caso de la reacción química de Diels-Alder las constricciones se visualizan en los límites espaciotemporales de las trayectorias de enlazamiento (gráficas asociadas a ciertas circunstancias de la reacción).

Además, en ambas propuestas se apunta a un tipo de recurso epistémico abierto que no puede estar dado de antemano, sino que se va construyendo conforme la práctica avanza. Esto es, un recurso que se ve modificado por la intervención constante en la investigación del fenómeno, ya sea por nuevos

modelos, teóricos o computacionales, o incluso por el uso de otros sistemas experimentales como las cámaras de convección para el caso de la formación de cristales de nieve.

En el análisis de los cristales de nieve, en particular, he concebido a los contrafactuales históricos que conforman el árbol de posibilidades como trayectorias de crecimiento realistas que están constreñidas por la coordinación entre mecanismos estables (de faceteo) e inestables (de ramificación). Esta coordinación es posible dilucidarla gracias al uso de modelos computacionales, los cuales permiten simular dichas trayectorias de crecimiento al integrar en el modelo factores generales (normas) que propician la estabilidad y factores particulares (variables aleatorias) que propician la novedad y redirigen la trayectoria de crecimiento. Los modelos computacionales son imprescindibles para entender cómo la coordinación entre distintos tipos de mecanismos propicia que el proceso de crecimiento se pueda estabilizar en diversidad de patrones morfológicos.

Una vez configurado el árbol de posibilidades, al igual que en el caso de la reacción de Diels-Alder, el entendimiento asociado a la explicación de una trayectoria de crecimiento de un cristal de nieve particular se logra cuando ésta es localizada en dicho árbol. En esta *localización* hay una identificación con un patrón morfológico procesual, pero también una contrastación con los otros patrones que pudo haber seguido, pero no lo hizo. Con la contrastación se advierte qué tipo de mecanismo estabilizador dominó durante su proceso de crecimiento y qué factores ambientales propiciaron que el proceso de ramificación tuviera mayor relevancia en alguna o algunas etapas de su crecimiento. Así, contrastar una trayectoria de crecimiento con su árbol de posibilidades permite hacer visibles los factores y mecanismos que tuvo que haber seguido el cristal de nieve para que se diera un resultado específico. Precisamente, la identificación en el árbol de posibilidades de los factores y mecanismos que constriñen y a la vez permiten la novedad de una

trayectoria de crecimiento particular es lo que nos permitirá construir una explicación narrativa epistémicamente relevante.

En virtud de lo anterior, considero que lo contingente en la explicación de fenómenos complejos reproducibles por medio de sistemas experimentales, como la formación de cristales de nieve, la formación de plantas, la evolución de un sistema urbanizado o la reacción química de Diels-Alder, es epistémicamente relevante en la medida que constituye procesos de crecimiento que configuran árboles de posibilidades. El logro epistémico que se obtiene de un patrón explicativo que requiere de la configuración de árboles de posibilidades (explicaciones narrativas) claramente es diferente del que se puede asociar a ideas tradicionales de explicación en donde se buscan factores necesarios y suficientes que den cuenta de los fenómenos, puesto que aquí lo que se busca lograr es un *entendimiento narrativo* basado en la *localización* de una trayectoria de crecimiento realizada en un árbol de posibilidades.

## Conclusiones

La cuestión sobre el valor epistémico de la contingencia en las explicaciones científicas hasta muy reciente sólo había sido abordada en el contexto de la explicación de fenómenos históricos únicos, ya sea en la historiografía o en las ciencias naturales históricas. En esta tesis mostré que la contingencia no sólo es epistémicamente relevante en dichos fenómenos, sino también en fenómenos estudiados en las ciencias contemporáneas, particularmente aquellos en los que se requiere simular su proceso de crecimiento. Para mostrar el valor de la contingencia seguí un razonamiento basado en casos, principalmente el caso de la explicación de la formación de los cristales de nieve, en el que fue central dar cuenta del papel que juega la historicidad de los procesos. A partir de dicho razonamiento planteé un patrón narrativo de la explicación en el que factores generales (leyes, normas, modelos) y particulares (eventos, contexto, materiales) se retroalimentan para dar cuenta de dichos fenómenos. El patrón planteado refleja un saber narrativo que contempla no sólo la integración de factores teóricos, sino también materiales. Es decir, un saber en el que es imprescindible la reproducción del fenómeno con sistemas experimentales para determinar y analizar los factores que le dan el valor epistémico a la explicación narrativa.

La contingencia ha sido un concepto relegado en muchas discusiones en torno al tema de la explicación científica en la filosofía de la ciencia, pero es crucial para entender el papel epistémico de la historicidad de los procesos. Como lo he mostrado a lo largo del escrito, el concepto de contingencia puede ser definido de diversas maneras: como mero azar, como un concepto en oposición al concepto de ley o como un concepto asociado a la historia del fenómeno. Aquí concebí a la contingencia en términos de contingencia histórica, específicamente como un tipo de dependencia de trayectoria. Opté por este concepto puesto que me permitió

abordar a la contingencia no sólo en relación con eventos particulares sino también con factores generales como leyes o normas que constriñen, mas no determinan, el desarrollo o crecimiento de un fenómeno. En particular, argumenté que el proceso de crecimiento de los cristales de nieve debe entenderse como un proceso dependiente de trayectoria para aclarar la manera en la que se coordinan procesos estables (deterministas) e inestables (probabilistas). Esto me permitió abordar la cuestión central de la tesis sobre cómo ciertos sistemas dinámicos complejos se estabilizan y cómo esa estabilización es capturada por una narrativa explicativa.

Con la noción de dependencia de trayectoria no sólo busqué dilucidar el carácter históricamente contingente del proceso de crecimiento de los cristales de nieve y otros fenómenos abordados, como el de la formación de las plantas, sino también señalar que la manera de analizarlo debe ser de tal modo que se contemplen las posibilidades de crecimiento no realizadas o, en otras palabras, sus contrafácticos históricos. Esto me llevó a plantear el concepto de árbol de posibilidades, el cual lo concebí como un recurso con el que se puede analizar el valor epistémico de la contingencia en las explicaciones narrativas en términos de constricciones, tendencias y novedades (o factores emergentes) posibilitadas por la coordinación entre procesos estables e inestables. Mostré que las constricciones, tendencias y novedades son representadas en lo que llamé patrones morfológicos procesuales para el caso de la formación de los cristales de nieve.

Una característica central en este tipo de explicación narrativa es que su árbol de posibilidades no está dado de antemano, esto es, conforme avanza la investigación del fenómeno se van incorporando nuevos modelos teóricos y computacionales o, incluso, nuevos sistemas experimentales que permiten explorar nuevas posibilidades de crecimiento del fenómeno. No hay nada que indique que estas posibilidades sean limitadas, pues las nuevas posibilidades que se puedan abrir dependen también tanto de objetivos e inquietudes de los científicos como de

nuevos desarrollos tecnológicos. Cada uno de los objetivos científicos y desarrollos tecnológicos otorga un nuevo conocimiento que ayuda a tener un mayor entendimiento del fenómeno. En este sentido el árbol de posibilidades es un recurso epistémico abierto en constante crecimiento. Este carácter abierto no se ve socavado por el tipo de entendimiento narrativo que genera, es decir, por un entendimiento que se logra al localizar lo actual en su árbol de posibilidades, pues mientras más posibilidades relevantes se contemplen se obtendrá una imagen más robusta del proceso de crecimiento.

En la tesis mostré que los procesos involucrados en la formación de los distintos objetos de estudio abordados son conformados por diferentes tipos de mecanismos. No obstante, quiero remarcar que en nuestro contexto la noción de mecanismo se aleja de una noción tradicional en tanto que la emergencia de los mecanismos depende del contexto y no viceversa. La idea de mecanismo abordada no es compatible con una manera de ver el mundo conformado por estructuras subyacentes que gobiernan el comportamiento de los fenómenos, como pareciera sugerir la perspectiva nomotética en la filosofía de la ciencia. En los casos aquí trabajados, particularmente en el análisis de la simulación de la formación de plantas por medio de modelos computacionales, se refleja una dinámica en la que el contexto hace emerger distintos tipos de mecanismos, estables e inestables, y en la que, a su vez, los mecanismos van transformando el contexto. Esta dinámica sugiere que debemos considerar una estructura que se va construyendo en relación con el contexto que se presenta durante el proceso de crecimiento.

Con el énfasis en el concepto de proceso a lo largo del escrito busqué dejar en claro el distanciamiento de mi propuesta con las nociones de mecanismo y ley tradicionales. Esto, al ofrecer una manera distinta de entender la relación entre los factores explicativos (generales y particulares) en la que el contexto y los mecanismos se construyen mutuamente durante el proceso de crecimiento. En este

sentido, sugiero que el análisis del tipo de explicación narrativa realizado aquí puede verse beneficiado si se parte desde una ontología de procesos. En esta ontología, como lo afirman Dupré & Nicholson (2018), el énfasis no está en las sustancias o cosas (e. g. partículas, moléculas, células, etc.) y su interacción entre ellas, sino en los procesos mismos entendidos como “entidades inherentemente relacionales [que] influyen y son influenciados por sus alrededores” (Dupré & Nicholson, 2018, p. 27).

Desde esta perspectiva el explanandum se explica en función de “la estabilidad lograda por la actividad” (Dupré & Nicholson, 2018, p. 14), una estabilidad que “persiste no por default, como es supuesto en las sustancias persistentes, o cosas, sino como un logro, una consecuencia de actividades dentro y alrededor de él” (Dupré, 2021, p. 8). Esta idea concuerda con el planteamiento de la tesis en el que la explicación de la formación del fenómeno (e. g. las morfologías de los cristales de nieve) debe dar cuenta de un proceso de crecimiento conformado por la actividad y coordinación entre procesos estables e inestables.

Analizar la explicación de fenómenos complejos reproducibles por medio de sistemas experimentales, como los modelos computacionales, desde una ontología de procesos llevaría a replantearse una serie de cuestiones de suma importancia en la filosofía de la ciencia como es el caso del concepto de causalidad. Una noción de causalidad desde esta perspectiva no debería de considerar condiciones causales determinantes, sino condiciones causales que delimitan posibilidades, aspecto que confluiría con el concepto de árbol de posibilidades y cuyo problema principal sería entender a la *causación* en términos de “interacciones de procesos” (Dupré, 2021, p. 3).

Así, un análisis desde una ontología de procesos podría aclarar y robustecer filosóficamente el valor del concepto de árbol de posibilidades. Un trabajo posterior

que tome como base dicha ontología podría arrojar una visión más clara respecto a qué tanto la causalidad en los procesos evolutivos como en los procesos de crecimiento tiene que ver con una persistencia de patrones (estabilidad) y, al mismo tiempo, con variación o novedad (inestabilidad). Dos aspectos que podrían modelarse con el concepto de árbol de posibilidades debido a su capacidad de integrar tanto factores generales como particulares.

Por último, el planteamiento de la tesis se basó principalmente en el estudio de caso sobre la explicación de la formación de los cristales de nieve, sin embargo, a lo largo del escrito abordé distintos tipos de casos con los que comparé, aclaré y generalicé diferentes aspectos de la propuesta. En particular, el caso de la explicación de la estabilidad del Sistema Solar me permitió delinear la importancia de dar cuenta de la estabilidad de sistemas dinámicos complejos y cómo su explicación se relaciona con la manera en la que se interrelacionan factores generales (estabilizadores del proceso) y particulares (diversificadores del proceso) y cómo esta interrelación da pie a la construcción de escenarios posibles de desarrollo (árboles de posibilidades). El caso de la explicación de la formación de plantas desde una perspectiva ecológica me permitió aclarar y ejemplificar de manera cuantitativa cómo se interrelacionan dichos factores y en qué sentido su interrelación configura y explica su proceso de crecimiento. El caso de la explicación de la evolución de un sistema urbanizado me ayudó a mostrar las limitaciones de la teoría del caos y de procesos estocásticos para explicar sistemas de diversa índole que pueden ser considerados como sistemas termodinámicos fuera del equilibrio y cómo la comprensión de este tipo de fenómenos también apunta a la construcción de árboles de posibilidades. Por último, con el caso de la explicación de la reacción química de Diels-Alder mostré que las explicaciones que requieren de la construcción de árboles de posibilidades, como la de los casos aquí estudiados, apuntan a un entendimiento narrativo y, por ende, a

un tipo de explicación de carácter narrativo. Así, los aspectos dilucidados en cada caso apuntaron a un patrón explicativo común.

Con la propuesta desarrollada en la tesis he buscado avanzar en el tema del saber narrativo, poco explorado en la filosofía de la ciencia, proponiendo una suerte de patrón narrativo de la explicación. Sin embargo, me he reservado en llamarlo patrón explicativo debido a que no busqué establecer criterios básicos que deben de cumplirse para definir un tipo específico de explicación, como ha sucedido con los modelos nomotéticos de la explicación. A diferencia de ello, en este proyecto he propuesto que los conceptos de proceso de crecimiento y de árbol de posibilidades, más que establecer criterios básicos que caracterizan un patrón narrativo de la explicación, fungen como guía de análisis para abordar el valor epistémico de la contingencia en las explicaciones narrativas. Asimismo, aunque ambos conceptos apuntan a un patrón explicativo en común, su definición queda abierta, pues ésta debe adaptarse a la explicación de cada tipo de fenómeno y entenderse desde ese contexto.

Finalmente, es posible seguir robusteciendo y matizando la manera en la que propuse cómo analizar el valor epistémico de la contingencia en explicaciones narrativas de dos formas. Por una parte, si consideramos una ontología de procesos a partir de la cual sea posible esgrimir una noción de causación basada en la dependencia de trayectoria de los procesos de crecimiento. Por otra, si se integran al análisis otros estudios de caso con los cuales se contraste cada explicación narrativa para así identificar similitudes y diferencias que nos ayuden a tener un mejor entendimiento en la manera en cómo se explican en la actualidad fenómenos complejos reproducibles por medio de sistemas experimentales.

## Bibliografía

- Allen, P. M. & Sanglier, M. (1981). "Urban evolution, self-organization, and decisionmaking". *Environment and Planning A*, volumen 3, 167- 183.
- Ankersmit, F. (1983). *Narrative Logic: A Semantic Analysis of the Historian's Language*, The Hague: Kluwer Academic Publishers.
- Beatty, J. (1995). "The Evolutionary Contingency Thesis" en *Concepts, Theories, and Rationality in the Biological Sciences*, Gereon Wolters & James Lennox (eds.), Univerity of Pittsburgh, pp. 45-81.
- \_\_\_\_\_ (2006). "Replaying Life's Tape", en *The Journal og Philosophy*, Vol. 103, No. 7, 336-362.
- \_\_\_\_\_ (2017). "Narrative possibility and narrative explanation" en *Studies in History and Philosophy of Science*, 62, 31-42.
- Beatty, J. & Desjardins, E. (2009). "Natural selection and history", *Biol. Philos.* 24, 231-246.
- Beatty J. & Carrera I. (2011). "When what had to happen was not bound to happen: history, chance, narrative, evolution". *Journal of the Philosophy of History* 5, 471-495.
- Black, Kersey, Liu, Peng, Xu, Lai, Doubleday, Charles, & Houk, Kendall N. (2012). "Dynamics, transition states, and timing of bond formation in Diels-Alder reactions". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(32), 12860-12865. on 12860 <http://www.pnas.org/content/109/32/12860.full>
- Braithwaite, R. B. (1953). *Scientific Explanation: A Study of the Function of Theory, Probability and Law in Science*. Cambridge University Press.

- Cartwright, N., (1983), *How the Laws of Physics Lie*, Oxford: Oxford University Press.
- \_\_\_\_\_, (1989), *Nature's Capacities and their Measurement*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Cartwright, N. Pemberton, J. & Wieten, S. (2020). Mechanisms, laws and explanation. *European Journal for Philosophy of Science*, 10, 25.
- Coffa, A. (1974), "Hempel's Ambiguity", *Synthese*, 28, 141-163.
- Collins English Dictionary. (s. f.). Contingency. En *collinsdictionary.com dictionary*. Recuperado el 3 de mayo de 2023, de <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/contingency>
- Currie, A. (2013). "Narratives, mechanisms and progress in historical science". *Synthese*, 191, 1163-1183.
- \_\_\_\_\_. (2018). Big dragons on small islands: generality and particularity in science. *Biol. Philos.* 33, 20.
- Currie, A. & Sterelny, K. (2017), "In defence of story-telling", en *Studies in History and Philosophy of Science* 52, 14-21.
- Darwin, C. (1877). *On the various contrivances by which orchids are fertilised by insects*, 2nd ed. Murray, London.
- Desjardins, E. (2011). Historicity and experimental evolution. *Biol. Philos.* 26, 339-364.
- Dupré, J. (2021). Causally powerful processes. *Synthese* 199 (3-4), 10667-10683.
- Dupré, J. & Nicholson, D. (2018). *Everything Flows: Towards a Processual Philosophy of Biology*. Oxford University Press.

- Dole, S. (1970). Computer simulation of the formation of planetary systems. *Icarus* 13, 494-508.
- Elgin, C. (2009). "Exemplification, Idealization, and Understanding". En *Fictions in Science: Essays on Idealization and Modeling*, Mauricio Suárez (ed.), London: Routledge, pp. 77-90.
- \_\_\_\_\_ (2011). "Making Manifest: the Role of Exemplification in the Sciences and the Arts". En *Principia* 15(3), 399-413.
- Ferraro, G. (2015). "On Growth and Form of Narrative Structures". En A. Sarti et al. (eds.), *Morphogenesis and Individuation*, Springer International Publishing.
- Fodor, J. (1991), "You Can Fool Some People All of the Time, Everything Else Being Equal; Hedged Laws and Psychological Explanations", *Mind*, 100, 19–34.
- Gallie, W. B. (1964). *Philosophy and the historical understanding* (2da ed.). New York: Schocken Books, 1968.
- Glennan, S., (1996), "Mechanisms and the Nature of Causation", *Erkenntnis*, 44(1), 49–71.
- \_\_\_\_\_ (2017). *The new mechanical philosophy*. Oxford University Press.
- Godfrey-Smith, P. (2014), *Philosophy of Biology*, Princeton University Press.
- Goodman, N., (1947), "The Problem of Counterfactual Conditionals," *Journal of Philosophy*, 44, 113–128.
- Gould, S. J. (1989). *Wonderful Life*. New York: Norton.
- Gravner, J. & Griffeath, D. (2009). Modeling snow-crystal growth: a three-dimensional mesoscopic approach. *Phys. Rev. E* 79, 011601.
- Green, D. et al. (2020). *Complexity in Landscape Ecology*. Springer.

- Grüne-Yanoff, T., & Lehtinen, A. (2012). Philosophy of game theory. Uskali Mäki (Ed.), *Handbook of the Philosophy of Economics*, Oxford, pp. 531-576.
- Hawthorn, G. (1991). *Plausible Worlds: Possibility and understanding in history and the social sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hempel, C. (1942), "The Function of General Laws in History", *The Journal of Philosophy*, Vol. 39, No. 2, 35-48.
- \_\_\_\_\_ (1965), *Aspects of Scientific Explanation and other Essays in the Philosophy of Science*, The Free Press, New York.
- \_\_\_\_\_ (1966), *Philosophy of Natural Science*, Prentice Hall, New Jersey.
- Hempel & Oppenheim (1948), "Studies in the logic of explanation", *Philosophy of Science*, 15 (2), 135-175.
- Herschel, J. (1830). *Preliminary discourse on natural philosophy*. Cambridge University Press, (2009).
- Hull, D. (1975). Central Subjects and Historical Narratives. *History and Theory*, 14(3), 253-274.
- Kepler, J. (1611). *De Nive Sexangular*, traducido como *The Six-Cornered Snowflake*, por Colin Hardie, Oxford University Press, Oxford, (1966).
- Kondepudi, D. & Prigogine, I., (2015). *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons.
- Kuukkanen, J. (2012). The Missing Narrativist Turn in the Historiography of Science, en *History and Theory*, Vol. 51, No. 3, 340-363.
- Lewontin, R. C. (1967). The principle of historicity in evolution. In: Moorhead P. S., Kaplan M. M. (eds.) *Mathematical challenges to the neo-Darwinian*

- interpretation of evolution*. The Wistar Institute Press, Philadelphia, pp. 81–88.
- \_\_\_\_\_ (1974). *The genetic basis of evolutionary change*. Columbia University Press, New York.
- \_\_\_\_\_ (1978). "Adaptation". *Sci Am* 239(3), 156–169.
- Lewontin, R. C. & Gould, S. J. (1979). "The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm: a critique of the adaptationist programme". *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 205, 581-598.
- Libbrecht, L. (2005). The Physics of Snow Crystals. *Rep. Prog. Phys.* 68, 855-895.
- \_\_\_\_\_ (2006). *Field Guide to Snowflakes*. Voyageur Press.
- \_\_\_\_\_ (2013). Quantitative modeling of faceted ice crystal growth from water vapor using cellular automata. *J. Comput. Methods Phys.* 174806.
- \_\_\_\_\_ (2017). Physical Dynamics of Ice Crystal Growth. *Annu. Rev. Mater. Res.* 47, 271-95.
- \_\_\_\_\_ (2019). A quantitative physical model of the snow crystal morphology diagram, arXiv:1910.09067.
- \_\_\_\_\_ (2020). Toward a comprehensive model of snow crystal growth: 7. Ice attachment kinetics near  $-2^{\circ}\text{C}$ , arXiv:2004.06212.
- \_\_\_\_\_ (2022). *Snow Crystals: A Case Study in Spontaneous Structure Formation*. Princeton University Press.
- Losos, J. B. (2017), *Improbable destinies: how predictable is evolution?* Penguin Publishing, London.
- Machamer, P. Darden, L. & Craver, C. (2000). "Thinking about mechanisms". *Philosophy of Science* 67 (1), 1-25

- María Moliner. (2008). *Diccionario de uso del español* (edición electrónica versión 3.0).
- Martínez, S. (2007), "La representación de lo contingente en las explicaciones científicas" en *Variedad infinita ciencia y representación*, Edna Suárez (ed.), México, Limusa, pp. 23-54.
- Mill, J.S., (1843). *A System of Logic*. London: Longmans, Green and Co.
- Mink, L. (1966). "Autonomy and the historical understanding". *History and Theory*, 5, 24-47.
- \_\_\_\_\_ (1970). "History and fiction as modes of comprehension". *New Literary History*, 1, 541-548.
- Mitchell, S. (1997). "Pragmatic Laws". *Philosophy of Science*, 64, 468-479.
- \_\_\_\_\_ (2000). "Dimensions of Scientific Law". *Philosophy of Science*, 67, 242-265.
- \_\_\_\_\_ (2002). "Contingent Generalizations: Lessons from Biology", en R. Maynts, ed., *Akteure, Mechanismen, Modelle: Zur TheorieFähigkeit makrosozialer Analysen*, Frankfurt: Campus, pp. 179-195.
- \_\_\_\_\_ (2003). *Biological Complexity and Integrative Pluralism*. Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_ (2009). *Unsimple Truths: Science, Complexity, and Policy*. The University of Chicago Press.
- Morgan, M. (2017), "Narrative ordering and explanation", *Studies in History and Philosophy of Science* 62, 86-97.
- Nagel, E. (2006), *La estructura de la ciencia*, ediciones Paidós Ibérica, Barcelona.

- Nakaya, U. (1954), *Snow Crystals, Natural and Artificial*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Peterson, I. (1993), *Newton's Clock: Chaos in the Solar System*, W. H. Freeman and Company, New York.
- Powell, R. (2012), Convergent evolution and the limits of natural selection. *Eur. J. Philos. Sci.* 2(3), 355–373.
- Prigogine, I. (1980). *From being to becoming: time and complexity in the physical sciences*. H. W. Freeman and Company, New York.
- Richards, R. (1992). The Structure of Narrative Explanation in History and Biology. En M. Nitecki y D. Nitecki (Ed.), *History and Evolution*, Suny Press.
- Rincón, L. (2012). *Introducción a los procesos estocásticos*. Las prensas de ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Salmon, W. (1971), *Statistical Explanation and Statistical Relevance*, University of Pittsburgh Press.
- \_\_\_\_\_ (1984), *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*, Princeton University Press.
- \_\_\_\_\_ (1989), "Four Decades of Scientific Explanation" en *Scientific Explanation*, Philip Kitcher y Wesley Salmon (eds.). University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Schank, J. C. & Wimsatt, W. C. (1987). Generative entrenchment and evolution. En Fine, A. & Machamer, P. (Eds.), *Proceedings of the 1986 biennial meeting of the philosophy of science association*, (Vol. 2, pp. 33–60). East Lansing: PSA.
- Sober, E. (1988), *Reconstructing the past: parsimony, evolution, and inference*. MIT press, Cambridge.

- Sole, R. & Goodwin, B. (2001), *Signs of life: how complexity pervades biology*. Basic Books, New York.
- Sterelny, K. (2005). "Made by each other: Organisms and their environment". *Biology and Philosophy* 20 (1), 21-36.
- \_\_\_\_\_ (2016). "Contingency and History," *Philosophy of Science* 83, no. 4, 521–539.
- Sunagawa, I. (2005). *Crystals: Growth, Morphology and Perfection*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tuckwell, H. (1995). "Elementary applications of probability theory: with an introduction to stochastic differential equations". Chapman & Hall, London.
- Turner, D. (2011). *Paleontology: a philosophical introduction*. Cambridge University Press.
- Van Pelt, J. & Uylings, H. (2003). "Growth functions in dendritic outgrowth". *Brain and Mind*, 4, 51-65.
- Whewell, W. (1874), *Astronomy and General Physics Considered with Reference to Natural Theology*, Londres, William Pickering.
- Williamson, T. (2018). Spaces of Possibility. *Royal Institute of Philosophy Supplement*, 82.
- Wimsatt, W. C. (1999). Generativity, entrenchment, evolution, and innateness: Philosophy, evolutionary biology, and conceptual foundations of science. En V. Grey (Ed.), *Where biology meets psychology* (pp. 139–179). Cambridge: MIT.
- \_\_\_\_\_ (2001). Generative entrenchment and the developmental approach to evolutionary processes. En S. Oyama, P. E. Griffiths, & R. D. Gray (Eds.), *Cycles of contingency* (pp. 219–237). Cambridge:MIT.

- Wimsatt, W. C., & Schank, J. C. (1988). Two constraints on the evolution of complex adaptations and themeans for their avoidance. En M. H. Nitecki (Ed.), *Evolutionary progress* (pp. 231–273). Chicago: University of Chicago.
- Wise, N. (2011) "Science as (historical) narrative", en *Erkenn.*, 75, 349-376.
- \_\_\_\_\_ (2017) "On the narrative form of simulations" en *Studies in History and Philosophy of Science* 62, 74-85.
- Wong, W. (2019). "The evolutionary contingency thesis and evolutionary idiosyncrasies" en *Biology and Philosophy*, 34: 22.
- Woodward, J. & Hitchcock, C. (2003). "Explanatory generalizations. Part I: A counterfactual account". *Nous*, 37, 1-24.