

Desarrollo embrionario teleológico como evidencia de la primera premisa de la quinta vía

Teleological Embryonic Development as Evidence of the First Premise of the Fifth Way

Juan Larraín

Instituto de Éticas Aplicadas, Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

jlarrain@bio.puc.cl

ORCID: 0000-0002-8788-7083

DOI: <https://doi.org/10.53439/stdfyt55.28.2025.103-132>

Resumen: La síntesis moderna propone que la evolución es un proceso azaroso, sin direccionalidad ni finalidad. Afirmación que estaría en conflicto con la propuesta teleológica de la quinta vía de santo Tomás de Aquino, quien en su primera premisa plantea la existencia de cuerpos naturales que obran por un fin. En este trabajo se discuten argumentos teóricos, conceptuales y en especial evidencias empíricas, para mostrar que los procesos de morfogénesis que ocurren durante el desarrollo embrionario sí tienen direccionalidad y finalidad. En base a eso se defiende una teleología de carácter científico, para dar sustento, al menos mínimo, a la validez empírica de la primera premisa de la quinta vía.

Abstract: Modern synthesis proposes that evolution is a random process, without directionality or purpose. This claim would be in conflict with the teleological proposal of the fifth way of St. Thomas Aquinas, who in his first premise asserts the existence of natural bodies that act for a purpose. This paper discusses theoretical, conceptual arguments, and especially empirical evidence, to show that the morphogenetic processes occurring during embryonic development do indeed have directionality and purpose. Based on this, a scientific teleology is defended, to provide at least minimal support for the empirical validity of the first way.

Palabras clave: azar, evolución, desarrollo embrionario, teleología, quinta vía

Keywords: chance, evolution, embryonic development, teleology, fifth way

Recibido: 27/11/2024

Aceptado: 28/02/2025

Introducción

Uno de los ejemplos más recurrentes para afirmar el aparente conflicto entre ciencia y teología se basa en que la teoría de la evolución sostiene que la existencia de todo lo vivo, incluyendo los seres humanos, no sería fruto de causas finales intencionales que proveen direccionalidad, finalidad y propósito, sino que sería producto del simple azar. Esto chocaría con la quinta vía de Tomás de Aquino, que reconoce la presencia de teleología en la naturaleza para llegar a la conclusión de la existencia de Dios.

La quinta vía parte de una premisa empírica que es la observación de la existencia de cuerpos naturales que obran por un fin, al que llegan de forma intencional. Afirmación que sería una teleología particular, basada en el ordenamiento hacia un fin de cada una de las cosas naturales pero no hace referencia a una teleología general o del cosmos como un todo.

Para aportar a la discusión sobre el aparente conflicto mencionado me propongo revisar si la ciencia actual provee evidencias sobre la existencia de cuerpos naturales particulares que obran por un fin a pesar de no tener conocimiento. Para ello se propone como hipótesis que el desarrollo embrionario es un proceso con características teleológicas, es decir con direccionalidad, lo que constituiría un ejemplo de la existencia de cuerpos naturales que están dirigidos hacia un fin. La existencia de casos particulares que tengan una direccionalidad y finalidad podría usarse para apoyar, al menos de forma mínima, la validez empírica de la primera premisa de la quinta vía.

Para abordar la hipótesis propuesta se partirá revisando muy brevemente la síntesis moderna de la teoría de la evolución, poniendo especial énfasis en el papel que tiene el azar en el proceso evolutivo. Luego se revisará, también de forma muy sucinta, la primera premisa de la quinta vía, que será el foco de atención de este artículo. En la sección principal se describirán argumentos teóricos y conceptuales, y, en especial, evidencias empíricas, que muestran que el desarrollo embrionario es un proceso teleológico, defendiendo así la existencia de evidencias de un desarrollo embrionario teleológico que deben ser consideradas como parte de las explicaciones científicas reafirmando la validez empírica de la primera premisa de la quinta vía de santo Tomás. Para cerrar se revisará de forma crítica cómo las evidencias descritas apoyan la primera premisa de la quinta vía, y se resumirán las principales conclusiones de este artículo.

Azar y evolución

Basado en lo establecido por Darwin, la evolución es un proceso de descendencia con cambio, por el cual todas las especies existentes, incluidos los seres humanos y especies extintas, provienen de un ancestro común mediante un proceso de transformación gradual. La principal novedad de la teoría de la evolución es que propone a la selección natural (SN) como el motor principal del proceso evolutivo. La SN se define como el principio de conservación o supervivencia de los más aptos, y permite que las variaciones que son útiles a un ser orgánico tengan las mayores posibilidades de conservarse, y que, fruto de los mecanismos de herencia, estas variaciones tiendan a mantenerse en su descendencia (Darwin, 2008). Las adaptaciones biológicas son características que mejoran la eficacia biológica (*fitness*) de un organismo potenciando su capacidad de supervivencia y reproducción con respecto a sus ancestros, las cuáles evolucionan por un proceso de SN, y no por un aparente diseño dirigido por la existencia de agentes o fuerzas externas de carácter sobrenatural.

Para Darwin el azar o la casualidad (*chance*) y la ausencia de toda direccionalidad en el proceso evolutivo son centrales en su teoría. Esto se constata claramente al apreciar la gran cantidad de veces que menciona la palabra “chance” en el texto original del *Origen de las Especies* (Ramsey & Pence, 2016). La fuente del azar en la evolución se puede encontrar al menos a dos niveles: i) variabilidad genética, y ii) eventos accidentales o contingentes.

En relación a lo primero, la incorporación de la genética a la teoría de la evolución permite identificar una serie de eventos y procesos estocásticos que son responsables de generar variación genética dentro de una población. Eventos o procesos estocásticos son todos aquellos en que no es posible predecir un resultado futuro. Entre los mecanismos que producen variabilidad genética se pueden mencionar las mutaciones, el flujo genético, la reproducción sexual, y la deriva génica que son procesos intrínsecamente estocásticos. Por esta razón no es predecible saber si ocurrirán, y de ocurrir no es posible saber cuáles serán esos cambios ni cuál sería el efecto que podrían tener. Por lo tanto, no se puede predecir cuál será el material genético sobre el cual actuará la SN (Futuyma & Kirkpatrick, 2017).

Por lo tanto, una de las fuentes principales del azar y de la falta de dirección en la evolución está dado por la variabilidad genética y no por la SN (Kampourakis, 2020). La SN opera sobre el material genético disponible y no diseña nada ya que:

La variación genética es al azar, [y] la selección natural es el aspecto *no* azaroso de la evolución, ya que funciona de acuerdo al principio de que son las mutaciones que aumentan la supervivencia y la reproducción las que resultan seleccionadas [por lo tanto] la selección natural no busca intencionalmente la adaptación, sino que la adaptación es el resultado inevitable de la selección natural. (de Asúa, 2015, p. 100)

Una segunda fuente de azar que impide que el proceso evolutivo sea predecible es lo que Stephen J. Gould (1999) ha denominado como eventos contingentes o accidentales, eventos que contribuyen a la deriva genética producto de la pérdida de alelos por la pérdida de individuos que transportan dichas variantes genéticas. Los eventos contingentes son impredecibles. Esto significa que pueden existir múltiples caminos evolutivos producidos por eventos contingentes y que no podemos saber cuáles van a ocurrir. Una vez que ocurre un evento contingente se produce una restricción en los posibles caminos que se pueden seguir. Algunos ejemplos de eventos contingentes podrían ser un incendio de un bosque, la caída de un meteorito, la migración de una población de aves o mosquitos a un nuevo nicho, etc. Por esto Gould considera que si hiciéramos correr nuevamente la “cinta de la vida” esto podría llevarnos por un camino completamente diferente.

En conclusión, existen una serie de evidencias científicas que muestran que diversas etapas de la evolución son azarosas. Por lo tanto, se puede afirmar que la aparición de nuevas adaptaciones y de distintas especies desde un ancestro común habría seguido un camino sin una dirección definida. De toda esta evidencia muchos concluyen que la existencia de las especies, incluida la de los seres humanos, sería completamente fortuita. Como se ha indicado, estas conclusiones estarían en completa oposición con la primera premisa de la quinta vía, que afirma la existencia de cuerpos naturales que se dirigen a un fin. Sin embargo, la presencia de azar en la evolución, aunque claramente existente como se ha descrito, tiene sus limitaciones, como ser la existencia de procesos como el desarrollo embrionario que sí tienen direccionalidad, y que coloca limitaciones al efecto del azar en la evolución. Esto se discutirá con profundidad en la sección sobre desarrollo embrionario, que constituye la parte central de los argumentos que sustentan la hipótesis planteada, esto es, que el desarrollo embrionario es un proceso con características teleológicas, es decir, con direccionalidad.

Primera premisa de la quinta vía

Las cinco vías de santo Tomás constan de una estructura similar. Todas se inician con una primera premisa que se basa en la experiencia sensible, seguida de la aplicación del principio de causalidad al punto de partida, la imposibilidad de proceder al infinito en la serie de causas, y el cierre final que concluye con la necesidad de la existencia de Dios. La primera premisa corresponde al punto de partida, y siempre se refiere a algo que puede ser conocido empíricamente, a un hecho verificable de una experiencia particular de la naturaleza. Corresponde al efecto que observamos desde el cual se construirá el argumento. Esto no implica que la demostración que seguirá en cada vía deba ser experimental, sino que, por el contrario, será rigurosamente metafísica.

La quinta vía o argumento teleológico se plantea de la siguiente forma:

La quinta vía se toma del gobierno del mundo. Vemos, en efecto, que las cosas que carecen de conocimiento, como los cuerpos naturales, obran por un fin, como se pone de manifiesto porque siempre o muy frecuentemente obran de la misma manera para conseguir lo mejor; de ahí que llegan al fin no por azar, sino intencionadamente. Pero los seres que no tienen conocimiento no tienden al fin sino dirigidos por algún ser cognoscente o inteligente, como la flecha es dirigida por el arquero. Luego existe un ser inteligente por el cual todas las cosas naturales se ordenan al fin: a este ser llamamos Dios. (*S. Th.* I, q. 2, a. 3)

La primera premisa correspondería a la afirmación de que:

las cosas que carecen de conocimiento, como los cuerpos naturales, obran por un fin, como se pone de manifiesto porque siempre o muy frecuentemente obran de la misma manera para conseguir lo mejor; de ahí que llegan al fin no por azar, sino intencionadamente.

Como se puede apreciar, la propuesta de que todo en la evolución es por azar y que no hay direccionalidad invalidaría por completo la primera premisa de la quinta vía, y por ende la vía en su conjunto.

Esta primera premisa se basa en la experiencia ordinaria que tenemos de observar que en la naturaleza los entes en general obran de la misma manera para alcanzar un propósito. Estas regularidades nos permiten apreciar

que con una alta frecuencia los cuerpos naturales tienen un mismo fin. Por ejemplo, un animal se dirige a un río a beber agua con el fin de saciar su sed, o el hecho de que el sol salga todos los días al amanecer entregándonos luz y calor. Esta capacidad, como se ilustra en los ejemplos, es independiente de si los agentes tienen conocimiento o no de su obrar y de sus efectos. En el primer caso lo hacen por su propio conocimiento, saben que tomando agua podrán saciar la sed. Mientras que en el segundo ejemplo el sol aparece sin conocimiento, sino que es causado por otro, en este caso por la fuerza de gravedad, y no por sí mismos.

Es interesante constatar que la quinta vía habla de que los cuerpos naturales “siempre o muy frecuentemente obran de la misma manera para conseguir lo mejor”. Esto es algo que también apreciamos de la experiencia del mundo. Los cuerpos naturales tienen una tendencia, que es propia de ellos mismos, que los dirige hacia la consecución de un fin, lo que se aprecia en la regularidad de la actividad natural. Esta observación permitiría descartar que los cuerpos naturales alcancen su fin por azar, ya que lo hacen obrando casi siempre de la misma manera, y el azar por definición no es regular (Artigas, 2008).

Aquí es importante detenerse en un punto que es crucial. Así como la experiencia sensible nos muestra un sin número de casos en que podemos apreciar la existencia de una finalidad, también esa misma experiencia nos muestra ejemplos de la presencia del azar en el mundo natural. Esto genera al menos dos preguntas para la metafísica y la teología natural de santo Tomás: ¿se hace cargo la quinta vía de esta existencia del azar?, ¿es compatible la presencia de azar con la existencia de una finalidad?

Para responder a lo anterior es importante profundizar en qué significa que la primera premisa indique que “siempre o muy frecuentemente los cuerpos naturales obran de la misma manera”. No habla sólo de siempre, sino que deja abierto un espacio para afirmar que en la naturaleza existe espacio para el azar y que no todo tiene que tener una causa final. Lo que Tomás dice es que cada agente tiene una causa final, esto es, que todo lo que tiene función de causa eficiente apunta en una dirección o está dirigido a un cierto efecto, pero que podría haber hechos que no son causas eficientes que pueden no tener propósito, como por ejemplo la caída de un asteroide (Feser, 2020).

Para responder a la segunda pregunta, lo importante es reconocer que la existencia del azar no implica que todas las regularidades que observamos se puedan atribuir al azar, ya que el mismo azar presupone la existencia de ciertas regularidades causales. A modo de ejemplo, que un campesino

desentierre por azar un tesoro mientras excava no implica que eso no pueda tener también explicaciones causales. El sólo hecho que haya desenterrado ese tesoro por azar tiene como causa también que alguien lo haya enterrado, y de su decisión de ponerse a excavar. Debido a la mera existencia del azar sería incoherente eliminar una causa final, ya que, como se indica en el ejemplo, el azar ocurre en un contexto de muchos factores causales (Feser, 2020).

La evolución es un proceso que consta de muchas regularidades (por ejemplo, mecanismos que producen mutaciones, selección natural), y también de eventos azarosos (por ejemplo, mutaciones, eventos contingentes), todo lo cual no parece razón ni argumento suficiente para eliminar la existencia de una direccionalidad, ni de una causa final. En la próxima sección se presentará evidencia respecto de la direccionalidad existente en el desarrollo embrionario, y se usará como argumento a favor de la primera premisa de la quinta vía para defender la existencia de una teleología en algunos procesos naturales.

Desarrollo embrionario: un proceso teleológico

En esta sección se describirán aquellas evidencias, en su mayoría empíricas, que sustentan que el desarrollo embrionario podría ser un proceso teleológico. Primero describiré algunas nociones básicas sobre biología del desarrollo que permitan entender mejor esta sección. Luego se describirán cuatro argumentos: tres de ellos corresponden a evidencias empíricas, en favor de que el desarrollo embrionario es un proceso que posee direccionalidad y finalidad. Para cerrar esta sección se analizará brevemente el concepto de teleología, y en qué condiciones la teleología puede ser aceptada como parte de un análisis científico.

¿Qué es el desarrollo embrionario?

El desarrollo embrionario, en su definición más común, corresponde a un proceso por el cual una célula única –cigoto– origina un organismo multicelular complejo. Aunque esta definición es correcta, es acotada y sólo incluye un subconjunto de procesos del desarrollo embrionario que son propios de organismos multicelulares, y tiene foco en el objetivo de llegar a la adultez, y por tanto en la idea de una historia individual.

Una definición más amplia es la que considera el desarrollo como el cambio de forma biológica durante el tiempo y en respuesta al medio externo, lo que se conoce como morfogénesis. La morfogénesis se define como un

proceso que “implica la convergencia de un ensamble de células hacia un patrón pre-determinado” (Friston et al., 2015, p. 2). Se puede apreciar que esta definición ya tiene implícita la idea de direccionalidad y finalidad en los procesos de morfogénesis como el desarrollo embrionario.

Conrad Waddington: el concepto de direccionalidad en el desarrollo embrionario

El biólogo del desarrollo y filósofo escocés Conrad H. Waddington fue uno de los primeros en introducir la idea de la existencia de direccionalidad y finalidad en el desarrollo embrionario. Aunque no realizó experimentos para demostrar empíricamente dicha propuesta, el marco conceptual que formuló, y que describiré a continuación, es de gran relevancia.

En su libro *The Strategy of the Genes* (1957/2015), Waddington establece que los organismos vivos son diferentes de las cosas inanimadas por tres características que les son propias: poseer una mente, una forma y un fin. En relación a lo que nos interesa aquí, el que tengan un fin implica que tienen una direccionalidad (*directiveness*), es decir, que “la mayoría de las actividades de un organismo vivo son de tal tipo que tienden a producir un cierto resultado final característico” (p. 2). La capacidad de los organismos vivos de dar continuidad a su vida mediante la reproducción, el traspaso de sus características genéticas a las futuras generaciones y las acciones que les permiten mantener su homeostasis serían uno los mejores ejemplos de una actividad que produce un resultado final único.

En lo que respecta a la forma biológica y a cómo esta puede cambiar en el tiempo, es decir, los proceso de morfogénesis, Waddington argumenta en contra de la idea de que todo en la evolución sea fruto del azar. Para este autor, suponer que la:

evolución de los mecanismos biológicos maravillosamente adaptados ha dependido solamente en la selección de un conjunto de variaciones al azar, cada una producida por una oportunidad ciega, es como sugerir que si tiramos un conjunto de ladrillos a una pila amontonada podríamos eventualmente ser capaces de hacernos nuestra casa más deseada. (pp. 6-7)

Aquí es donde Waddington introduce el desarrollo embrionario como un proceso que da direccionalidad a la evolución, dejando este de ser algo meramente azaroso:

Desarrollo embrionario teleológico como evidencia de la primera premisa de la quinta vía

Las diferencias hereditarias que aparecen en los animales no son del todo aleatorias, como serían las diferencias entre dos montones de ladrillos. Dichas diferencias resultan de cambios en sistemas de desarrollo ordenados, y cada nueva variedad tienen su propio orden, ya sea de una complejidad mayor o menor que aquella la forma original de la cual fue derivada. (p. 7)

El desarrollo embrionario es por un lado un proceso continuo y de cambio gradual que genera productos finales que varían de forma discontinua, en otras palabras, que genera tejidos y órganos muy distintos unos de otros, como son la piel, los nervios, los músculos, los pulmones, los riñones, etc. Sin embargo, a la vez, se caracteriza porque regularmente da como resultado esos mismos productos finales discontinuos y organizados entre sí de una misma manera. Esto significa que el desarrollo desde la etapa inicial del huevo hasta la condición adulta sigue la ruta más favorecida, incluso si existen cambios externos que empujen el proceso por otro camino, mostrando la resiliencia y robustez de estos procesos.

¿Cómo se logra entonces dicha direccionalidad y la posibilidad de generar productos finales discontinuos a partir de un inicio homogéneo? Es aquí donde el científico escocés introduce las metáforas del *paisaje* y de la *canalización* epigenética para explicar la direccionalidad del desarrollo. En el capítulo titulado “La Cibernética del desarrollo”, Waddington establece que las rutas del desarrollo que llevan a los distintos productos finales estarían canalizadas, y el proceso seguiría la dirección indicada por las rutas más favorables o normales. La canalización del desarrollo estaría determinada y controlada genéticamente. Incluso, si el proceso de desarrollo se viese alterado o desviado, tendría la capacidad de retomar dichas rutas favorables que lo direccionan a los productos finales establecidos.

Waddington define el desarrollo como un recorrido a través de un *paisaje* epigenético, esto es un “espacio multidimensional, subdividido en un número de regiones, de forma que trayectorias que se originan en cualquier lugar de una región convergen a un cierto punto, mientras que las que se inician en otras regiones convergen en otros lugares” (pp. 27-28). Una metáfora que ayuda a entender estos conceptos es entender las distintas rutas que siguen las células durante el desarrollo como una bola que se coloca en un lugar específico de un *paisaje* epigenético inclinado. Dicha bola seguirá las direcciones indicadas por los canales propios de dicho paisaje, que a su vez han sido determinados por las redes genéticas respectivas. Esto implica que

están dirigidas a ciertos objetivos o blancos mediante la canalización propia de cada paisaje epigenético.

En resumen, Waddington propone que el desarrollo embrionario tiene direccionalidad y conduce los componentes azarosos de la evolución de los seres vivos por ciertos caminos o canales. Aquellos cambios que ocurren a nivel de los cromosomas podrán ser aleatorios, pero no así sus efectos fenotípicos que estarán condicionados por las rutas más favorables respecto del paisaje epigenético correspondiente de forma de poder producir estados finales adaptados al ambiente.

Autorregulación y autoorganización como evidencias empíricas de direccionalidad en el desarrollo embrionario

En esta sección revisaremos tanto las teorías como los experimentos que muestran que los embriones y las células individuales que los componen tienen la capacidad de autoorganizarse, lo cual es propio de un proceso direccionado hacia un fin u objetivo.

Se entiende por autoorganización, en particular la autoorganización de carácter físico, como aquellos procesos en que ocurre “la generación de estructuras geométricas o patrones químicos mediante la interacción dinámica de componentes desorganizados [...] que en el caso del desarrollo [embrionario] podrá considerarse como tales [...] si es atribuible a procesos físicos que actúan a nivel multicelular” (Newman, 2022, pp. 198-199). En otras palabras, se refiere a la aparición de complejidad de formas y patrones a partir de una aparente simplicidad fruto de la interacción de componentes desorganizados.

Experimentos clásicos de la biología del desarrollo muestran con toda claridad la gran capacidad de autoorganización o autorregulación de muchos embriones. Uno de los principales fue el realizado a fines del siglo XIX por Hans Driesch y que es conocido como el experimento del *medio embrión*. Al separar embriones de erizo marino de dos y cuatro células en células individuales, Driesch observó que cada una de esas células o blastómeros individuales era capaz de dar origen a, es decir, de desarrollarse en, un embrión normal, aunque de menor tamaño (Maienschein, 1991). Estos resultados llevaron a Driesch (1908) a proponer que los embriones se desarrollan hacia la realización de un objetivo intrínseco, aunque ante la falta de una explicación mecanicista atribuyó esa propiedad al vitalismo.

De la misma forma, otro proceso biológico, en el que se observa ciertos *finés intrínsecos*, es en la capacidad de autoorganizarse *in vitro* de células ais-

ladas del embrión en su etapa de gástrula. Para describir estos experimentos es necesario primero hacer una breve descripción de la etapa de gastrulación durante el desarrollo embrionario. Durante la gastrulación se establece el plan básico del embrión que queda conformado por las tres capas germinales, correspondientes a tres capas de células –ectodermo, mesodermo y endodermo– denominadas así porque de ellas se derivan todos los órganos de un organismo. Cada una de ellas consiste en un conjunto de células que durante la gastrulación se asocian entre sí para formar cada una de las capas germinales, y que no se entremezclan entre ellas (por ejemplo, las células del ectodermo sólo se encuentran en la capa ectodérmica, y no en las capas mesodérmicas ni endodérmicas).

Experimentos con células aisladas de los estadios de gastrulación de anfibios y cultivadas *in vitro* muestran que estas tienen gran capacidad de autoorganizarse en capas germinales que imitan la misma disposición que alcanzan *in vivo*. Esto implica que cada célula *conoce* su lugar en el embrión indicando que las capacidades de autoorganización son una propiedad de cada célula individual. En otras palabras, siguen instrucciones “que especifican el comportamiento que guiará el proceso de ensamblaje hacia un resultado final específico sin importar cual sea la ruta que lleve a ello” (Steinberg, 1998, p. 51).

Se ha establecido que ese tipo de comportamientos es propio de conjuntos de células vivas, y que se debería a que estas tienen propiedades similares a la de los líquidos. Esto implica que poseen conductas de organización guiadas por fines, como sería el lograr un resultado morfológico específico determinado por parámetros termodinámicos propios de las células al comportarse como líquido. Por ejemplo, en el caso del agua sus propiedades físicas y termodinámicas determinan que una gota de agua suspendida tome siempre una forma esférica que implica la menor superficie, y la mayor interacción entre sus componentes. De igual manera, conjuntos de células se autoorganizan en base a sus propiedades termodinámicas específicas, en este caso dadas por sus afinidades relativas, y de esa manera logra su finalidad que es organizarse de una determinada manera.

En consonancia con la definición de autorregulación descrita anteriormente, se puede decir que la capacidad de las células del embrión de organizarse *in vitro* corresponde a un proceso de autoorganización, ya que está comandado por propiedades físicas de los componentes individuales. El que estas propiedades físicas definan la direccionalidad de los procesos de morfogénesis explicaría por qué ciertas formas y patrones aparecen recurrentemente durante la evolución, y reitera la idea de que el proceso de se-

lección natural está limitado por las condiciones del desarrollo embrionario (Newman, 2019, p. 2), y que por ende la evolución no es del todo azarosa.

En resumen, en esta sección se ha presentado dos evidencias empíricas para sustentar que el desarrollo es un proceso direccionado hacia un objetivo. Por una parte, los experimentos del *tipo* Driesch muestran que los embriones tienen capacidades para poder llegar a su objetivo final, incluso cuando sufren perturbaciones severas. Esta persistencia y plasticidad de los embriones será revisada más adelante al analizar que el desarrollo consiste en procesos *dirigidos a un objetivo*. La segunda evidencia descrita en esta sección corresponde a experimentos en contextos *in vitro* con células embrionarias aisladas, la cual muestra que dichas células tienen la capacidad de establecer patrones morfogenéticos y están direccionadas a lograr cierta organización en base a sus propiedades físicas.

Los campos morfogenéticos y su capacidad de dirigir el desarrollo embrionario

El establecimiento de la morfología de un organismo durante el desarrollo embrionario requiere de una ajustada regulación y control. Se ha propuesto que procesos de morfogénesis como los mencionados podrían explicarse por dos mecanismos. Por una parte, como resultado de una propiedad emergente producto de interacciones celulares locales. O, alternativamente, aunque no excluyente de la anterior, se pueden explicar como el resultado de un proceso de tipo computacional que está guiado por un mapa o pre-patrón que contiene el camino para alcanzar el objetivo morfológico final, información que estaría físicamente codificada en el mismo sistema biológico (Levin, 2012). A estos mapas o pre-patrones se les conoce como campos morfogenéticos (CM). En esta sección discutiremos evidencia en favor de la existencia de dichos CM, ya que la demostración experimental de su existencia sería otra evidencia empírica en favor de la direccionalidad en los procesos morfogenéticos. Para ello primero se definirá qué son los CM y luego se describirá con detalle la evidencia que muestra la existencia de CM bioeléctricos involucrados en el desarrollo del sistema nervioso central (SNC).

En base al concepto de los campos físicos (por ejemplo, fuerza, electrodinámicos) los CM se definen como “una región sobre la cual hay una agencia trabajando de forma coordinada, lo que resulta en el establecimiento de un equilibrio dentro del área de dicho campo” (Huxley & Debeer, 1934, p. 276). Metafóricamente hablando, los CM corresponden a mapas o pre-patro-

nes que permiten que distintas partes –células– del embrión *conozcan* su ubicación y tamaño respecto del sistema completo pudiendo adaptar su desarrollo respecto del total de forma integrada y coordinada (Weber, 2022). Los CM se caracterizan por contener información que permite el establecimiento de pre-patrones que por definición ejercen un control global para la generación de la morfología final, que se conoce como “blanco morfológico”. Estos pre-patrones corresponden a programas flexibles y dinámicos que reconocen alteraciones y desviaciones permitiendo la acomodación para llegar al blanco morfológico correspondiente (Levin, 2012).

Los CM permiten que todas las células del sistema *estén en la misma página*, haciendo que el desarrollo sea un fenómeno menos caótico y más reproducible y así guiar el proceso hacia su objetivo final. Los CM proveen direccionalidad y resiliencia frente a perturbaciones externas de forma de asegurar la direccionalidad y llegada al destino morfológico respectivo (Newman, 2023, p. 211). De esta forma los CM permiten una mayor predictibilidad de los procesos de morfogénesis (Levin, 2021).

Los campos morfogenéticos bioeléctricos dirigen el desarrollo del sistema nervioso central

La existencia de distintos tipos de CM ha sido descrita y estudiada ampliamente e incluye, entre otros, gradientes químicas (por ejemplo, morfógenos), fuerza físicas (por ejemplo, presión) y bioelectricidad (Levin, 2021). Aquí se describirán experimentos que demuestran la función de corrientes bioeléctricas que funcionan como CM para guiar la morfogénesis del SNC. Primero se mostrará la existencia de dichos CM y la formación de pre-patrones de voltajes de membrana en el SNC de anfibios, para luego explicar que la alteración de dichos pre-patrones resulta en el desarrollo de organismos con serias malformaciones en el SNC.

El SNC en embriones vertebrados, incluyendo el de anfibios y humanos, se forma a partir de un tejido denominado como placa neural. Placa que durante el proceso de neurulación se pliega levantándose por sus bordes denominados pliegues neurales, los cuales se juntarán al centro formando un cilindro llamado tubo neural que luego sufrirá otros procesos de morfogénesis para formar así el SNC. Experimentos de ese tipo realizados en anfibios permitieron determinar la existencia de pre-patrones bioeléctricos endógenos en la placa neural durante el periodo de plegamiento. Esta señal bioeléctrica se intensifica durante el proceso de cierre del tubo neural, y desaparece una vez que el tubo ha terminado de formarse (Pai et al., 2015). Esto

significa que existen corrientes bioeléctricas en el lugar –placa neural– y en el tiempo –neurulación– correcto para poder dirigir la formación del SNC.

Para poder demostrar que los efectos observados al alterar las corrientes bioeléctricas se deben a una alteración global de los CM, los investigadores desarrollaron un modelo computacional que permite estudiar y predecir pre-patrones bioeléctricos en la placa neural del embrión de anfibios. Utilizando estas metodologías se obtuvo un resultado muy interesante, a saber, que el tratamiento de embriones con nicotina, un neuroteratógeno que bloquea canales iónicos y produce malformaciones en el cerebro, afecta el pre-patrón de voltajes de membrana en la placa neural. Esto permite demostrar que dicho pre-patrón bioeléctrico, y no su simple alteración local, es necesario para que el proceso de morfogénesis del SNC llegue a su blanco morfológico (Pai et al., 2018).

Los experimentos descritos son un claro ejemplo de la existencia de CM bioeléctricos en los tejidos que formarán el SNC, es decir, pre-patrones que se establecen antes de que se forme el SNC. La alteración de dichos pre-patrones a escala global, y no sólo local, es necesaria para que el embrión pueda desarrollar un SNC con toda la precisión requerida. Esta evidencia indica claramente que la alteración de los CM bioeléctricos impide que el embrión se dirija y arribe a su blanco morfológico. La presencia de CM bioeléctricos y su función en el desarrollo embrionario es otro antecedente empírico para sustentar la direccionalidad del proceso de desarrollo y la autonomía del embrión de construir dichos pre-patrones o CM que actúan como un mapa que es responsable de regular un proceso que tiene como objetivo llegar a un final pre-establecido.

El desarrollo embrionario es un proceso dirigido a un objetivo

Los análisis de tipo *top-down* han sido muy utilizados y efectivos para explicar y entender procesos complejos en física, en ciencias de la computación, en cibernética y en neurociencias. Sólo recientemente empezaron a ser usados para estudiar procesos de morfogénesis en desarrollo. Estos modelos consideran que el estado de un sistema como un todo, y no sólo sus componentes individuales, deben ser considerados como autores causales (Pezzulo & Levin, 2016).

En los siguientes apartados de esta sección se revisarán simulaciones computacionales y matemáticas de los procesos de morfogénesis que ocurren durante el desarrollo embrionario realizadas con estrategias del tipo *top-down* que demuestran que estos corresponden a procesos del tipo “dirigidos a un objetivo” (*goal-directed*). Para ello primero describiré qué significa

y qué es un proceso dirigido a un objetivo, y luego revisaré las simulaciones que muestran que la morfogénesis es un proceso de ese tipo. Finalmente se revisará cómo el concepto de CM descrito anteriormente se relaciona con el hecho de que el desarrollo embrionario es un proceso dirigido a un objetivo. De esta forma se agrega una nueva evidencia empírica, que apoya la direccionalidad del desarrollo embrionario.

¿Qué son los modelos dirigidos a un objetivo?

Los modelos *top-down* del tipo dirigidos a un objetivo han sido utilizados exitosamente en cibernética, neurociencias cognitivas y física, pero no de forma amplia para estudiar procesos biológicos. Esto en parte puede deberse a la tendencia a evitar usar cualquier concepto con *tintes* teleológicos, ya que la biología en general se entiende de forma mecanicista y en base a causas del tipo eficiente, evitando toda referencia a causas finales.

El uso de modelos del tipo dirigidos a un objetivo implica para algunos la referencia a causas finales, como por ejemplo los objetivos y metas a alcanzar, y que estos fuesen las causas responsables de explicar los comportamientos de los sistemas biológicos, algo que no sería posible de distinguir de las propuestas teleológicas ya establecidas por Aristóteles. Por esto es importante definir con claridad qué se entiende por un proceso dirigido a un objetivo y distinguirlo de los conceptos teleológicos de carácter aristotélico.

Un sistema o entidad puede ser clasificado como dirigido a un objetivo cuando:

la conducta de un sistema está consistentemente dirigida hacia un estado o configuración particular que se puede interpretar como el objetivo del sistema. Más en concreto, esto significa que si se extrapolan los efectos de dicha conducta hacia el futuro, la trayectoria resultante terminará en el estado correspondiente al objetivo, incluso si existiesen perturbaciones intermedias que desvían el movimiento de su trayectoria inicial. (Heylighen, 2023, p. 371)

Se considera que un sistema dirigido a un objetivo debe cumplir con los requisitos de plasticidad, persistencia, y coordinación o acción concertada. La plasticidad se refiere a la capacidad de una entidad o sistema de alcanzar un mismo objetivo independiente de las condiciones iniciales. La persistencia implica que una entidad o sistema pueda arribar al objetivo final a pesar de la existencia de perturbaciones externas. Mientras que el criterio de coordinación se

refiere a que las actividades realizadas por los distintos componentes del sistema trabajen de forma conjunta y coordinada para alcanzar el objetivo buscado.

Lo importante de esta definición es que al menos la persistencia y la plasticidad pueden ser medidas cuantitativamente, como ha sido demostrado para el movimiento de bacterias hacia una gradiente química, y el movimiento de seres humanos siguiendo una gradiente de calor (Lee & McShea, 2020). El propósito aquí es dejar establecido que al hablar de sistemas dirigidos a un objetivo nos referimos a aquellos atributos que caben dentro de los objetivos de las ciencias empíricas.

¿Es el desarrollo embrionario un proceso dirigido a un objetivo?

La morfogénesis se entiende como un proceso que “implica la convergencia de un ensamble de células hacia un patrón pre-determinado” (Friston et al., 2015, p. 2). Esto habla claramente de un proceso que tiene un objetivo, esto es el poder alcanzar un patrón determinado, o un blanco morfológico.

Sin embargo, la simple intuición de que los procesos morfogenéticos pueden ser del tipo dirigidos a un objetivo no es suficiente para entregar un argumento empírico en favor de la hipótesis que se propone en este artículo. Por ello aquí se discuten con detalle trabajos que muestran simulaciones computacionales y matemáticas respecto de esta posibilidad. Lo primero es poder determinar qué tipo de metodologías se puede utilizar para analizar si los procesos morfogenéticos son procesos dirigidos a un objetivo. Para ello se debe tener en claro que los procesos morfogenéticos involucrados en el desarrollo intentan adquirir y mantener estados específicos a gran escala, denominados como homeostasis de patrones, que no es posible explicar con aproximaciones de tipo *bottom-up* y por ello para entenderlos es necesario utilizar modelos de control *top-down*.

Para los experimentos que se describirán a continuación se utilizaron métodos que han sido aplicados para el análisis de sistemas vivos. En particular aquí se mostrará el uso de una metodología denominada como principio de energía libre que ha sido usada para el modelamiento *top-down* en neurociencia computacional para predecir el procesamiento cerebral, y luego se verá su aplicación en procesos morfogenéticos (Pezzulo & Levin, 2016).

El principio de energía libre derivado de la física aplicado a la capacidad predictiva del cerebro se basa en una consideración evolutiva muy sencilla. Esto es que, para lograr su supervivencia, los animales deben privilegiar el uso de espacios en su nicho evolucionario que se consideren como *buenos estados*, y por otro lado evitar nichos que no le sean ventajosos. Por

ejemplo, un animal terrestre debe privilegiar el ocupar espacios en que exista alimento disponible y evitar aquellos que impliquen vivir bajo el agua. Para lograr lo anterior el cerebro está optimizado para percibir y procesar estadísticas ambientales y guiar al animal a esos buenos estados mediante acciones definidas. Esto lo hace mediante lo que se denomina “principio de energía libre”, que corresponde a un mecanismo de acción-corrección de forma de minimizar la distancia entre el estado actual que detecta y el buen estado que se busca alcanzar (Pezzulo & Levin, 2016).

El principio de mínimas energías y el método de inferencia activa fue utilizado en primer instancia a modo de prueba de concepto para simular un proceso de morfogénesis simple en que un conjunto de ocho clones de células debe auto-ensamblarse en un organismo hipotético con un blanco morfogenético sencillo que consta de cabeza, cuerpo y cola. En un inicio los ocho clones de células son iguales y tienen un mismo modelo generativo que implica una pluripotencialidad implícita, desconociendo sus lugares de origen y su destino futuro. Los modelos generativos de cada célula codifican las creencias respecto de las señales externas que debe sensar y expresar cuando cada célula ocupa un lugar determinado en la morfología blanco buscada, y además deben ser capaces de inferir su identidad en base a las señales que recibe. Siguiendo la definición basada en el ejemplo de la capacidad predictiva del cerebro, esta sería la etapa de percibir y sensar estadísticas ambientales.

En base a lo sentido, cada célula gatilla acciones que las llevan a migrar, hasta que logran encontrar su ubicación final en el blanco morfológico que será aquella determinada por el mínimo de energía libre. Siguiendo el modelo del cerebro predictivo, estos serían los procesos generativos que, basados en mecanismos de error-corrección, implican cambios de forma hasta que cada célula encuentre su lugar en la morfología final, algo que está definido por la posibilidad de alcanzar la energía libre mínima. De esta forma el principio de optimización, mueve a las células de sus estados actuales, a su estado deseado o buen estado donde sensa las señales correctas. Así el organismo simple de cabeza, cuerpo y cola como un todo alcanza su morfología blanco, indicando que este sería un proceso dirigido o en búsqueda de un objetivo (Friston et al., 2015, pp. 4-7).

Los campos morfogenéticos guían los procesos de morfogénesis dirigidos a un objetivo

Para concluir esta sección resulta de interés poder relacionar el concepto de CM, definidos previamente como pre-patrones que contienen el

camino para alcanzar el blanco morfogenético y que están físicamente codificados en el sistema biológico mismo (Levin, 2012), con el hecho de que los procesos morfogenéticos son del tipo dirigidos a un objetivo. Interesa saber si dichos CM son los responsables de guiar o direccionar los procesos de este tipo. Para ello se revisará la propuesta que utiliza la teoría de campo y una perspectiva jerárquica para explicar y entender los sistemas dirigidos a un objetivo y el papel de los CM.

Los sistemas dirigidos a un objetivo, entre ellos el desarrollo embrionario, comparten una arquitectura común que consiste “en una entidad que se mueve dentro de una estructura de mayor tamaño que la contiene, y que dirige su conducta de forma general pero sin determinarla de forma precisa” (McShea, 2012, p. 663). De acuerdo con la teoría de campo, la estructura que contiene a la entidad sería un campo en el cual está inserto dicho ente y explica los comportamientos propios de un sistema dirigido a un objetivo. Dicho campo, que es físico, guía o dirige a un blanco determinado, explicando la persistencia y plasticidad del sistema. Como se indicó, esta arquitectura es común para todo sistema dirigido a un objetivo, desde las tortugas que llegan a su playa original siguiendo el campo magnético de la tierra, hasta el desarrollo embrionario que es guiado por CM específicos (Babcock & McShea, 2023).

Esta noción de campo se inspira principalmente en la biología del desarrollo, a partir de los trabajos de Waddington descritos anteriormente. Los campos en biología del desarrollo, descritos como CM, se entienden como una relación informacional y regional, y tienen como propiedad central el no ser local, es decir, que las influencias sobre un punto del campo no están localizadas en ese mismo punto sino que puede venir de otra región del sistema (Levin, 2012).

A lo largo de la historia de la biología del desarrollo se ha definido que los genes podrían ser el mecanismo interno que guía el desarrollo embrionario, pero la teoría de campo viene a perfeccionar dicho entendido, que es parcialmente erróneo. En el ejemplo de Waddington del misil teledirigido, existen dos tipos de causas, aquellas referidas a los mecanismos internos, de nivel inferior, y las causas que proveen guía y direccionalidad, que corresponden a aquellas de nivel superior. En el torpedo sus propiedades electrónicas definen su mecanismo interno, el cual en ningún caso provee direccionalidad, ya que en sistemas direccionados a un objetivo se requiere de una fuente que tiene información respecto del objetivo. Nada de eso se puede encontrar en la composición electrónica interna del torpedo, sino que la guía proviene del campo de sonido originado en su blanco.

Algo similar, pero con una leve diferencia, ocurre en el desarrollo. Las redes genéticas corresponden al mecanismo interno que en sí no provee direccionalidad ya que no tiene información del objetivo final del proceso. Las redes genéticas son las responsables de generar ese campo externo, que en palabras de Waddington correspondería al *paisaje y canalización* epigenético, que direcciona el desarrollo. Pero, a diferencia del caso del torpedo, el origen del campo que guía no es externo, sino que corresponde a una estructura biofísica de gran escala, que es interna al embrión, pero externa a las células que deben coordinarse según esa información (Babcock & McShea, 2021). Estos campos corresponden a lo que hemos descrito como CM, que pueden estar contruidos de distinta manera, pero que en todos los casos son medibles, y que a la vez son producidos por las redes genéticas respectivas. Con todo, es importante clarificar que los genes serían las sustancias que manufacturan los CM lo cual no significa que proveen guía al proceso embrionario, “en términos generales, los campos externos guían, mientras que las entidades internas proveen un mecanismo” (p. 8770).

Los análisis y resultados de esta sección muestran un ejemplo empírico muy claro de que los procesos de morfogénesis del desarrollo embrionario, al ser simulados matemática y computacionalmente, se comportan de acuerdo a las propiedades de un proceso dirigido a un objetivo. Más aún, según la teoría de campos son dirigidos hacia su blanco morfológico por CM, apoyando fuertemente la hipótesis de que el desarrollo embrionario es un proceso con direccionalidad.

Desarrollo embrionario teleológico ¿a qué tipo de teleología nos referimos?

El concepto de teleología es, en general, controversial, y en biología es visto como algo negativo por ser “una poco feliz herencia cristiana [...] y un desafortunado vestigio de nuestro pasado” (Ruse, 1989, p. 51). El temor de caer en concepciones teleológicas implica una especial dificultad para estudiar e introducir los conceptos de direccionalidad y finalidad en diversos procesos biológicos, incluyendo el desarrollo embrionario.

A comienzos del siglo XX existía un ambiente de verdadera *teleofobia*, ya que la idea de una teleología intrínseca era incomprendida e incluso vista como maligna (Dresow & Love, 2023). A modo de ejemplo de estos *temores* teleológicos se puede citar que la idea de un desarrollo embrionario dirigido a un objetivo resulta desconcertante para algunos autores ya que implicaría

comprender a “los organismos como máquinas ingeniosamente diseñadas por un creador inteligente” (Steinberg, 1998, p. 50). En la misma línea, las aproximaciones del tipo *top-down* no habían sido utilizadas con frecuencia en biología, porque “aparentemente incluyen una *peligrosa* noción de teleología, direccionalidad, propósito y finalidad” (Pezzulo & Levin, 2016, p. 3). Sin embargo, estos temores no son compartidos por todos. Michael Ruse (1989), filósofo de la biología y experto en evolución, quien tiene una postura favorable a la existencia de componentes teleológicos, hace ver que el concepto de selección natural de Darwin es un concepto de por sí teleológico y que los organismos vivos, a diferencia de las cosas inanimadas, están orientados a un objetivo por lo cual no es posible eliminar la idea de teleología de la biología.

Por lo tanto, lo que se requiere es una adecuada definición y establecer en qué condiciones las explicaciones teleológicas pueden considerarse como parte de los argumentos científicos y empíricos. Para ello en esta sección revisaré cómo el concepto de teleología ha ido variando desde su versión original platónico-aristotélica, pasando por la introducción del concepto de teleonomía o “cuasi-teleología”. Se pondrá énfasis en describir qué se puede considerar como una teleología de carácter científico, y aclarar que el problema con la teleología puede ser un falso dilema.

La discusión teleológica, es decir, la discusión acerca de las explicaciones de las conductas basadas en una direccionalidad que persiga el objetivo o propósito de una entidad, tienen sus raíces en la filosofía griega de Platón y Aristóteles. El primero explicaba el propósito de los entes en base a la existencia de una causa externa, el demiurgo, que sería un artesano inteligente que crea el mundo y le imprime un propósito. Mientras que el estagirita considera que los seres vivos, a diferencia de los artefactos, son dirigidos a su finalidad por un co-principio inmanente al que denomina como “forma”.

Con el avance, a partir del siglo XVII, de las ciencias empíricas, se desarrollaron posturas mecanicistas que consideraban a las explicaciones teleológicas como misteriosas y oscuras y que, por ende, no podían ser consideradas como evidencias científicas. Las razones principales para este rechazo se basaban en que: i) las explicaciones teleológicas introducen elementos antropomórficos, atribuyendo cierta intención a la naturaleza, ii) colocan las causas en el futuro, iii) los postulados teleológicos no se pueden evaluar empíricamente, y, iv) por la sensación de que las ideas de finalidad están más en el observador que en los mismos organismos que aparentan tener un fin (Diéguez, 2012, pp. 175-176).

Sin embargo, a principios del siglo pasado la controversia teleológica seguía activa con el vitalismo de Driesch y Bergson que proponían una en-

telequía o *élan vital* como propiedad interna responsable de dirigir a los seres vivientes hacia su objetivo. Propuesta que chocaba frontalmente con las explicaciones mecanicistas que intentaban explicar el funcionamiento de los organismos desde el punto de vista de sus componentes físicos individuales, en particular desde la genética (Allen & Neal, 2020).

Ya a mediados del siglo pasado se empezó a constatar que la aversión a toda teleología en biología reduce el campo de las explicaciones posibles. Las explicaciones teleológicas son consideradas valiosas, indispensables, y no reducibles a una causalidad de tipo físico (Godfrey-Smith, 2022). Esto en especial si se considera que la selección natural y la adaptación son procesos que persiguen un fin, y que los organismos vivos están orientados a un objetivo (Ruse, 1989). En línea con ello, un amplio número de expertos aceptan hoy que los sistemas vivos exhiben una teleología de carácter interno (Vane-Wright & Corning, 2023). Algo que afirma Jacques Monod (1979/1981) en su ensayo *El azar y la necesidad* al decir que “una propiedad que caracteriza sin excepción a todos los seres vivos [es] la de ser *objetos dotados de un proyecto*” (p. 21).

Para intentar solucionar esta situación, es decir, para evitar el uso de la palabra teleología, pero poder discutir sobre la evidente direccionalidad y propósito de lo vivo, es que Pittendrigh introduce la palabra teleonomía, que otros denominan como explicaciones “cuasi-teleológicas”. De esta forma se busca “purgar a la biología de cualquier vestigio de las causas finales aristotélicas, pero a la vez proveerla de un término aceptable para describir sistemas adaptables y dirigidos a un objetivo” (Allen & Neal, 2020). La teleonomía establece que la existencia de propósito estaría dada por leyes (*nomos*) propias de los organismos vivos. Literalmente la teleonomía se refiere a las leyes internas que dirigen a las entidades vivas hacia un objetivo, y se la considera como un sinónimo de la observación de que los seres vivos son autónomos y poseen la capacidad de desarrollarse como actividades dirigidas a un objetivo (Vane-Wright & Corning, 2023). El concepto de teleonomía en parte se adopta de la cibernética, ciencia que estudia los sistemas reguladores de máquinas autorreguladas, y del concepto de “autopoiesis” que se refiere a la capacidad de autoorganización y automantenimiento de los sistemas vivos y de esa forma busca explicaciones naturalizadas para explicar la conducta orientada a un objetivo de los seres vivos (Allen & Neal, 2020).

Aunque el concepto de teleonomía no ha sido tan ampliamente usado, sí quizás ha ayudado a una mejor definición y a una rehabilitación de la teleología y las explicaciones teleológicas. La clave para poder usar la teleología como parte de la biología sin violar las normas de la ciencia es conside-

rarla como un fenómeno que requiere ser explicado (por ejemplo, procesos dirigidos a un objetivo), y no como un tipo de explicación. El entender la teleología como un fenómeno a explicar, en base a la cibernética o como proceso autopoiético, es una explicación teleológica aceptable científicamente, que haría innecesario el uso del concepto teleonómico (Dresow & Love, 2023). Independiente de si la denominamos como teleonomía o teleología, aquí lo que se quiere es establecer como argumento en favor de la primera premisa de la quinta vía es que las explicaciones teleológicas pueden ser aceptadas en biología.

Los argumentos entregados en la sección anterior son en su mayoría evidencias experimentales que indican que el desarrollo embrionario es un proceso que tiene direccionalidad, y por tanto correspondería a una explicación teleológica científicamente aceptable. Al menos tres argumentos propuestos por Pezzulo & Levin (2016, pp. 3-4) se pueden esgrimir para defender la idea de que las razones entregadas para defender que el desarrollo embrionario es un proceso teleológico entendido científicamente:

- i) Los modelos *top-down* no presentan problemas teleológicos. Por el contrario, la direccionalidad hacia un objetivo se explica mecanicistamente en base a modelos y metodologías de tipo homeostáticas que han sido usadas exitosamente en diversas disciplinas, como por ejemplo la capacidad de autoorganización, la existencia de campos morfogénicos y el principio de mínima energía, descritos en las secciones previas.
- ii) Los argumentos ofrecidos no son del tipo *bottom-up*, lo que podría llevar a pensar que se está hablando de una suerte de causación final que estaría en contra de una concepción científica del tema. Sin embargo, hay que tener en consideración que las visiones meramente *bottom-up* están siendo desafiadas por teorías que consideran las interacciones a niveles micro-macro. Por ejemplo, la idea de que las causas eficientes pueden adscribirse a distintos niveles de un sistema es hoy ampliamente aceptada. Para una adecuada comprensión empírica de la realidad no se debe dejar fuera *a priori* ningún tipo de explicaciones. Por ello la necesaria incorporación de explicaciones de tipo *top-down* como las aquí descritas.
- iii) El uso de conceptos como control de tipo *feedback*, minimización de errores, y otros pueden ser usados de forma descriptiva y predictiva sin un compromiso ontológico del estado de dichas construcciones. En otras palabras, los científicos pueden describir sistemas biológicos como si tuviesen propósito, pero de forma operacional, y como herramientas que incrementan los metodologías para hacer predicciones. En

ese sentido por ejemplo la importancia de los conceptos de persistencia y plasticidad de sistemas dirigidos a un objetivo ya que pueden ser medidos empíricamente (Lee & McShea, 2020). Por ende, el criterio de validez de los modelos utilizados debería estar dado por su capacidad y éxito predictivo. Como se indicó anteriormente, ese es el caso cuando se utilizan modelos tipo *top-down* para simular el comportamiento dirigido a un objetivo del desarrollo embrionario.

En defensa de la idea de una teleología de carácter científico está la propuesta de una teleología interna. Esta establece que la finalidad o direccionalidad no es producto de una intención consciente, sino que es parte de un proceso natural. Los procesos homeostáticos o fisiológicos, como la mantención de la temperatura en animales o el mismo desarrollo embrionario, son ejemplos de una teleología interna que no tiene por qué estar en conflicto con la ciencia (Diéguez, 2012).

Es interesante volver sobre la idea de McShea (Babcock & McShea, 2021) y la teoría de campos descrita anteriormente. Este autor plantea que la aversión a la teleología se origina en un falso dilema y para ello defiende la idea de una teleología externalista basada en la teoría de campo. Como se describió anteriormente, la teoría de campos aplicaría a todos los sistemas teleológicos en biología e incluiría las nociones de persistencia y flexibilidad ya descritas. Los campos físicos descritos se caracterizan por su organización jerárquica, de forma anidada, en los que no todas las causas involucradas cuentan como direcciones de nivel superior, y, lo más importante, que pueden ser descritos en términos físicos e ingenieriles. A diferencia de la teleología natural aristotélica, McShea plantea que la teoría de campos se preocupa del sistema teleológico y no de su función, no es en ningún caso una metáfora, y tampoco se comprende como una herramienta meramente heurística. Aunque se habla aquí de una teleología externa basada en las fuerzas directrices de un campo, esta no apela a un agente externo y es compatible con la idea de teleología interna recién descrita. En biología, lo teleológico se refiere a un proceso natural propio de cada organismo.

La biología del desarrollo sería quizás el proceso al que mejor se aplica la teoría de campo correspondiendo a un proceso teleológico arquetípico. Este corresponde a un proceso en que células y tejidos se mueven y diferencian en busca de un futuro estado final al que parecen predestinadas. Proceso que estaría guiado a su objetivo final por los CM que son campos externos a las células, pero internos al embrión.

En conclusión, a lo largo de esta sección se ha ofrecido argumentos conceptuales, teóricos y empíricos para sustentar que el desarrollo embrionario es un proceso teleológico. Y, como se discute en esta última parte, con teleología nos referimos a una teleología científica en que la direccionalidad es parte del desarrollo embrionario.

Desarrollo embrionario teleológico: una evidencia de la primera premisa de la quinta vía

Las cinco vías de santo Tomás de Aquino, como se indicó previamente, se caracterizan por iniciarse con una premisa basada en la experiencia sensible que sirve de sustento para el razonamiento filosófico posterior. Premisas que en general están basadas en la observación del mundo natural, y que por lo tanto podrían ser verificadas empíricamente. En esta sección se propone recoger la evidencia descrita en la sección anterior respecto a que el desarrollo embrionario es un proceso teleológico, y mostrar que estas pruebas permiten validar empíricamente, al menos para un caso particular, la primera premisa de la quinta vía.

Como ya se ha indicado, esta primera premisa establece que:

las cosas que carecen de conocimiento, como los cuerpos naturales, obran por un fin, como se pone de manifiesto porque siempre o muy frecuentemente obran de la misma manera para conseguir lo mejor; de ahí que llegan al fin no por azar, sino intencionadamente. (*S. Th.* I, q. 2, a. 3)

Como se indicó en la segunda sección, la idea establecida por el neodarwinismo es que en la evolución de las especies todo sería fruto del azar, por lo que ninguna especie ni ningún proceso de evolución de las especies tendría direccionalidad o finalidad. De ser así quedaría establecida la invalidez empírica de la primera premisa de la quinta vía.

En lo anterior radica la importancia de este artículo que es determinar si hay evidencia(s) empírica(s) que muestre(n) que existen procesos biológicos que sí poseen finalidad y direccionalidad. Las evidencias empíricas descritas que incluyen la capacidad de autoregulación y autoorganización de los embriones, la existencia de CM que dirigen la formación del SNC, y las simulaciones computacionales del tipo *top-down* que demuestran que el desarrollo puede ser modelado como un proceso dirigido a un objetivo permiten

establecer fehacientemente que el desarrollo embrionario es un proceso que tiene una dirección y una finalidad.

De esta manera se valida empíricamente la afirmación de la primera premisa respecto de la existencia de “cuerpos naturales [que] obran por un fin”. Cuerpos naturales en este caso corresponderían a embriones de diversas especies, que obran con un fin. Esto último equivaldría a su capacidad, mediante un proceso morfogenético, de desarrollarse con el objetivo de alcanzar un blanco morfológico. Es decir, el poder dar lugar a un organismo con características claramente predeterminadas. Más aún, se ha descrito clara y extensamente que el desarrollo embrionario es un proceso dirigido a un objetivo, que sería el equivalente a decir que obran por un fin. Concepto que también fue establecido por Waddington al decir que una de las características que diferencia a un ser vivo de uno inanimado es el poseer un fin.

Igualmente resulta de interés reflexionar, en base a la evidencia descrita, respecto de las implicancias de la afirmación de la primera premisa que indica que los cuerpos naturales “siempre o muy frecuentemente obran de la misma manera para conseguir lo mejor”. Lo primero a analizar de esta parte de la primera premisa es la idea de que obran de la misma manera. El desarrollo embrionario es un proceso altamente estereotipado y, por el hecho de perseguir de forma persistente un objetivo, esto es un blanco morfológico, es capaz de llegar a dicho objetivo incluso si hay perturbaciones externas. Persistencia a la que se suma la plasticidad para que, a pesar de tener que acomodar la trayectoria, finalmente pueda llegar de forma muy frecuente a su destino (blanco) final. En palabras de Waddington (1957/2015), el que los cuerpos naturales, en este caso los embriones, obren de la misma manera es fruto de la *homeorhesis*, es decir, a la tendencia del proceso de desarrollo a mantener una cierta dirección, a persistir en un objetivo, basado en un paisaje epigenético canalizado.

El alcanzar este blanco sería equivalente a *conseguir lo mejor* para ese cuerpo natural. La idea de conseguir lo mejor para cada cuerpo natural está desarrollada dentro de la metodología del principio de energía libre aplicada en el análisis de modelamiento *top-down* que se utilizó para demostrar que el desarrollo es un proceso dirigido a un objetivo. En ese sentido dicho principio considera el concepto de buenos estados que consiste en la capacidad de sistemas dirigidos a un objetivo (cerebro, desarrollo embrionario) de realizar inferencias activas que le permitan minimizar la distancia entre su estado actual y el buen estado hacia el que se dirigen. Este buen estado en el

caso del desarrollo embrionario consistiría en poder alcanzar el blanco morfogenético respectivo. En palabras de santo Tomás, se puede entonces proponer que conseguir lo mejor sería alcanzar el correspondiente buen estado.

Es también interesante constatar que la primera premisa de la quinta vía deja espacio abierto a que no todos los cuerpos naturales tengan que obrar por un fin para que esta premisa sea válida. En ella no se exige que el alcance del objetivo final deba ocurrir siempre para que la primera premisa sea válida. Por el contrario, establece claramente que basta con que existan cuerpos naturales que alcancen un fin “muy frecuentemente”. Esto es a lo que Tomás se refiere cuando indica que para que se cumpla esta premisa le basta con una teleología particular. Esta afirmación es relevante para compatibilizar el indiscutible papel que tiene el azar en el proceso evolutivo con la existencia de direccionalidad. Por esta razón, para santo Tomás la existencia del azar no sería contradictoria con la quinta vía, en la medida en que existan casos de cuerpos naturales dirigidos a un fin, como el que aquí se ha descrito.

Más aún, como se describió anteriormente, la propia SN es un proceso que tiene un claro fin –seleccionar los organismos mejor preparados para sobrevivir– y que por ello podría considerarse como la *antítesis del azar*. Por lo tanto, la presencia de procesos dirigidos a un fin entremezclados con procesos azarosos pareciera ser algo propio de la naturaleza. Esto implica que la presencia de regularidades que observamos no tiene por qué atribuirse sólo al azar. En palabras de Edward Feser, la sola existencia del azar no justifica eliminar toda causa final, ya que el azar ocurre en un contexto de muchos factores causales. La exigencia de la primera premisa de la quinta vía de que basta con que los cuerpos naturales muy frecuentemente, pero no necesariamente siempre, estén dirigidos a un fin, o que no siempre lo alcancen, permite que la demostración de que el desarrollo embrionario es un proceso teleológico, sea suficiente para validar empíricamente dicha premisa, incluso considerando la componente azarosa de la evolución. En esa misma línea Waddington, con su metáfora de la pila de ladrillos, se opone con fuerza a aceptar que todo el proceso evolutivo sea fruto del azar, y plantea que es el mismo desarrollo embrionario el que da direccionalidad al proceso evolutivo. Esto reafirma la compatibilidad de procesos dirigidos a un fin y de procesos azarosos como parte de la propia naturaleza.

En resumen, la demostración de que el desarrollo embrionario es un proceso teleológico permite confirmar la hipótesis de este artículo al mostrarse evidencias empíricas que validan la primera premisa de la quinta vía, al menos

para algunos seres naturales. Esto permite contrarrestar la idea instalada por el neodarwinismo de que todo sería fruto del azar, y que, en la evolución, y en biología en general, no existirían procesos con direccionalidad o finalidad.

Conclusiones

En este artículo se ha propuesto como hipótesis que el desarrollo embrionario es un proceso con características teleológicas, es decir con direccionalidad, lo que constituye un ejemplo de la existencia de cuerpos naturales que están dirigidos hacia un fin. La confirmación de lo anterior permitiría dar sustento, al menos mínimo, a la validez de la primera premisa de la quinta vía de Tomás de Aquino.

Una primera conclusión de este trabajo, y la principal, es que las evidencias descritas permiten validar la hipótesis propuesta, esto es que el desarrollo embrionario es un proceso teleológico, que tiene direccionalidad y que está dirigido a un fin. El sustento de dicha conclusión viene dado por un conjunto de evidencias empíricas que se pueden agrupar en tres líneas principales: i) la capacidad de autoregulación y autoorganización de los embriones que ha sido demostrada *in vivo* e *in vitro*, así como también la autorregulación de otros procesos morfogénéticos como la regeneración tisular; ii) la existencia de campos morfogénéticos que dirigen la formación del sistema nervioso central, campos morfogénéticos que son intrínsecos al embrión y que le dan persistencia y flexibilidad al proceso de desarrollo; y iii) las simulaciones computacionales del tipo *top-down* que demuestran que el desarrollo embrionario puede ser modelado como un proceso dirigido a un objetivo.

En apoyo a la hipótesis de que el desarrollo es un proceso teleológico, y sumado a estas evidencias empíricas, está la propuesta conceptual de Waddington. Este autor, un reconocido biólogo del desarrollo, fue uno de los primeros en proponer que el desarrollo embrionario es un proceso que da direccionalidad al proceso evolutivo, dejando este de ser un proceso meramente azaroso. Establece la idea de canalización, esto es, que el desarrollo sigue rutas preestablecidas, todo lo cual refuerza la conclusión de este trabajo.

En la valoración de la conclusión de que el desarrollo embrionario es un proceso teleológico es importante tener en consideración que aquí nos referimos a una teleología que hemos descrito como de carácter científico. La autorregulación, la presencia de campos morfogénéticos que dirigen el desarrollo hacia un blanco morfogénético y el hecho de que el desarrollo sea un proceso dirigido a un objetivo permiten afirmar que la conclusión

de la existencia de direccionalidad se fundamenta de forma científica. Esto significa que la direccionalidad es una parte intrínseca del proceso mismo de desarrollo embrionario. Usando una terminología propia de santo Tomás se podría decir que la causa formal de la cual dicha direccionalidad proviene se vislumbra en los campos morfogénéticos presentes en el embrión.

Por lo tanto, las evidencias científicas de que el desarrollo embrionario es teleológico permiten validar la primera premisa de la quinta vía, esto es, que existen cuerpos naturales que obran dirigidos hacia un fin. De esta manera se puede verificar la veracidad de la hipótesis planteada. Esto permite contraargumentar contra la idea de que todo en la evolución es fruto del azar, lo que invalidaría la quinta vía de santo Tomás.

Una conclusión muy importante es precisar que lo demostrado en este artículo no se opone ni es contradictorio con la teoría de la evolución. La primera premisa de la quinta vía considera como suficiente que algunos cuerpos naturales actúen dirigidos a un fin. De esta forma el hecho de que el desarrollo embrionario sea teleológico es compatible con la existencia del azar en la evolución, para la cual existe un gran volumen de evidencia científica. Esta idea es central para entender que el argumento de este artículo busca dar evidencia de la validez de la primera premisa de la quinta vía, utilizando para ello resultados de la ciencia moderna en el área de la biología del desarrollo.

Por lo tanto, es importante dejar claro que la hipótesis de este artículo no implica negar la existencia del azar en el proceso evolutivo de las especies, y menos aún descartar la existencia de la evolución como un proceso central de la biología. A diferencia de las posturas creacionistas o del diseño inteligente, lo propuesto permite un diálogo fecundo entre la filosofía y la ciencia, ofreciendo una plataforma para el encuentro entre fe y razón.

Referencias

- Allen, C. & Neal, J. (2020). Teleological Notions in Biology. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2020 ed.). <https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/teleology-biology/>
- Artigas, M. (2008). *Filosofía de la naturaleza*. EUNSA.
- Babcock, G. & McShea, D.W. (2021). An externalist teleology. *Synthese*, 199, 8755-8780. <https://doi.org/10.1007/s11229-021-03181-w>
- . (2023). Goal-directedness and the Field Concept. *Philosophy of Science* 91(5), 1435-1444. <https://doi.org/10.1017/psa.2023.121>
- Darwin, C. (2008). *El origen de las especies*. Espasa Calpe.

- de Asúa, M. (2015). *La evolución de la vida en la tierra*. Ediciones Logos.
- Diéguez, A. (2012). *La vida bajo escrutinio*. Biblioteca Buridá.
- Dresow, M. & Love, A.C. (2023). Teleonomy: Revisiting a Proposed Conceptual Replacement for Teleology. *Biological Theory*, 18(2), 101-113. <https://doi.org/10.1007/s13752-022-00424-y>
- Driesch, H. (1908). *The Science and Philosophy of the Organism*. A. & C. Black.
- Feser, E. (2020). *Aquinas*. One World Publications.
- Friston, K., Levin, M., Sengupta, B. & Pezzulo, G. (2015). Knowing One's Place: A Free-energy Approach to Pattern Regulation. *J. R. Soc. Interface*, 12, 20141383. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.1383>
- Futuyma, D.G. & Kirkpatrick, M. (2017). *Evolution* (4th. ed.). Sinauer Associates.
- Godfrey-Smith, P. (2022). *Filosofía de la Biología*. Bauplan Books.
- Gould, S. J. (1999). *La vida maravillosa*. Editorial Crítica.
- Heylighen, F. (2023). The Meaning and Origin of Goal-directedness: a Dynamical System Perspective. *Biological Journal of the Linnean Society*, 139(4), 370-387. <https://doi.org/10.1093/biolinnean/blac060>
- Huxley, J. S. & De Beer, G.R. (1934). *The Elements of Experimental Embryology*. Cambridge University Press.
- Kampourakis, K. (2020). *Understanding Evolution*. Cambridge University Press.
- Lee, J. G. & McShea, D.W. (2020). Operationalizing Goal Directedness: an Empirical Route to Advancing a Philosophical Discussion. *Philos. Theor. Pract. Biol.*, 12(5). <https://doi.org/10.3998/ptpbio.16039257.0012.005>
- Levin, M. (2012). Morphogenetic Fields in Embryogenesis, Regeneration, and Cancer: Non-local Control of Complex Patterning. *BioSystems*, 109(3), 243-261. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2012.04.005>
- . (2021). Bioelectric Signaling: Reprogrammable Circuits Underlying Embryogenesis, Regeneration, and Cancer. *Cell*, 184(8), 1971-1989. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.02.034>
- Maienschein, J. (1994). *A Conceptual History of Modern Embryology*. John Hopkins University Press.
- McShea, D.W. (2012). Upper-directed Systems: A New Approach to Teleology in Biology. *Biol. Philos.*, 27, 663-684. <https://doi.org/10.1007/s10539-012-9326-2>
- Monod, J. (1981). *El azar y la necesidad* (original publicado en 1970). Tusquets Editores.
- Newman, S. A. (2019). Inherency of Form and Function in Animal Development and Evolution. *Frontiers in Physiology*, 10, 702. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00702>

- . (2022). Self-organization in Embryonic Development: Myth and Reality. In A. Dambricourt Malassé (Ed.), *Self-organization as a New Paradigm in Evolutionary Biology*. (pp. 195-222). Springer.
- . (2023). Form, Function, Agency: Sources of Natural Purpose in Animal Evolution. In P. A. Corning, S. A. Kauffman, D. Noble, J. A. Shapiro, R. I. Vane-Wright, & A. Pross (Eds.), *Evolution "On purpose", Teleonomy in Living Systems* (pp. 199-219). MIT Press.
- Pai, V. P., Lemire, J. M., Paré, J. F., Lin, G., Chen, Y. & Levin, M. (2015). Endogenous Gradients of Resting Potential Instructively Pattern Embryonic Neural Tissue Via Notch Signaling and Regulation of Proliferation. *Journal of Neuroscience*, 35(10), 4366-4385. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1877-14.2015>
- Pai, V.P., Pietak, A., Willocq, V., Ye, B., Shi, N.Q. & Levin, M. (2018). HCN2 Rescues Brain Defects by Enforcing Endogenous Voltage Pre-patterns. *Nature Communications*, 9, 998. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03334-5>
- Pezzulo, G. & Levin, M. (2016). Top-down Models in Biology: Explanation and Control of Complex Living Systems above Molecular Level. *J. R. Soc. Interface*, 13, 20160555. <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0555>
- Ramsey, G. & Pence, C.H. (2016). Chance in Evolution from Darwin to Contemporary Biology. In G. Ramsey & C. H. Pence (Eds.), *Chance in evolution* (pp. 1-11). The University of Chicago Press.
- Ruse, M. (1989). Teleology in Biology: is it a Cause of Concern. *Trends Ecol. Evol.*, 4(2), 51-54. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(89\)90143-2](https://doi.org/10.1016/0169-5347(89)90143-2)
- Steinberg, M.S. (1998). Goal-directedness in Embryonic Development. *Integrative Biology*, 1, 49-59.
- Tomás de Aquino. (2001). *Suma Teológica* (Damián Byrne, O.P., pres.). Biblioteca de Autores Cristianos.
- Vane-Wright, R.I. & Corning, P.A. (2023). Teleonomy in Living Systems: an Overview. *Biological Journal of the Linnean Society*, 139(4), 341-356. <https://doi.org/10.1093/biolinnean/blad037>
- Waddington, C.H. (2015). *The Strategy of the Genes* (original publicado en 1957). Routledge.
- Weber, M. (2022). *Philosophy of Developmental Biology*. Cambridge University Press.



Publicado bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0 Internacional