

Víctor Rodríguez - Marisa Velasco - Pío García
Compiladores

Epistemología y prácticas científicas

Rodríguez, Víctor

Epistemología y prácticas científicas / Víctor Rodríguez; Marisa Velasco; Pío García; compilado por Víctor Rodríguez; Marisa Velasco; Pío García; editado por Víctor Rodríguez; Marisa Velasco; Pío García. - 1a ed.-Córdoba: Editorial de la UNC, 2015.

186 p.; 21 x 14 cm.

ISBN 978-987-707-010-1

1. Epistemología. 2. Actividad Científica. I. Rodríguez, Víctor, comp. II. Velasco, Marisa, comp. III. García, Pío, comp. IV. Rodríguez, Víctor, ed. V. Velasco, Marisa, ed. VI. García, Pío, ed.

CDD 121

Fecha de catalogación: Septiembre de 2015

1° Edición

Impreso en Argentina

ISBN: 978-987-707-010-1

Coordinación editorial: Víctor Rodríguez, Marisa Velasco, Pío García

Diseño de interior y tapa: Mariana Biasutti López
nardoambar@gmail.com

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de tapa, puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio, ya sea electrónico, químico, óptico, de grabación o por fotocopia sin autorización previa.

Índice

Prólogo	5
Simulaciones computacionales en la literatura filosófica actual J. Durán	9
Un abordaje epistemológico de la integración neurocientífica El caso de los estudios EEG / RMf N. Venturelli	41
Abducción, evidencia y observación en astronomía M. Bozzoli	73
Una visión epistemológica sobre la medición en psicología. Notas sobre el distanciamiento con la tradición de medición física D. Rabinovich	99
Simulaciones computacionales y modelos: consideraciones metodológicas P. García	117
Representaciones de las formas en los seres vivos: la evolución de los modelos V. Rodríguez	135
La analogía como recurso heurístico: el caso de Planck P. Giglio - A. Ilcic	153
Si de entender se trata: el rol de la visualización en el procesamiento de datos A. Ilcic - J. Reynoso	171

Representaciones de las formas en los seres vivos: la evolución de los modelos*

V. Rodríguez

En este trabajo se atiende fundamentalmente a dos preguntas. La primera es ¿cómo surgen las formas que tienen los seres vivos? La segunda: ¿qué lectura se puede hacer de este tema desde una filosofía de las prácticas científicas? Como la primera pregunta es demasiado abarcadora, se recortará la estrategia de respuesta a un pequeño conjunto de temas relacionados con ella. La segunda pregunta está influenciada por la línea general de investigación que está llevando adelante actualmente el equipo de investigación del cual forma parte el autor. El artículo va a girar principalmente en torno de la contribución al tema por parte de Alan Turing y a algunos desarrollos anteriores y posteriores relacionados.

La primera es una pregunta simple y profunda, como puede apreciarse en el lugar de la misma en la literatura especializada sobre el tema. Los intentos de respuesta a ella conducen a una larga historia, en general, impregnada de hermosos paisajes visuales y conceptuales. El historiador debe optar de algún modo entre su predilección por la naturaleza o por la cultura al abordar el tema. El escenario que se ha ido montando desde la antigüedad al respecto ofrece un menú de oscilaciones que dan prioridad a uno u otro aspecto. Hay numerosas estrategias de ataque para intentar un esbozo de respuesta, pero también numerosas dimensiones posibles para una mirada epistemológica, o por qué no, estética. ¿Por qué tenemos cinco dedos en una mano? ¿Por qué las rayas de la cebra? Es comprensible que una multiplicidad de preguntas de este tipo inunde los textos dedicados a la morfogénesis. Y ellos son en realidad, muchos. Como el camino ha sido largo y variado, la tentación de una exploración amplia cede el

* Rodríguez, V. - Velasco, M. - García, P. - (Comps.), 2015, Epistemología y prácticas científicas. ISBN 978-987-707-010-1

protagonismo a una focalización en ciertos episodios históricamente significativos. El recorte aquí es abrupto y sólo es justificable por las dimensiones de este trabajo y por la emergencia de enfoques que han marcado estilos posteriores de investigación.

Respecto de la segunda pregunta, el escrito intenta ser sensible al arte de la modelización y concluye con algunas consideraciones sobre el rol de los modelos en las prácticas científicas involucradas.

La biología y las formas

Tanto biólogos, como filósofos o matemáticos, se han ocupado reiteradamente del papel de las formas en los seres vivos. Esto ha generado varias corrientes de investigación que de un modo u otro todavía subsisten. Siempre impactó la visión de las formas geométricas, las espirales, o las series singulares asociadas con plantas. La especulación al respecto creció de modo desmedido con el correr del tiempo, generando visiones neo-pitagóricas o neo-platónicas, arquitecturas en torno de la divina proporción, o el ensamblaje de procesos articulados por los números de Fibonacci, por citar sólo algunos marcos conceptuales importantes. Por otro lado, también es cierto que matemáticas y biología han seguido rumbos bastante esquivos a lo largo de los años. Es bastante difícil mantener un equilibrio entre ambas disciplinas. El naturalismo de los biólogos no ha dado lugar a grandes avances basados en la matemática. Por otro lado, tanto filósofos como matemáticos han tenido problemas para imponer la dinámica de las formas por encima de la evolución de las especies, o simplemente, de los procesos de cambio. Aunque la estética de las proporciones constituyó un fuerte atractivo epistémico y ejerció cierta seducción sobre el pensamiento renacentista y moderno acerca de la vida en la tierra, puede decirse que recién en este último tiempo comienzan a surgir acercamientos de interés epistemológico entre matemáticas y biología, al menos en un ámbito de tan buena dinámica conceptual como es el caso de la morfogénesis. Un libro introductorio de estilo divulgativo sobre estas complejas relaciones es (Stewart, 2011).

Como éste no es un trabajo estrictamente histórico, se saltarán varios episodios que podrían constituir ejemplos ilustrativos de estos enfoques. Pero, para acercarnos a la percepción actual de las relaciones entre forma y función en los seres vivos, hace falta considerar de algún modo ciertas aventuras previas sobre estas relaciones; en particular, entre formas biológicas y funciones matemáticas. A esto habrá que sumarle necesariamente algo sobre los fragmentos de conceptualización de los procesos de crecimiento de los organismos vivos. La morfogénesis es todavía en muchos aspectos un problema abierto y, atendiendo a la enorme diversidad de la vida, ofrece una gama exuberante de interrogantes a disposición de los investigadores contemporáneos. Se estima que no es una exageración considerar a la morfogénesis como uno de los más importantes y delicados problemas de la biología teórica. La complejidad de su tratamiento le otorga un estatuto cognoscitivo tan significativo como el análisis de los sistemas inmunológicos, o el *framework* operativo de las neurociencias, o el abordaje de ciertos temas ambientales y ecosistemas asociados. En este sentido, cabe señalar aquí que las pretensiones de este ensayo son realmente limitadas. Dentro de la inmensa actividad científica desplegada en torno de la génesis de las formas biológicas, se intenta solamente observar el rol de los modelos en partes de esta dinámica teórica, empírica y también de simulación computacional.

En consonancia con lo recién expresado, se prestará atención solamente a un pequeño conjunto de casos históricos, tomados como escenarios que ilustran una dinámica teórica motivada por un enigma de bases epistémicas y estéticas. Aunque los cortes y las singularidades históricas son generalmente caricaturas que suelen ocultar los verdaderos procesos en juego, no parece inoportuno comenzar por Goethe. Al respecto, se intentará mostrar que hay un hilo conductor desde sus preocupaciones hasta nuestra época.

El escritor alemán mencionado, que acuñó el término "morfología", pensaba en la reducción de la forma a un arquetipo único, como lo era para él la hoja. Hay que destacar aquí la afinidad conceptual suya con otros pensadores de la época, como Geoffroy Saint-Hilaire, para quien la vértebra ocupaba un protagonismo similar

en el mundo de los animales. La idea de una forma arquetípica generadora única recibe un fuerte apoyo expresivo en el trabajo de Goethe conocido vulgarmente como la metamorfosis de las plantas (Goethe, 1790, 1998). Pero sus incursiones en el ámbito animal, aunque menores, también dan cuenta de esa motivación y de ese enfoque conceptual. Tal es el caso con el hueso pre-maxilar humano y su presencia en otros mamíferos. Como ha sido dicho numerosas veces, esto reforzó su convicción sobre la unidad de tipo. Es difícil innovar sobre el perfil de este Goethe científico. Ha habido demasiada historia sobre él; pero es de destacar, sobre todo en el reino de la botánica, su objetivo de reducir la variedad a un arquetipo universal. En su caso, la hoja era una forma arquetípica para las zonas derivadas de un tallo principal, desde los cotiledones a los frutos. Aunque no es éste el espacio para entrar en detalles sobre su modo de abordaje teórico, hay claramente un aire platónico en su concepción de la forma. Los biólogos interesados en la historia de su disciplina han puesto énfasis en diversos matices de este platonismo. Aquí no interesa tanto ese sesgo filosófico como la conceptualización de la forma a través de las transformaciones sucesivas. Para ponerlo en boca de Goethe, “deberíamos disponer de un término general para designar este órgano tan diversamente metamorfoseado y con el que comparar todas las manifestaciones de la forma. [...] Podríamos afirmar de manera equivalente que un estambre es un pétalo contraído o que un pétalo es un estambre expandido...”. Esta cita es tomada del erudito y extenso libro de S. J. Gould (2002, 2004).

Continuando con otras pinceladas alrededor del tema de las formas, el contexto generado por la obra de D' Arcy Thompson, *Sobre el crecimiento y la forma* (1917, 1942), es otro hito en el programa formalista. Aún cuando ha corrido mucha tinta sobre esta obra y sobre sus consecuencias, hay varios aspectos en ese programa de investigación que merecen ser destacados. En primer lugar, es importante el objetivo del autor. Dice al respecto, “consideraré cumplido mi objetivo si he sido capaz de demostrar que existe cierto aspecto matemático de la morfología, al que todavía prestan poca atención los especialistas, que es complementario de la labor

descriptiva y muy útil, por no decir esencial, para estudiar y comprender adecuadamente la Forma". En segundo lugar, insinúa un cambio en el campo de la representación de los seres vivos. "El físico proclama en voz alta que los fenómenos físicos que nos salen al paso no son menos bellos ni menos variados que los que despiertan nuestra admiración en los seres vivos. Las olas del mar, las pequeñas ondulaciones de la costa, la curva de una playa entre dos promontorios, la silueta de las colinas, la forma de las nubes, y tantos otros problemas de morfología que el físico puede interpretar y resolver con mayor o menor facilidad...Lo mismo sucede con las formas materiales de los seres vivos. Células y tejidos, caparazones y huesos, hojas y flores, son otras tantas porciones de materia, y sus partículas se mueven, moldean y configuran en obediencia a las leyes de la física...Sus problemas de forma son, en primera instancia, matemáticos, y sus problemas de crecimiento esencialmente físicos, con lo que el morfológico se convierte *ipso facto* en un estudioso de las ciencias físicas" Por supuesto, se recortan aquí numerosos pasajes altamente significativos de su pensamiento, pero para los fines de este ensayo, no es posible ignorar esta reflexión suya: "El morfológico cuenta con la ayuda de muchas teorías fascinantes dentro de los límites de su propia ciencia que, aunque algo carente de exactitud, sirve al propósito de ordenar sus pensamientos y sugerir nuevos objetos de investigación". Es difícil pensar en una reflexión más adecuada a la ciencia actual. En D'Arcy Thompson encontramos varias cuestiones que merecen ser destacadas; por ejemplo, una mirada de la matemática funcional, una asociación de la forma con la eficiencia mecánica, una valoración de la importancia de una teoría de las transformaciones, y un desequilibrio entre los objetivos epistemológicos del autor y el alcance de la matemática empleada. De cualquier modo, hoy podemos ver claramente que su programa no ha muerto, pero le han seguido numerosos intentos de actualizar las bases matemáticas involucradas en él.

El artículo de Turing

Poco tiempo antes de su muerte en 1954, Alan Turing escribió un artículo sobre las bases químicas de la morfogénesis (Turing, 1952). Tanto a historiadores como a filósofos ha llamado la atención el perfil de este artículo. Podría decirse que es un trabajo algo ajeno a las matemáticas, por el alto contenido biológico, pero también extraño para los biólogos, por la ostensible presencia de las matemáticas en él. Poco tiene que ver con las principales contribuciones notables con las que se asocia a su autor, de las cuales no nos ocuparemos aquí. Se trata de un trabajo visionario, valiente y en alguna medida, osado, sobre las relaciones entre matemáticas y seres vivos. Hoy la cultura occidental atiende a la complejidad del jaguar, o a las manchas del leopardo, pero a mediados del siglo pasado esa mirada era toda una brisa fresca sobre un naturalismo que, aunque soberbio y maduro, impresionaba como limitado para dar cuenta de la dinámica de cambio en los seres vivos. Gracias a este aporte, el embrión y el crecimiento de los seres vivos cambiaron de protagonismo en la conceptualización de la biología y, además, la forma cedía a un nuevo tratamiento matemático.

Veamos, como ilustración, el índice del trabajo citado:

- 1- Un modelo del embrión- morfógenos
 - 2- Base matemática requerida
 - 3- Reacciones químicas
 - 4- La ruptura de la simetría y la homogeneidad
 - 5- Organismos orientados hacia la izquierda y hacia la derecha
 - 6- Reacciones y difusión en un anillo de células
 - 7- Anillos continuos de un tejido
 - 8- Tipos de comportamiento asintótico en un anillo luego de un lapso de tiempo
 - 9- Consideraciones posteriores sobre la matemática del anillo
 - 10- Un ejemplo numérico
 - 11- Replanteo e interpretación biológica de los resultados
 - 12- Ondas químicas sobre esferas. La gastrulación
 - 13- Teoría no-lineal. Uso de las computadoras digitales
- Referencias

Empezando por el final, las referencias no son muchas; solo seis. Una sobre patrones del desarrollo, otra sobre la permeabilidad de las

membranas, una obra clásica de J. Jeans sobre la teoría matemática de la elasticidad y el magnetismo, una sobre reacciones enzimáticas, la clásica obra de D'Arcy Thompson, y un libro de Waddington citado más adelante. En cuanto a las matemáticas, como puede apreciarse en el artículo y el mismo Turing señala, las secciones 5, 10 y 13 probablemente sólo puedan ser seguidas por alguien con formación matemática. No obstante, sería un error concebir al resto del artículo como carente de ella. Aunque no se pretende aquí entrar en detalles finos acerca de estos aspectos matemáticos, se harán algunas consideraciones sobre el alcance conceptual de ciertas expresiones que aparecen en él.

Como deja ver ese índice, la ruptura de simetría y las transiciones desde la homogeneidad cobran un nuevo rol protagónico y permiten un enfoque sumamente original y una fuente potencial de heurísticas. Se conjetura aquí que este enfoque es el efecto de una sólida formación en matemática clásica, de una curiosidad natural bastante intensa y de una sólida cultura computacional. Lo tercero es obvio, Lo primero y lo segundo pueden extraerse de sus biógrafos. En particular, en lo referido a matemáticas, sus aventuras en torno de la conjetura de Riemann, -uno de los temas abiertos más difíciles de la disciplina, lo acompañaron durante largos años. Hay que recordar que esta conjetura está asociada con la distribución de los números primos, un tema que clama por la presencia de patrones en la distribución de ellos y que está aún hoy parcialmente sin resolver.

Es de remarcar en esta lectura de Turing que una curiosidad especial lo acompañaba desde sus años juveniles, como lo atestiguan sus mejores biógrafos. Por otro lado, también es atendible que tanto a los matemáticos como a los expertos en cripto-análisis les encanta la búsqueda de *patterns* en masas informes de datos, pero de allí a la explicación sobre el por qué de las manchas en los animales, o sobre la génesis de las formas en los seres vivos, hay una distancia considerable. Los filósofos suelen llamar a este dominio "contexto de descubrimiento" o "psicología de la invención", pero aún atendiendo a estas nomenclaturas con sus respectivos significados, quedan incógnitas sobre el motor de su vasta curiosidad. Cabe acotar que ya en

1927, muy joven, había estudiado con un amigo el tratamiento matemático de las reacciones químicas mediante ecuaciones diferenciales. En cuanto a sus reflexiones sobre la morfogénesis, sus ideas pueden rastrearse, además de en el artículo citado, en otros borradores que se conservan hoy en sus archivos: www.turingarchive.org

Por otra parte, la búsqueda de un supuesto orden tiene, en general, conexión con los intentos de explicación de los aparentes desórdenes e irregularidades dentro del ámbito de las matemáticas. El caso que nos ocupa es más complicado todavía; aunque las manchas son irregularidades, sin embargo, ¡cuán regulares pueden ser ellas!

Su estrategia de ataque fue realmente original. Giró en torno de un modelo de tipo físico-químico con sus respectivas ecuaciones, a los fines de dar cuenta de la explicación buscada. En realidad, entre lo mecánico y lo químico, dio prioridad a lo segundo. Por esta vía, las ecuaciones de reacción-difusión se instalaron para cumplir un rol paradigmático en la segunda mitad del siglo XX y hasta nuestros días. Ya se dirá algo más sobre ellas, pero en este momento conviene atender a los motores de su curiosidad, la cual trascendía a lo ofrecido por las matemáticas en uso. Una buena ayuda la aporta la observación dirigida. La curiosidad y la buena observación suelen ir de la mano. En el caso de Turing, la siguiente reflexión parece adecuada como para ilustrar esta cuestión:

“La Hydra parece una anémona de mar, pero vive en agua dulce y posee de cinco a diez tentáculos. Si se corta una parte de la Hydra, esta parte se reorganiza para formar un nuevo organismo completo. Durante este proceso, el organismo adopta la forma de un tubo, abierto y ligeramente ensanchado por el lado de la cabeza, y cerrado por el otro extremo. El conjunto todavía tiene una simetría circular. Posteriormente, la simetría desaparece y se observa una coloración específica que tiene la capacidad de resaltar un cierto número de placas junto a la cabeza. Estas placas se manifiestan en los puntos en que aparecerán los tentáculos” (Turing, 1952). En realidad, cabe aclarar que luego de este párrafo, Turing cita a otro autor, (Child, 1941), lo que deja la duda de si observó directamente el fenómeno, o se basó en

observaciones ajenas. En cualquier caso, su atención al caso muestra su interés por fenómenos naturales de alta complejidad.

Es una hipótesis de este trabajo aquí que esta capacidad de observación y este interés por el mundo natural aportan la materia prima para el despliegue del arsenal técnico de un matemático competente. El modelo funcional, aunque muy importante epistémicamente, es un corolario. En el caso que nos ocupa, quizás un punto tan significativo como su génesis, es el derrotero que siguió dicho modelo, o mejor dicho toda esa familia de modelos, ya que, como suele suceder con los modelos matemáticos, el nivel de generalidad profunda de los mismos no siempre aporta sus principales réditos frente al caso específico considerado. Como dijo alguien, “hacia los años setenta la mayoría de los biólogos estaban cansados de encontrar pautas de Turing que no lo eran, y habían pasado de ello”. Las investigaciones aludidas en esta cita insinuaban que ese primer trabajo sobre el desarrollo de pautas y formas era demasiado teórico para la biología en uso de los biólogos de la época. Pero ello no implicaba que debía abandonarse el enfoque programático general en el ámbito de la investigación científica. Parámetro más, parámetro menos, las ecuaciones de Turing generaron una familia de enfoques, con un modelo epistémico de perfil similar.

Simplificando su complejidad inherente, podríamos decir que el modelo de reacción-difusión (R-D) es un modelo matemático elaborado por un matemático pero basado en leyes físicas conocidas. La historia de la difusión ofrece buenas exposiciones monográficas y claramente nos lleva por otros terrenos de la física, pero aunque no es éste el lugar para intentar profundizar los ‘aires de familia’ entre campos conceptuales, ayuda a la comprensión de la herramienta elegida por Turing alguna versión de lo sucedido desde Fourier y Laplace. Como no vamos a entrar en detalles aquí, se sugiere al lector interesado la lectura histórica de Narasimhan (2009).

Basándose en sus consideraciones sobre el modelo R-D, Turing investigó el comportamiento de un sistema hipotético compuesto por dos clases de sustancias químicas. Más allá de la originalidad del enfoque, esta estrategia basada en entidades vagas, -sus morfógenos,

era bastante ortodoxa para mediados del siglo XX. Al respecto, Turing es explícito sobre la incidencia en su pensamiento de los “evocadores” de Waddington (1940). De todos modos, es obvio que se desconocía buena parte de lo que hoy rotulamos como ‘biología celular’ y Turing era bien consciente de ello y da buenos argumentos para justificar su estrategia de abordaje teórico. Desde el punto de vista matemático, su trabajo mostró la consideración de un sistema no lineal a partir de un sistema lineal. El mecanismo consistía en una forma de activar procesos de difusión de manera brusca en algún breve período de tiempo. Así, la no linealidad era circunscripta a un tiempo breve y el resto del tiempo se podía trabajar con ecuaciones lineales. Sin difusión, el sistema presenta características de estabilidad. Como señala Reinitz, (2012), “su modelo hipotético de dos sustancias describía una situación simplificada: para lograr la formación de patrones, una de ellas debía catalizar la síntesis de las dos sustancias y difundirse lentamente, mientras que la otra debía catalizar la destrucción de ambas y difundirse con rapidez”. En cuanto al modelo, éste parece funcionar como una buena treta de matemáticas aplicadas en base a esta idea. Lo que Turing mostró es que así pueden generarse patrones estables, como en el caso que analizó de un anillo de células en el que aparece un patrón regular de concentración y rarefacción en torno de la circunferencia del anillo. A estos patrones los llamó ‘ondas químicas estacionarias, aunque también extendió su uso a ‘ondas viajeras’, usando como ejemplo a los movimientos de la cola de un espermatozoide.

Si bien llamó ‘morfógenos’ a las sustancias químicas que actúan en el proceso de reacción difusión, éste era el nombre de un molde para llenar por algún agente concreto, como lo fue para él el caso de las hormonas. Pero, dado el estado del conocimiento de la época en este dominio, representa sólo esquemáticamente las reacciones entre morfógenos y aventura varias conjeturas sobre posibles instanciaciones de ellos. En esencia, desde una perspectiva matemática, el proceso que tuvo en cuenta es la inestabilidad. O sea, se trata del crecimiento de un componente específico asociado con las ondas espaciales e inducido por difusión. Pero existe acuerdo entre los especialistas en que es muy

difícil entender la dinámica de un sistema como éste, debido a que las ecuaciones que lo representan tienen que ver con el aspecto temporal de dos variables que tienen distribución espacial.

Es interesante ver que la sintaxis matemática involucrada en este modelo permite ciertos artilugios formales que llevan a la formación de una estructura periódica. Es interesante también observar cómo el modelo sugiere un cambio que impresiona de tipo cualitativo, o morfológico, aún cuando el lenguaje pertenezca a una matemática tradicional, donde estas características no abundan. Como dice Turing, “lo que principalmente se requiere es un entendimiento de la solución de ecuaciones diferenciales con coeficientes constantes. (Esto es también lo que es principalmente requerido para un entendimiento de las oscilaciones mecánicas y eléctricas)”. Lo que puede en alguna medida complicar la comprensión del texto original por parte de algunos lectores es la introducción de entidades asociadas con los números complejos dentro de él. Pero, salvo algunos trucos propios del oficio, no se requiere matemática avanzada para seguir el desarrollo de sus cuentas. Sus ideas son más difíciles de asimilar, habida cuenta de la presencia en ellas de elementos provenientes de campos científicos diferentes, como la química o la biología.

Tomando un aspecto particular de su abordaje, Turing conjeturó que la asimetría que se observa podría provenir de la de las moléculas involucradas. La literatura sobre simetría-asimetría insinúa que éste problema todavía está abierto en numerosos frentes importantes. Veamos a través de sus palabras su enfoque sobre el tema: “Un embrión en su estado de blástula esférica tiene simetría esférica, o si hay algunas desviaciones de la simetría perfecta, ellas no pueden ser vistas como de particular importancia, porque las desviaciones varían enormemente de embrión a embrión dentro de una especie, aunque los organismos desarrollados a partir de ellas son apenas distinguibles. Uno puede tomarlo como que hay perfecta simetría esférica. Pero un sistema que tiene simetría esférica, y cuyo estado está cambiando debido a reacciones químicas y difusión, permanecerá esféricamente simétrico para siempre”. Agregando que ciertamente no puede resultar en un organismo tal como un caballo, el cual obviamente no es

esféricamente simétrico. Esta observación y argumentación diagnóstica lo llevaron a sugerir varios modos posibles de ruptura de simetría, desde pequeñas perturbaciones hasta fluctuaciones estadísticas a nivel molecular, considerando a este último caso como una instanciación de la idea de que grandes efectos pueden ser producidos por pequeñas fluctuaciones. De este modo, bajo condiciones apropiadas, se podían obtener ondas químicas a partir de pequeñas desviaciones de la uniformidad. Naturalmente, mucho se ha escrito sobre esto. Para una lectura introductoria sobre este tema puede consultarse Copeland (2004).

A modo de contexto general tendiente a pintar mejor el enfoque de Turing, es conveniente atender a otras miradas complementarias suyas sobre la forma. He aquí un párrafo de esa época que ilustra claramente cómo su imaginación conjeturaba relaciones entre ámbitos tan alejados como los números de Fibonacci, la botánica y la computación. Cuando en 1951 se instaló en la Universidad de Manchester una computadora electrónica digital de propósito general, en una carta a un colega, Turing le comentó que “deseaba hacer como uno de los primeros trabajos de la máquina algo sobre ‘embriología química’. En particular pienso que uno puede dar cuenta de la aparición de los números de Fibonacci en conexión con los frutos de los abetos” (Copeland, 2004).

Cabe recordar que los números de Fibonacci se fabrican en una sucesión a partir de la suma de los dos números anteriores. Los primeros dos términos de la sucesión son el número 1 y desde el tercero, son el resultado de la suma de los dos anteriores.

O sea: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34,...

Siempre fascinó su asociación con la filotaxis y con la distribución de las formas en los vegetales. Cabe acotar que, aunque no es éste el lugar para entrar en detalles sobre esto, hoy hay razones físicas bastante convincentes que han atenuado el rol las lecturas platónicas sobre este punto.

El modelo reacción-difusión

El modelo de reacción-difusión de Turing es actualmente muy conocido y uno de los mejores para explicar la formación de patrones auto-regulados en el desarrollo embriológico de los animales. Su historia de algo más de medio siglo da cuenta de los vaivenes asociados con su aceptación o rechazo. Hoy se acepta que el poder expresivo del mismo lo hace útil y es una buena guía heurística para indagar ámbitos de la morfogénesis. Por otra parte, es de destacar el incremento de exploraciones experimentales, lo que ha permitido una adecuada asimilación del mismo. Por otra parte, se acepta que en los últimos años las investigaciones sobre biología molecular han encontrado que muchos detalles fisiológicos de los organismos vivos son mejor comprendidos a través de enfoques sobre las interacciones entre células y moléculas. Pero de todos modos, esto no ha ido en desmedro de la modelización matemática, ni mucho menos. Más bien, podría decirse que esta dinámica hacia el reino de las moléculas ha permitido pulir con bastante precisión el sector de los modelos. La realimentación aquí entre modelos, observaciones y experimentos juega un rol destacado. Kondo y Miura (2010) exponen con notable claridad algunos aspectos de esta interacción. En su lectura, la matemática va a jugar un rol decisivo en ella, como también la computación. Uno de los enfoques que consideran involucra el análisis de los elementos de una red de modo cuantitativo y la simulación de todas sus interacciones por computación. Conceden que este enfoque es útil en sistemas bastante simples, como el camino metabólico de una célula, pero tiene no obstante considerable impacto en el área de la biología de sistemas. Sin embargo, en el caso de sistemas más complejos, en los que los parámetros espacio-temporales se tornan significativos, no es bueno el alcance predictivo y por ello se atiende a otra estrategia.

Consideraciones sobre los modelos involucrados

Hay quienes ven a estos modelos como la antesala de un enfoque parcialmente correcto. Vanegas *et al* en sus trabajos (2009 y 2009)

describen la formación de patrones espacios temporales y su clasificación a la fecha: desde un punto de vista biológico, clasifican patrones químicos y patrones de movimiento celular. A su vez, dentro de los patrones químicos, ubican a los modelos de gradiente y los modelos de reacción-difusión. No obstante, la falta de una total adecuación entre los modelos y la naturaleza condujo a una consecuencia natural en relación con este contexto teórico, emergiendo cierto pesimismo acerca del alcance de los mismos, especialmente del tipo reacción-difusión. Es indudable que una lectura desde los genes acecha a los modelos de crecimiento y constituye otro enfoque, al menos presumiblemente tan importante como este tipo de ecuaciones. Turing era consciente de la vaguedad de algunas de sus entidades teóricas y por lo tanto de la flaqueza de su modelo. Su concepto de morfógeno es un buen ejemplo. En el ámbito de la química, algún ácido pretendió hacerse cargo de esta entidad teórica, como fue el caso del ácido retinoico en los vertebrados. Pero esta es la grandeza y miseria de los modelos. A veces sus entidades teóricas mueren estériles y en otras ocasiones son una fuente de inspiración.

Un matemático, intentando comentar relaciones entre matemáticas y biología, (Stewart, 1999), cuenta con algún detalle los logros y desaciertos de estas investigaciones. Veamos un caso interesante: la conjetura de que a partir de las ecuaciones de Turing es más fácil generar patrones móviles que estacionarios, ha pasado de la matemática a los organismos. El pez ángel es un pequeño animal de mar tropical. No hace mucho tiempo se ha observado que sus rayas curvadas ofrecen pautas que cambian con el transcurso del tiempo (Kondo y Asai, 1995). En particular, el número de rayas en algunos peces de este tipo aumenta cuando ellos se desarrollan. Aquí se han aplicado modelos realmente exitosos, basados en ecuaciones de reacción-difusión. Puede suceder que ciertas rayas se conecten y desconecten, produciendo figuras que se han interpretado usualmente como dislocaciones y que son compatibles con sistemas analizados por reacción difusión.

Por otro lado, los experimentos que se han realizado sugieren que en la organización del desarrollo de varios animales hay un

sistema muy adaptable. Este está estimulando a varias líneas de investigación, con sus respectivas hipótesis de trabajo, pero, al menos hasta la fecha, ellas no están exentas de críticas. Lo que parece ser un lugar común, es que se acepta la hipótesis general de que tanto el ADN como la dinámica basada en condicionantes químicos y físicos juegan un rol complementario. Pero esto, si bien es una hipótesis general y profunda, en muchos casos todavía significa poco conocimiento.

Aún cuando este marco general no esté suficientemente esclarecido, es siempre un motivo para incrementar el optimismo en torno de estas búsquedas el encontrar resultados que satisfacen tanto a la parte epistémica como a la estética. Aquí cabe citar como ejemplo el libro de H. Meinhardt, *La belleza algorítmica de las conchas marinas* (1995) para reconocer cuán fructífero ha sido el programa de Turing. Dicho sea de paso, este autor ya había dado antes claros indicios de la fortaleza de su programa de investigación (Meinhardt, 1982). Del mismo modo, J. Murray ha extendido este tipo de investigaciones a las manchas de otros animales y es muy llamativo el acuerdo entre la expresividad de la matemática y la forma de las manchas. Su libro (Murray, 2003) ha recibido un uso muy extendido y es toda una invitación para profundizar el tema. Cabe señalar que uno de sus 'teoremas' ha trascendido la especialidad: un animal moteado puede tener una cola rayada, sin embargo, un animal rayado no puede tener una cola moteada. Asimismo, L. Wolpert ha contribuido al campo con una teoría robusta sobre el desarrollo del embrión y el rol de los morfogenes (Wolpert, 2006). Cambiando ligeramente la óptica, los trabajos de Vanegas et al. (2009, 2009) permiten seguir la implementación de modelos matemáticos sobre el tema por medio de técnicas numéricas, con resultados realmente atendibles. Aún cuando consideremos solamente a estos pocos autores, todo parece sugerir que la auto-organización comienza a tener una lectura mucho más formal y va inclinándose lentamente hacia la teoría. En cualquier caso, la herencia de Turing es elocuente. Ya sea por las matemáticas en la química del crecimiento, o por su tratamiento de la no-linealidad, o por el énfasis en la ruptura de las simetrías, o por el arte de la simulación numérica para las soluciones de las ecuaciones, su visión se adelantó

sensiblemente a su tiempo. En su caso particular, es llamativa la claridad con que vio el escenario donde podía operar. En este sentido, vale recordar sus palabras a modo de anticipación de lo que luego expondría: “Este modelo será una simplificación y una idealización, y consecuentemente una falsificación. Se espera que las características retenidas sean aquellas de la mayor importancia en el presente estado del conocimiento”. Una clara conciencia de su conocimiento y de sus límites.

Hablando globalmente, todo esto apunta a que la génesis y metamorfosis de las formas adquieren los rasgos de diferentes presiones selectivas. Nuestra mirada de esos fósiles marinos que adornan nuestros escritorios o bibliotecas, tan llenos de belleza, queda impregnada por un tenue halo de racionalidad.

Bibliografía

- Copeland J. (2004) *The Essential Turing*. Clarendon Press.
- Child C. (1941) *Patterns and problems of development*. University of Chicago Press.
- Goethe, J. W. (1790, 1998) *Die Metamorphose der Pflanzen*. En: Goethes Werke, Hamburger Ausgabe, Band XIII, Naturwissenschaftliche Schriften I, C.H. Beck, München, S. 64. Traducción al castellano de la monografía: La metamorfosis de las plantas. Asociación Valle-Inclán, Fac. de ciencias sociales, 1994.
- Gould S.J. (2004) *The Structure of Evolutionary Theory*. Harvard, 2002. Ed. Cast. La estructura de la teoría de la evolución. TusQuets Ed. Barcelona.
- Kondo S., Asai R. (1995) A reaction-diffusion wave on the skin of the marine angelfish *Pomacanthus*. *Nature*, 376, 765.
- Kondo S., Miura T. (2010) Reaction-Diffusion Model as a Framework for Understanding Biological Pattern Formation. *Science*, Vol. 329 (5999)

- Meinhardt H. (1995) *The Algorithmic Beauty of Seashells*. Springer-Verlag, Berlin.
- (1982) *Models of Biological Pattern Formation*. Academic Press, London.
- Murray J. (2003) *Mathematical Biology*. Springer-Verlag, Berlin, ed. 4.
- Nakamasu A., Takahashi G., Kanbe A., Kondo S. (2009) Interaction between zebrafish pigment cells responsible for the generation of Turing patterns. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106, 8429.
- Narasimhan T. (2009) The dichotomous history of diffusion. *Physics Today*. July, 48-53.
- Reinitz J. (2012) La morfogénesis según Alan Turing. *Investigación y Ciencia*. Junio, 8-9.
- Stewart I. (1999) *El segundo secreto de la vida*. Ed. Drakontos, Crítica. Barcelona.
- (2011) *Las matemáticas de la vida*. Ed. Crítica, Barcelona.
- Thompson, D' Arcy (1917, 1942) *On Growth and Form*. Cambridge Univ. Press. Second edition.
- Turing A.:(1952) The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Vol. 237, N° 641. , 37-72.
- Vanegas J., Landinez N., Garzón D. (2009) Análisis de la inestabilidad de Turing en modelos biológicos. *Dyna*, Año 76, Nro. 158, 123-134.
- (2009) Solución computacional de modelos biológicos de formación de patrones espacio-temporales. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. Vol. 17 Nro. 2, 182-194.
- Waddington, C.(1940) *Organisers and genes*. Cambridge Univ. Press.
- Wolpert L. (2006) *Principles of Development*. Oxford Univ. Press, New York.