

El problema del huevo o la gallina: un camino hacia las ciencias interdisciplinarias

The chicken-and-egg problem: a path to interdisciplinary sciences

Rafael Cruz José, R. Agustín-Serrano, Miguel Alvarado Flores y Marco A. Morales

Resumen

En este artículo se realiza un breve recuento de las fases más importantes en el desarrollo de dos ciencias interdisciplinarias particulares, la química no lineal y la biología matemática, que tienen su punto de partida en el anhelo humano de entender una cuestión fundamental: ¿cuál es nuestro origen? Conoceremos aportaciones de científicos que, de una u otra manera, han contribuido para la aclaración científica de este misterio, además de reiterar la necesidad del trabajo conjunto interdisciplinario de la física, matemáticas y biología para conseguirlo.

Palabras clave: morfógenos, química no lineal, sistemas complejos, biología matemática.

Abstract

This article briefly reviews the most important stages in the development of two particular interdisciplinary sciences, nonlinear chemistry and mathematical biology, both of which originate from the human desire to understand a fundamental question: what is our origin? We will learn about important contributions from scientists who, in one way or another, have helped to shed scientific light on this mystery, while also emphasizing the need for collaborative, interdisciplinary work among physics, mathematics, and biology in order to achieve this goal.

Keywords: morphogens, nonlinear chemistry, complex systems, mathematical biology.

CÓMO CITAR ESTE TRABAJO

Cruz José, R., Agustín-Serrano, R., Alvarado Flores, M., y Morales, M. A. (2026, mayo-julio). El problema del huevo o la gallina: un camino hacia las ciencias interdisciplinarias. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 27(2). <http://doi.org/10.22201/ceide.16076079e.2026.27.2.2>

Rafael Cruz José

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Preparatoria “Alfonso Calderón Moreno”, Puebla, Puebla, México

Estudios profesionales en física; maestría y doctorado en Física Aplicada en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Actividades de docencia en nivel medio superior desde el año 2000; a partir de agosto de 2013 en la preparatoria “Alfonso Calderón Moreno” de la BUAP. Ha impartido cursos a nivel profesional en el Instituto Tecnológico Superior de Libres y en la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Actualmente, es Profesor Investigador Tiempo Completo, dedicado a labores de investigación científica y tecnológica. Colabora con proyectos de investigación educativa, desarrollo tecnológico y divulgación, con investigadores de la FCFM y la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), como miembro del grupo de investigación Interdisciplinariedad y Divulgación Científica de Materiales Avanzados para el Desarrollo Sustentable (DICMADS), reconocido y registrado en el Padrón de Grupos de Investigación Interdisciplinaria de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) de la BUAP.

 rafael.cruzj@correo.buap.mx

 <https://orcid.org/0009-0004-8323-1732>

R. Agustín-Serrano

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Puebla, Puebla, México

Licenciado en Física, maestro en Ciencias Optoelectrónicas y doctor en Ciencias Física Aplicada por BUAP. Actualmente es docente en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la misma universidad. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores Nivel I. Su línea de investigación es en física de materiales y está desarrollando el diseño de nuevos materiales por manufactura aditiva (impresión 3D). Especialista en técnicas de caracterización, como microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, espectroscopía en el infrarrojo y pruebas mecánicas. Sus pasatiempos son la impresión y el escaneo 3D, el corte láser y el diseño asistido por computadora.

 ricardo.agustin@correo.buap.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-6468-7548>

Miguel Alvarado Flores

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Química, Puebla, Puebla, México

Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP, en la que imparte las materias: Cálculo, Física, Diseño experimental, Métodos Numéricos y Control Automático. En su desarrollo académico cuenta con Licenciatura en Física, Maestría en Ingeniería Química y estudios de Maestría en Automatización y Control Automático. Actualmente es candidato a doctor del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en el Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos. Es miembro activo del grupo de investigación Interdisciplinariedad y Divulgación en el Desarrollo de Materiales Avanzados Sustentables. En la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP, ha desempeñado roles clave: coordinador del Colegio de Ingeniería Agroindustrial, secretario de la Academia de Matemáticas, organizador de la Expo Matemáticas en 2019, 2020 y 2022, y coordinador del Diplomado en Panificación.

 miguel.alvarado@correo.buap.mx

 <https://orcid.org/0009-0007-2751-8159>

Marco A. Morales

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Química, Puebla, Puebla, México

Recibió el grado de licenciado en Física en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM) de la BUAP, el grado de maestro en Ciencias (Físicas) en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de doctor en Física Aplicada por parte de la FCFM de la BUAP. Actualmente es Profesor-Investigador TC en la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), Nivel II. Miembro del Registro SECIHTI de Evaluadores Acreditados (RSEA), así como miembro del padrón de investigadores de la Vicerrectoría de Investigación y Estudio de Posgrado (VIEP) de la BUAP. Responsable del grupo de investigación interdisciplinario VIEP-BUAP: IDCMADS. Es autor y coautor de más de 25 artículos indexados en las áreas de ciencia e ingeniería, así como autor y coautor de 8 solicitudes de patentes y 4 patentes concedidas.

 spinor70@yahoo.com.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-2361-9645>

Introducción

Desde las primeras civilizaciones, ha existido la necesidad de responder la cuestión: ¿de dónde venimos? Una pregunta más sencilla en términos cotidianos encierra el mismo contenido: ¿qué fue primero: el huevo o la gallina? Por siglos, la respuesta fue una paradoja: si primero fue el huevo, ¿qué o quién dio origen al mismo? Y si la respuesta es la gallina, ¿de dónde viene la gallina? Sin embargo, la respuesta no es contundente.

Proponemos un acercamiento a la respuesta a estas preguntas a partir de datos históricos basados en el trabajo interdisciplinario de diferentes áreas de las ciencias exactas como la física, la matemática, la química y la biología. La *interdisciplina* — intercambio y cooperación entre disciplinas científicas (Morin, 2010; García, 2011 y Llano Arana et. al., 2016)— es el conocimiento científico amalgamado de la necesidad de explicar nuevos comportamientos atípicos en fenómenos estudiados por dichas ciencias exactas, propio de las revoluciones científicas (Tomas Kuhn, 1990).

En este contexto, un comportamiento atípico es la aparente violación de leyes de la termodinámica¹ en equilibrio. La primera y segunda leyes de la termodinámica establecen, para sistemas aislados de su entorno, la conservación de energía en el sistema y que la entropía² no puede disminuir, respectivamente. Más aún, en el contexto de la química, cuando mezclas dos sustancias químicas A y B, éstas interactúan para formar un compuesto C (*reacción química*), pero si la reacción es reversible, el compuesto C se vuelve reactivo y evoluciona para formar nuevamente las sustancias A y B (*reacción química reversible*).

Cuando A y B forman el compuesto C la entropía aumenta, pero al evolucionar nuevamente de C hacia A y B, disipando la energía ganada, la entropía disminuye. La entropía aumenta y luego disminuye periódicamente, ¡como si la segunda ley de la termodinámica se violara! Esta aparente violación es, en realidad, la manifestación de comportamientos no lineales en la naturaleza. Además, ocurre cuando los sistemas físicos y químicos se encuentran fuera del equilibrio termodinámico; así sucede, en forma análoga, con los sistemas biológicos o el problema de ¿qué fue primero, el huevo o la gallina?

¹ La *termodinámica* es la parte de la física que estudia el calor y sus manifestaciones de energía, así como su transformación en trabajo mecánico. Una explicación sencilla de sus leyes las puedes ver en el video de [QuantumFracture, 2015](#).

² La *entropía* la puedes pensar como una medida de lo que se ha perdido en organización y en capacidad de hacer trabajo útil de un sistema, conforme la energía se disipa. Por ejemplo, cuando el motor de un coche está encendido, parte de la energía que se obtiene del combustible se convierte en trabajo mecánico (para mover el vehículo), pero otra parte se pierde como calor y ruido, y no puede ser utilizada nuevamente.



Protagonistas del cambio de paradigma no lineal y ciencia interdisciplinaria

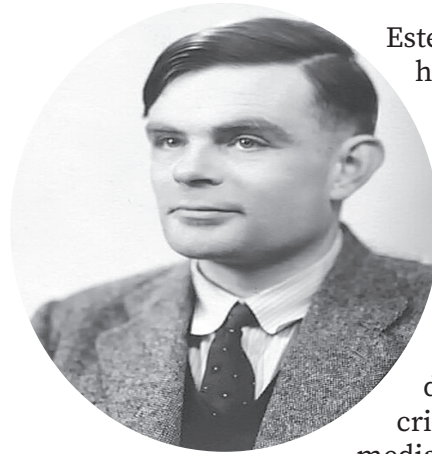


Figura 1. Alan Mathison Turing (1912-1954), héroe de guerra, científico y matemático inglés, precursor de la biología teórica y considerado padre de las ciencias computacionales.

Créditos: Elliott y Fry, 1951.

Este comportamiento no lineal fue abordado por el héroe de la Segunda Guerra Mundial, Alan Mathison Turing (ver figura 1), un matemático suspicaz, que inventó una versión de la primera computadora para descifrar el código de la máquina enigma, y con esto conocer las comunicaciones del enemigo (BBC, 2015; Cuartero, 2012)³. Alan Turing, más allá de descifrar códigos de guerra, también intentó descifrar la mayor de las incógnitas: el origen de las formas vivas. Este genio matemático y criptógrafo postuló los pilares de la biología teórica mediante su trabajo seminal: “La química básica de la morfogénesis” (Turing, 1990).

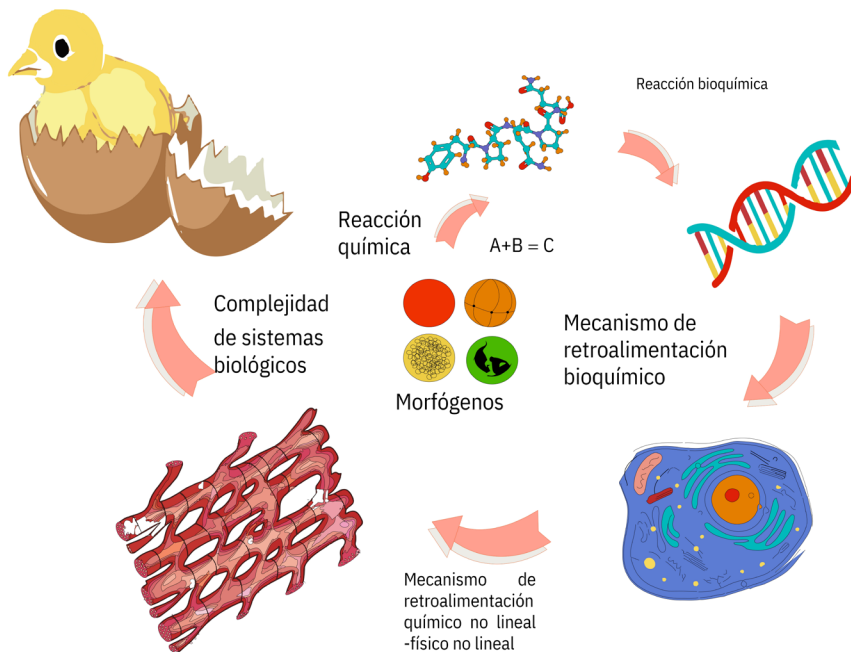


Figura 2. Evolución de la vida, los morfógenos interaccionan entre sí formando moléculas complejas a través de reacciones químicas, estas a su vez, forman células, las cuales forman tejidos, que finalmente darán origen a un ser vivo complejo.

Créditos: Lourdes Mariana Guzmán Osorio.

Según Turing, el origen del desarrollo de las formas de los seres vivos (*morfogénesis*) está determinado por reacciones bioquímicas orgánicas⁴, las cuales generan las condiciones para dar principio a la vida. Para explicar esto, supuso la existencia de sustancias químicas hipotéticas llamados *morfógenos*, que son mensajeros químicos responsables de organizar células en tejidos y éstos a su vez forman los órganos de un ser viviente (ver figura 2).

Es decir, que el estado inicial del origen de la vida es una acumulación de sustancias químicas orgánicas que se mezclan —en nuestro caso, estos procesos concatenados desde la unión de átomos hasta la formación de moléculas complejas

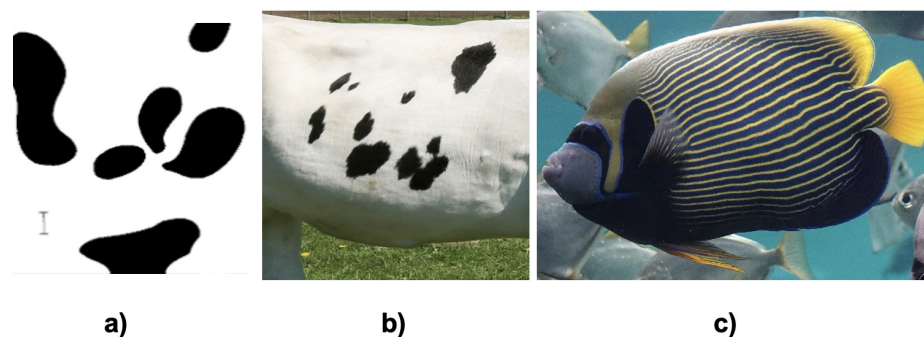
³ En YouTube se puede ver el *trailer* de la película *Código enigma*, que relata este episodio histórico (Henry Cinemas Oficial, 2015). Un hecho trágico en la vida de Turing es que, por su preferencia sexual distinta, fue obligado a seguir un tratamiento médico para curar su homosexualidad. Tratamiento que lo llevó al suicidio, al más puro estilo de Blancanieves: con una manzana envenenada con cianuro (Mansilla, 2012).

⁴ Una *reacción bioquímica orgánica* es aquella reacción química cuyos reactivos están formados por moléculas de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. A este tipo de moléculas generalmente se les conoce como CHON.

de ADN configuran “el huevo”⁵— y conspiran para formar un organismo de una única célula. Luego, este organismo evoluciona y se vuelve más complejo hasta alcanzar una constitución de muchas células (pluricelular) —“la gallina”—; sin embargo, su evolución es guiada por la química de reacciones bioquímicas. Estas reacciones, a diferencia de las reacciones químicas elementales, deben darse entre reactivos químicos del tipo CHON (Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno).

Para mostrar su punto propuso, a partir de una reacción química elemental, un modelo matemático del tipo reacción-difusión. En términos sencillos, el modelo de reacción-difusión es un conjunto de fórmulas matemáticas que describen cómo ciertos patrones —como las manchas en la piel de un animal— se forman en la naturaleza (ver figura 3). La solución de este modelo matemático, la obtuvo por aproximación numérica mediante la computadora que había inventado años antes para descifrar el código de la máquina enigma⁵.

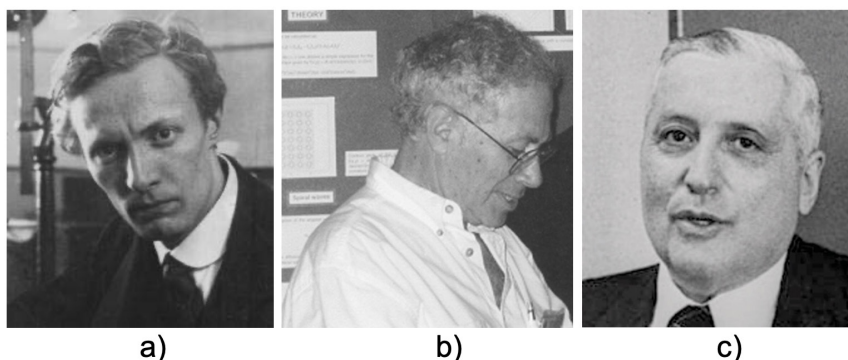
Figura 3. a) Imagen de la solución numérica propuesta por Turing, donde se puede observar patrones obtenidos similares a las manchas en la piel de vaca. b) Manchas de la piel de vaca. c) Algo semejante se ha podido obtener para las distintas formas de las manchas de la piel en otros animales (Kondo y Asai, 1995).



Créditos: a) Turing, 1990; b) Magnific, s.f., y c) Ehlers, s.f.

Una comprobación indirecta de la hipótesis de Turing sería obtenida por otro científico de desaparecida Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), Boris Pavlovich Belousov (ver figura 4a). Belousov fue un biofísico dedicado a desentrañar el misterio de las reacciones bioquímicas orgánicas del cuerpo humano (Sagués y Epstein, 2003). Logró reproducir las reacciones del ciclo del ácido cítrico, el cual es el proceso fundamental del ciclo de Krebs —ciclo mediante el cual todas nuestras células obtienen energía para funcionar—.

Figura 4. Retratos de los científicos que contribuyeron, de manera fundamental, para el desarrollo de las leyes de la química y la termodinámica no lineales, y la explicación del origen de la vida como la conocemos. a) Boris Pavlovich Belousov, b) Anatol Markovich Zhabotinsky y c) Ilya Prigogine.



Créditos: a) Boris Pavlovich Belousov 2, 1935. b) Sandlaus, 1999. c) Ilya Prigogine 1977c, 197.

⁵La meta fue explicar la pigmentación en la piel de animales vertebrados, llevando hasta las últimas consecuencias su hipótesis de los morfógenos.

La observación de la reproducción de dicha reacción es espectacular: una reacción que cambia de color para regresar, un tiempo después, a su color original, y así sucesivamente hasta alcanzar un solo color. A este tipo de procesos químicos se les conoce como *osciladores químicos* o *reacciones químicas oscilantes*. ¿Qué significa que una reacción sea oscilante? En pocas palabras, que cambia de color una y otra vez, como si respirara. Cuando Belousov quiso publicar su descubrimiento, los revisores no lo entendieron, pues, aparentemente, violaba las leyes de la termodinámica.

Décadas después, otro biofísico ruso, Anatol Markovich Zhabotinsky (ver figura 4b), reivindicaría a Belousov al explicar que a las reacciones químicas oscilantes no se les puede aplicar leyes estáticas por ser un proceso dinámico y no lineal (Zhabotinsky, 1991). Por esta razón, el nombre más popular de las reacciones químicas oscilantes es reacción Belousov-Zhabotinsky ó reacción BZ. Posteriormente, este tipo de fenómenos químicos quedaría bien explicado y en 1977 le sería otorgado el premio Nobel de química a Ilya Prigogine (Prigogine, 1978; ver figura 4c) por descubrir las leyes de la termodinámica lejos del equilibrio, que se expresan en estructuras disipativas⁶.

Estas estructuras disipativas las puedes observar en fenómenos sencillos como un remolino de agua que se mantiene gracias al flujo constante de agua, o fenómenos más complejos como los huracanes en los océanos, que se mantienen por intercambio de calor en flujos de aire y agua. Hasta ahora, estos procesos físicos y químicos fuera de equilibrio refieren a que la química es la base de la vida, es decir, primero es “el huevo”, antes que “la gallina”.

A finales de la década de los noventa, estos conocimientos derivarían en la comprobación química experimental de los morfógenos de Turing. Una reacción química a base de iones⁷ de cloro y yodo, bajo condiciones de difusión controlada⁸, produce patrones cuyo comportamiento es llamado *inestabilidad inducida por difusión*. A esta reacción se le nombra reacción CIMA —clorito, yodo y ácido malónico— (Castets, Dulos, Boissonade, y de Kepper, 1990) y es la comprobación de la hipótesis de Turing en el área de la química no lineal⁹.

⁶ Una *estructura disipativa* la puedes pensar como un patrón ordenado y estable que surge en un sistema que se mantiene fuera del equilibrio termodinámico gracias a un flujo constante de energía. Recuerda que en estos sistemas la energía se disipa, lo que aumenta la entropía del entorno y esa disipación es justamente lo que le permite mantener el orden interno (ver nota 2).

⁷ En general, un *ion* es un átomo o molécula que ganó o perdió electrones, con lo que queda cargado negativa o positivamente.

⁸ *Condiciones de difusión controlada* son situaciones en las que la velocidad de la reacción química está determinada por la rapidez con que se encuentran los átomos o moléculas a interaccionar y no de la rapidez con que reaccionan.

⁹ La química no lineal estudia fenómenos químicos donde las respuestas no son directamente proporcionales a los estímulos y tienen comportamientos oscilantes, de patrones especiales y caos.

Más aún, los morfógenos de Turing serían encontrados en el área de la biomedicina¹⁰ en modelos de ratones, al estudiar la formación del patrón espacial de folículos pilosos. El gen inhibidor DKK genera una sustancia bioquímica activadora (Wnt) de la densidad de los folículos pilosos del roedor, lo que significa la generación o inhibición de nuevos folículos (Sick, Reinker, Jens, y Thomas, 2006). El gen DKK es parte de una familia que produce proteínas inhibidoras de la vía Wnt, regulando la proliferación y el crecimiento celular para el mantenimiento de tejidos como el cuero cabelludo, que tiene folículos pilosos. Mientras que la vía de señalización Wnt es un sistema central de comunicación celular que controla cómo las células crecen, se diferencian y se organizan, para generar los folículos pilosos.

Al mismo tiempo que se desarrollaba la química no lineal, gracias al trabajo seminal de Alan Turing, muchos científicos fueron inspirados para desarrollar nuevas áreas de las ciencias. Hasta este momento, todo el desarrollo previo se basa en la química no lineal orgánica e inorgánica de materia inerte¹¹. En los años setenta aparece el trabajo de James Dickson Murray¹², quien puso a prueba la hipótesis de Turing. El resultado de dicha evaluación bajo el tamiz científico derivó en *Biología matemática* (Murray, 2002), que es una nueva área de la ciencia que reúne los conocimientos científicos de la biología y la matemática para amalgamarlas en una sola. Esta evolución hacia el uso de la matemática como herramienta fundamental para entender y describir procesos más complejos como los biológicos muestra su importancia. Comienza a asomarse “la gallina”.

Una consecuencia del conocimiento científico generado por esta nueva área, es la generalización del modelo matemático propuesto por Turing para explicar el origen de las formas biológicas (Sutherland, 2017). Además, se propone una nueva clasificación de modelos: químicos, mecánicos y mecanoquímicos (Maini, 2004; Morales et al., 2015). En cuanto a los químicos, se encuentran los modelos de reacción-difusión bajo inestabilidad de Turing, que son fáciles de resolver, pero no tienen interpretación biológica directa. ¿Dónde podemos observar fenómenos de reacción-difusión? Piensa en una gota de tinta en la superficie del agua en un recipiente, la tinta se dispersará formando patrones. De los mecánicos, encontramos un nuevo tipo, en el cual se consideran al movimiento, proliferación e interacción de las células con su entorno, los cuales son difíciles de tratar analíticamente y numéricamente. Finalmente, los mecanoquímicos son una combinación de los modelos anteriores; tienen interpretación biológica y son más fáciles de tratar analíticamente y numéricamente.

¹⁰ La *biomedicina* es la ciencia que estudia aspectos biológicos y moleculares de las enfermedades, para desarrollar nuevas formas de diagnóstico, tratamiento y medicamentos más eficaces.

¹¹ Se considera *materia inerte* a la materia no viva e imposibilitada de crecer, reproducirse, responder activamente al ambiente, evolucionar biológicamente y realizar todas las reacciones químicas que ocurren dentro de un ser vivo para mantenerlo funcionando. Ejemplos de materia inerte son desde rocas y agua, hasta aire, minerales, metales, gases, etcétera.

¹² Hasta la fecha, James Dickson Murray es considerado el padre de la biología matemática y es profesor emérito de las universidades de Oxford, Inglaterra y Washington, Estados Unidos.



En términos sencillos, el modelo matemático generalizado que describe estos fenómenos depende de dos variables que interactúan y deben ser encontrados sus valores que den solución a las ecuaciones; una de las variables del modelo representa la concentración química¹³ y la otra la densidad celular¹⁴ (Meinhardt, 2012). Como es común en ciencia, la búsqueda de la comprensión de los fenómenos involucra la formulación de distintos modelos, y la elección de los más sencillos para realizar los estudios correspondientes. Así, ya podemos notar la primigenia de “el huevo” antes que “la gallina”.

Actualmente, los modelos mecano-químicos permiten completar la teoría de Turing, así como modelar y simular los procesos biológicos, aportando conocimiento científico a la *biología del desarrollo*, área de la biología que explica la morfogénesis de los organismos. Por ejemplo, un nuevo modelo mecano-químico que explica la morfogénesis de las manchas en la piel de los animales marinos (Morales et al., 2015) e incluso el vitiligo en humanos (Ochoa-Gutiérrez et al., 2025) revela que Turing iba en el camino correcto, pero no consideró las interacciones físicas entre las células. Esto provoca un proceso de retroalimentación químico-físico —no solamente los morfógenos químicos— entre las diferentes capas de piel, concentraciones químicas y sus diferentes tipos de células, lo cual genera los sorprendentes y bellos diseños en la pigmentación y la piel de los animales vertebrados marinos.

Al mismo tiempo, se ha propuesto una clasificación de procesos que tienden a agregar componentes individuales en estructuras más complejas: autoensamble y autoorganización (Rossi et al., 2008), con el fin de explicar el origen de la vida. *Autoensamble* se entiende como el proceso en el que componentes (moléculas, partículas, etcétera) se agrupan espontáneamente en una estructura ordenada fuera del equilibrio, guiados por interacciones químicas o físicas. Mientras que la *autoorganización* se ha redefinido como una combinación de procesos de autoensamblaje y estructuras disipativas (Rossi et al., 2008).

Un ejemplo de una estructura de autoensamble se da en una mezcla de leche entera, colorantes vegetales y jabón, en la que se forman patrones de colores que se organizan espontáneamente por sus interacciones de moléculas de grasa de la leche (hidrofóbicas¹⁵) y las moléculas del jabón con agua (hidrofílicas¹⁶) (ver video 1).

¹³ La *concentración química* es la cantidad de una sustancia química (moléculas señal, feromonas, nutrientes, etcétera) por unidad de volumen, considerada como un campo continuo que se difunde, se degrada y puede ser producido por las células.

¹⁴ La *densidad celular* es la cantidad de células por unidad de volumen en un punto x y en el tiempo t , consideradas en una escala espacial suficientemente grande para tratarla como un cuerpo con una masa y un volumen determinados.

¹⁵ Una *molécula hidrofóbica* es aquella que no interactúa bien con el agua: no es soluble en ella y tiende a evitar su contacto, puesto que no tienen polos ni carga. No puede formar enlaces de hidrógeno con el agua y, por tanto, el agua las “excluye”.

¹⁶ Una *molécula hidrofílica* es polar o cargada, puede formar enlaces de hidrógeno con el agua, es soluble en ella y tiene grupos funcionales que interactúan favorablemente con las moléculas de agua.



Video 1. Experimento en el que se ejemplifica el autoensamblaje (Correo del maestro, 2016).

En cuanto a la autoorganización, puedes pensar en las gotas de aceite que se agrupan solas, porque son hidrofóbicas, en tu caldo de pollo o en la sopa. También se puede observar en burbujas de jabón o manchas de aceite en el pavimento donde películas delgadas se autoorganizan en capas con diferentes espesores, lo que produce patrones de colores. La física del autoensamble y las estructuras disipativas también complementa los modelos matemáticos tipo Turing.

En otras palabras, el todo es más que la unión de las partes. Esta idea sustenta la hipótesis de que materia inerte al interactuar causa un nuevo comportamiento de componentes orgánicos: la vida unicelular y pluricelular¹⁷. Nuevos experimentos a partir de sustancias químicas orgánicas inertes, al mezclarse y cambiar su temperatura o pH¹⁸ generan estructuras que imitan la vida unicelular como son las micelas¹⁹ y membranas fosfolípicas²⁰, que son estructuras autoensambladas. Esto corrobora que la vida se basa en procesos no lineales de la química, es decir, primero es “el huevo” antes que “la gallina”.

¹⁷ Se piensa que la base química de la vida son cuatro grandes tipos de biomoléculas: proteínas, ácidos nucleicos (ADN y ARN), carbohidratos y lípidos.

¹⁸ El pH se puede entender como una medida de qué tan ácida es una solución, entre menos ácida, es más afín a la vida.

¹⁹ Una *micela* es un conjunto de moléculas de jabón (o detergente) que se agrupan en el agua formando una bolita.

²⁰ Una *membrana fosfolípica* es una capa doble de moléculas lipídicas, donde sus “cabezas” hidrofílicas quedan hacia afuera y sus “colas” hidrofóbicas quedan hacia adentro en un ambiente acuoso, formando una barrera flexible que separa el interior y el exterior de la estructura.

Conclusión

Hoy en día la concepción del origen de la vida se encuentra reformulada en la pregunta ¿qué fue primero, el huevo o la gallina? A la civilización humana le ha costado al menos 80 años obtener un acercamiento a una respuesta científica de los morfógenos de Turing: el huevo. En otras palabras, lo que parecía una paradoja del huevo y la gallina empieza a resolverse desde la química: primero fueron las moléculas, luego la vida. En el trayecto para obtener una respuesta, se han generado dos nuevas áreas interdisciplinarias: química no lineal y biología matemática. Y eso sin contar que se han extendido otras áreas científicas: la termodinámica, en la parte de la física fuera de equilibrio, y la biología del desarrollo como biología teórica.

La interdisciplinariedad, pues, se ha convertido en el nuevo paradigma que conduce el desarrollo de la investigación científica. Ahora es necesario atacar los problemas a resolver desde distintas áreas del conocimiento, lo que enriquece y proporciona un nuevo tipo de conocimiento científico interdisciplinario. Quizá, en el futuro, cuando alguien vuelva a preguntar qué fue primero el huevo o la gallina, podremos responder no sólo con ciencia, sino también con una historia de colaboración entre disciplinas. Sin duda, el conocimiento obtenido en estas áreas interdisciplinarias será el punto de partida para la generación de otras nuevas, ¿quizás la ingeniería de tejidos pueda ser aplicada a la producción de órganos artificiales por bioimpresión 3D? Pero eso es otra historia.

Agradecimientos

Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado – BUAP, ID Proyecto: 00094-PVG/2026

Referencias

- ❖ BBC. (2015). *Alan Turing: Creator of modern computing*. Bitesize. <https://www.bbc.co.uk/teach/articles/zhwp7nb>
- ❖ *Boris Pavlovich Belousov 2*. (1935). [Fotografía]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boris_Pavlovich_Belousov_2.jpg
- ❖ Castets, V., Dulos, E., Boissonade, J., y de Kepper, P. (1990). Experimental evidence of a sustained standing Turing-type nonequilibrium chemical pattern. *Physical review letters*, 64(24), 2953-2956. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.2953>
- ❖ Correo del Maestro. (2016, 20 de mayo). *Tensión superficial - Leche de colores* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Q1JJu8aMiyE>

- ❖ Cuartero, F. (2012, 01 de marzo). *El problema de la decidibilidad*. Alan M. Turing III. Hablando de Ciencia. <https://tinyurl.com/5fsw4zzd>
- ❖ Ehlers, M. (s.f.). [Patrón de manchas en los peces]. Pexels. <https://www.pexels.com/es-es/foto/naturaleza-colegio-escuela-pezu-13191927/>
- ❖ Elliott y Fry. (1951). *Alan Turing* [Fotografía]. Wikimedia Commons. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alan_Turing_\(1951\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alan_Turing_(1951).jpg)
- ❖ García, R. (2011). Interdisciplinaria y sistemas complejos. *Revista Latinoamericana de metodología de las ciencias Sociales*, 1(1), 66-101. https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/art_revistas/pr.4828/pr.4828.pdf
- ❖ Henry Cinemas Oficial. (2015, 23 de febrero). *El Código Enigma Trailer Oficial Subtitulado* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/Va7JzWpE97g?si=Cwpr1pI6ETDHPcBd>
- ❖ Kondo, S., y Asai, R. (1995). A reaction–diffusion wave on the skin of the marine angelfish *Pomacanthus*. *Nature*, 376(6543), 765-768. <https://doi.org/10.1038/376765a0>
- ❖ Kuhn, T. S. (2019). *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica.
- ❖ Ilya Prigogine 1977c. (1977). [Fotografía]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ilya_Prigogine_1977c.jpg
- ❖ Llano Arana, L., Gutiérrez Escobar, M., Stable Rodríguez, A., Núñez Martínez, M. C., Masó Rivero, R. M., y Rojas Rivero, B. (2016). La interdisciplinaria: una necesidad contemporánea para favorecer el proceso de enseñanza aprendizaje. *Medisur*, 14(3), 320-327. <http://scielo.sld.cu/pdf/ms/v14n3/ms15314.pdf>
- ❖ Magnific. (s.f.). *Fotografía en primer plano de una vaca y un ternero en un campo verde con valla*. <https://tinyurl.com/yrsy5pj3>
- ❖ Maini, P. K. (2004). Using mathematical model to help understand biological pattern formation. *Comptes Rendus Biologies*, 327(3), 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2003.05.006>
- ❖ Mansilla, R. (2012). *Una breve introducción a la econofísica*. Equipo Sirius. <https://tinyurl.com/bdxx65rv>
- ❖ Meinhardt, H. (2012). Turing’s theory of morphogenesis of 1952 and the subsequent discovery of the crucial role of local self-enhancement and long-range inhibition. *Interface Focus*, 2(4), 407-416. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2011.0097>
- ❖ Morales, M. A., Rojas, J. F., Oliveros, J., y Hernández-Santiago, A. A. (2015). A new mechanochemical model: Coupled Ginzburg–Landau and Swift–Hohenberg equations in biological patterns of marine animals. *Journal of Theoretical Biology*, 368, 37-54. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2014.12.005>

- ❖ Morin, E. (2010). *Sobre la interdisciplinariedad*. Publicaciones Icesi.
- ❖ Murray, J. D. (2002). *Mathematical biology I, An introduction*. Springer.
- ❖ Ochoa-Gutiérrez, H. O., Montes-Pérez, A., y Morales, M. A. (2025). A new nonlinear model of reaction–diffusion–advection applied to some scar anomalies and cutaneous mosaicism. *Mathematics and Computers in Simulation*, 240, 612-632. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2025.07.029>
- ❖ Prigogine, I. (1978). Time, structure and fluctuations. *Science*, 201(4358), 777-785. <https://doi.org/10.1126/science.201.4358.777>
- ❖ QuantumFracture. (2015, 12 de marzo). *Las Leyes de la Termodinámica en 5 Minutos* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Bvfn6eUhUAc>
- ❖ Rossi, F., Ristori, S., Rustici, M., Marchettini, N., y Tiezzi, E. (2008). Dynamics of pattern formation in biomimetic systems. *Journal of Theoretical Biology*, 255(4), 404-412. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.08.026>
- ❖ Sagués, F., y Epstein, I. R. (2003). Nonlinear chemical dynamics. *Dalton transactions* (7), 1201-1217. <https://doi.org/10.1039/b210932h>
- ❖ Sandlaus. (1999). *Anatol-Zhabotinsky 1999* [Fotografía]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatol-Zhabotinsky_1999.TIF
- ❖ Sick, S., Reinker, S., Jens, T., y Thomas, S. (2006). WNT and DKK determine hair follicle spacing through a reaction-diffusion mechanism. *Science*, 314(5804), 1447-1450. <https://doi.org/10.1126/science.1130088>
- ❖ Sutherland, J. D. (2017). Opinion: Studies on the origin of life —the end of the beginning. *Nature Reviews Chemistry*, 1(2), 0012. <https://doi.org/10.1038/s41570-016-0012>
- ❖ Turing, A. M. (1990). The chemical basis of morphogenesis. *Bulletin of Mathematical Biology*, 52, 153-197. <https://doi.org/10.1007/bf02459572>
- ❖ Zhabotinsky, A. M. (1991). A history of chemical oscillations and waves. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 1(4), 379-386. <https://doi.org/10.1063/1.165848>