

Aportaciones de Alan Turing al ámbito de la química: Teoría de la morfogénesis e interpretación de algunas reacciones químicas

Manuela Martín-Sánchez, María Teresa Martín-Sánchez, Gabriel Pinto

Resumen: En 2012 se conmemora el centenario del nacimiento de Alan Turing. En este artículo queremos destacar la relación que algunas de sus ideas tienen con la química. El matemático Alan Turing, conocido como uno de los padres de la informática moderna y de la computación, escribió, en 1952, una única publicación relacionada con la química, que ha sido fundamental para explicar la morfogénesis (proceso biológico que lleva a que un organismo desarrolle su forma) a través de una reacción química y un proceso de difusión. Muchos más procesos de la naturaleza responden a los conocidos como patrones o estructuras de Turing (*Turing's Patterns*), así como las espectaculares reacciones químicas oscilantes.

Palabra clave: Estructuras de Turing, morfogénesis, caos, proceso activador-inhibidor, reacciones químicas oscilantes.

Abstract: We celebrate the centenary of the birth of Alan Turing in 2012. In this article, we want to highlight the relationship between some Turing's ideas and chemistry. The mathematician Alan Turing, known as one of the fathers of computer science wrote only a paper related to chemistry (in 1952), but it has been fundamental to explain the morphogenesis (the biological process that causes an organism to develop its shape) through a chemical reaction and a diffusion process. Many more processes of nature give rise to those known as Turing's Patterns, as well as spectacular chemical reactions such as the oscillating reactions.

Keyword: Turing's Patterns, morphogenesis, chaos, activator-inhibitor processes, oscillating chemical reactions.

Introducción

Con motivo del centenario del nacimiento de Alan Turing, conocido como uno de los padres de la informática moderna y de la computación, Ball reivindica el impacto y la importancia de las "ideas químicas" sobre la comprensión de los conocidos como patrones o estructuras de Turing (*Turing's Patterns*).^{1,2} Estas estructuras permiten explicar, de alguna manera, fenómenos como la distribución de las manchas de un leopardo o de las franjas de una cebra, la disposición de las hojas y ramas de una planta, o las "ondas" o frentes de colores que se producen en reacciones químicas oscilantes. Todo ello, mediante la consideración de una reacción química con un doble componente activador-inhibidor y el análisis del problema de difusión en un medio que no siempre es homogéneo.

En este artículo, después de una breve reseña biográfica de Turing, hacemos una relación de las ideas fundamentales de la publicación que escribió sobre reacciones químicas

y, a continuación, incluimos un apartado sobre las reacciones que se pueden explicar mediante sus ideas y que, en mayor o menor medida, y en determinadas condiciones, llegan a producir los ya citados patrones de Turing.

Reseña biográfica de Alan Turing^{3,4}



Figura 1. Fotografía de Alan M. Turing.

Alan Mathison Turing (Figura 1) (Londres, 1912- Wilmslow, Reino Unido, 1954) fue un matemático genial, fundador de la informática teórica y creador del primer ordenador basado en la electrónica digital, que trabajó también en otros campos como la teoría biológica de la morfogénesis o la inteligencia artificial, consiguiendo grandes logros, a pesar de su corta vida.

Su padre era un funcionario británico destinado en la India, que tenía mucho interés porque Alan naciera en Inglaterra. Por eso, la madre se trasladó allí para su nacimiento. Durante los primeros años los padres tuvieron que seguir viajando a la India y dejaron a sus dos hijos con unos amigos ingleses.

Turing, desde muy pequeño, dio muestras de una gran inteligencia, fuerza de voluntad y tesón por aprender, hasta el punto de que parece que aprendió a leer por sí solo en tres



M. Martín Sánchez M. T. Martín Sánchez G. Pinto

E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid.
Sección de Didáctica e Historia de la Física y la Química,
Reales Sociedades Españolas de Química y de Física.
C-e: gabriel.pinto@upm.es, mmartins@edu.ucm.es

Recibido: 06/09/2012. Aceptado 06/12/2012.

semanas. Con catorce años, el primer día que tenía que ir a la escuela, como había una huelga de autobuses, se levantó muy pronto y se desplazó varios kilómetros en bicicleta, pernoctando incluso en una posada, para poder asistir. Ingresó en el internado de Sherborne en Dorset, donde los profesores no apreciaron la capacidad de Turing para las matemáticas porque era un centro dedicado esencialmente a estudios clásicos; sin embargo, resolvía problemas muy avanzados sin haber estudiado el cálculo elemental. Con dieciséis años ya había leído trabajos de Einstein y se había dado cuenta del avance que suponían respecto de las leyes clásicas de Newton.

Influyó mucho en él un amigo mayor, Christopher Morcom, que murió de forma repentina en 1930 por una tuberculosis bovina causada por leche de vaca infectada. Esta circunstancia supuso un duro revés para Turing; parece que influyó mucho en su abandono de las ideas religiosas y, preguntándose sobre qué había pasado con la mente de Christopher tras su muerte, se obsesionó por entender los procesos mentales del ser humano.

Desde 1931 estudió en el *King's College* de Cambridge porque no pudo ingresar en el *Trinity College* por sus malas calificaciones en los estudios clásicos. A la edad de 22 años ya fue elegido "fellow" del *King's College* con una importante disertación matemática sobre el teorema central del límite.

En su estudio "*On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*" (1936), reformuló los resultados obtenidos por Kurt Gödel (1906-1978) en 1931 sobre los límites de la computación, sustituyendo al lenguaje formal de Gödel por lo que hoy se conoce como *Máquina de Turing*: un modelo computacional que realiza una lectura/escritura de manera automática sobre una entrada llamada cinta, generando una salida en esta misma. Nació así, de alguna manera, la descripción de la forma de funcionamiento del ordenador moderno y los principios de la programación.

En los años 1937 y 1938 estuvo en la Universidad de Princeton estudiando bajo la dirección de Alonzo Church (1903-1995). Allí presentó la tesis doctoral introduciendo el concepto de hipercomputación.

En 1939 comenzó la II Guerra Mundial y durante seis años trabajó para el gobierno británico para descifrar los códigos que utilizaban los alemanes para comunicarse. En 1940 Francia había sido derrotada con lo cual Inglaterra se había quedado prácticamente sola. Los alemanes tenían planes para hundir los barcos ingleses mediante submarinos. Aunque los ingleses captaban las comunicaciones de los alemanes, no sabían interpretarlas, porque éstos habían desarrollado la máquina *Enigma*, que cambiaba constantemente sus códigos, por lo que era prácticamente imposible descifrarlos. Turing, con sus conocimientos matemáticos, fue capaz de interpretar estos códigos Enigma, por lo que recibiría años más tarde el Orden del Imperio Británico.

En 1943 contribuyó a la construcción del primer ordenador del mundo basado en la electrónica digital: *Colossus*. Se incorporó al *National Physics Laboratory* con el fin de construir un gran ordenador y, entre 1945 y 1948, desarrolló el ACE (*Automatic Computing Engine*), con el que consiguió una aproximación al funcionamiento del cerebro humano.

En 1948 se incorporó a la Universidad de Manchester donde se dedicó a construir una nueva computadora y comenzó a trabajar en el campo de la inteligencia artificial.

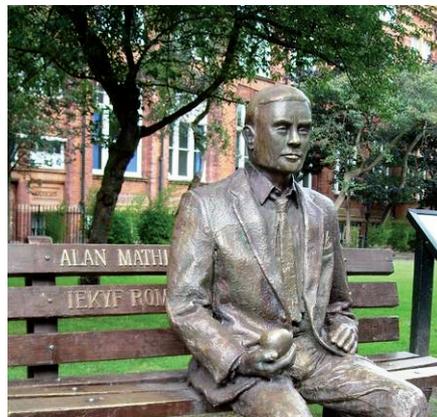


Figura 2. Fotografía de la estatua de Alan M. Turing en la Universidad de Manchester, inaugurada en 2001.

En la Figura 2 se recoge una fotografía de la estatua que se erigió en su honor en esta Universidad. En 1950 volvió a trabajar en matemáticas y en sus teorías relacionadas con aspectos de biología. Dentro de estos trabajos está su contribución a la química, con un artículo cuya primera parte, titulada "*The chemical basis of morphogenesis*", se publicó en 1952 (una segunda parte se publicó después de su muerte).⁵

Durante las investigaciones policiales sobre un robo en su casa, en el que estaba implicado su amante, reconoció su homosexualidad, por lo que se le imputaron los cargos de "indecencia grave y perversión sexual" (los mismos que pesaron, varias décadas antes, sobre Oscar Wilde). Fue condenado a elegir entre un tratamiento hormonal o un internamiento en prisión. Optó por el primero, pero dicho tratamiento le ocasionó importantes cambios fisiológicos y psíquicos que no fue capaz de asumir y le llevó a suicidarse. Aunque su muerte sigue rodeada de cierto misterio, parece que se envenenó mordiendo una manzana que él mismo roció con cianuro. Poco después de su muerte, en 1959, su madre, Sara Turing, escribió una biografía, de la que se ha publicado recientemente una nueva edición ampliada conmemorativa del centenario,⁶ en la que aparece un capítulo de su hermano, donde relata toda la tragedia desde que es acusado por homosexualidad hasta el suicidio.

En 2009, el primer ministro Gordon Brown pidió disculpas, en nombre del gobierno británico, por el trato que recibió Turing en sus últimos años de vida, aunque el Parlamento británico (en 2012) rechazó que su condena fuera revisada, aduciendo que la homosexualidad era delito en su época.

Teoría química de la morfogénesis⁵

El interés de Turing por la química, según la biografía que escribió su madre, comenzó desde que era muy pequeño: coleccionaba productos químicos y como regalo de Navidad, en alguna ocasión, pedía utensilios de laboratorio.⁶ Entre otras cosas, recogía algas y obtenía yodo por sublimación, ante la expectación de sus compañeros. No obstante, solo publicó el artículo antes mencionado que se refiere al estudio de ciertas reacciones químicas para explicar la morfogénesis.⁵

La morfogénesis, que literalmente significa "el origen de la forma" (del griego *μορφή*, *morphé*, forma, y *γένεσις*, *genesis*, creación), es el proceso biológico que lleva a que un

organismo desarrolle su forma. Controla la distribución espacial organizada de las células durante el desarrollo embrionario de un organismo y constituye, junto con el control del crecimiento celular y la diferenciación celular, uno de los aspectos fundamentales del desarrollo biológico.

Turing estableció una pionera combinación de matemáticas y biología para estudiar la creación de formas (los patrones de Turing), que hoy día se han confirmado experimentalmente con patrones biológicos, como la distribución de las rayas de los tigres, de las manchas de los leopardos o de las figuras de las escamas de los peces.

En su artículo indica que sus propuestas no son teorías nuevas, sino que pretenden dar una explicación de cómo un cigoto evoluciona para producir las diferentes partes del nuevo ser. Para ello, desarrolló un modelo con una parte de tipo mecánica y otra de carácter química. Para poder entender su razonamiento, precisó que se necesitaba saber bastante de matemáticas, algo de biología y algo de química.

La parte mecánica describe la posición, velocidad, masa y propiedades elásticas de las células así como las fuerzas entre ellas. La parte química depende de la composición de las células y la difusibilidad de las sustancias entre ellas.

De acuerdo con Turing, para poder encontrar la explicación se tendrán que tener en cuenta:

- Los cambios de posición y velocidad que vendrán dados por las leyes de Newton.
- La tensión como consecuencia de la elasticidad y el movimiento, teniendo en cuenta la presión osmótica, que dependerá de los datos químicos.
- Las reacciones químicas implicadas.
- La difusión de las sustancias químicas, que dependerá de los datos mecánicos.

Prescinde de algunos fenómenos, como las propiedades eléctricas y la estructura interna de la célula, con objeto de disminuir la complejidad del problema y supone que hay unas sustancias químicas, que llama *morphogens* (morfógenos o morfogenes), que se difunden a través del tejido dando una forma geométrica al reaccionar entre sí. Las leyes que las rigen serán las mismas que las de la difusión, por lo que se desplazarán de lugares de alta concentración hacia los de baja concentración, con una velocidad proporcional al gradiente de la concentración. Los poros de la pared celular imponen limitaciones porque, según el tamaño, no todas las moléculas pueden atravesarlos.

Se supone que cualquier reacción química obedece la ley de acción de masas y pone como ejemplo la precipitación del cloruro de plata a partir de la reacción entre el nitrato de plata y el cloruro de sodio disueltos en agua. Pero no siempre sucede así: puede haber reacciones intermedias porque exista un proceso de catálisis. De esta forma, la reacción $A \rightarrow B$ puede ser la suma de $A + G \rightarrow C$ y $C \rightarrow B + G$, que es lo más probable que suceda en el caso de los morfógenos. Estas reacciones pueden tener velocidades diferentes y en este caso se producen variaciones en las concentraciones de las sustancias. Es necesario tener en cuenta todas las reacciones del grupo, sobre todo cuando las velocidades de las reacciones son muy diferentes, como puede suceder si la velocidad de la reacción $A + G \rightarrow C$ es muy diferente a la de $C \rightarrow B + G$. En este caso, esa segunda reacción será independiente de la concentración de A mientras A no se haya consumido. La

velocidad del grupo completo de reacciones depende sólo de la concentración de los reactivos, aunque normalmente no se puede aplicar la ley de acción de masas a la reacción total (es necesario tener en cuenta todas las reacciones intermedias).

En el caso de las células, si hay N células con M morfógenos, el estado del sistema dependería de $M \cdot N$ pero los valores numéricos cambian debido a la difusión. Está claro que la concentración en varias células es solo una aproximación y que el sistema está en continua agitación aunque supone que es una buena aproximación y esta teoría se podrían extender a células que están inmersas en un fluido.

Otro problema que aborda Turing en su trabajo es la causa de que, en la morfogénesis, se rompa la simetría y la homogeneidad. Supone que algunas desviaciones del sistema pueden llegar a un estado de inestabilidad y en estas irregularidades hay ciertos componentes que tienden a crecer, se produce un nuevo equilibrio y, por otra parte, se rompe la simetría. Es una situación similar a la que ocurre con las conexiones de los osciladores eléctricos: se produce una oscilación con una frecuencia determinada de las muchas que alcanzan el oscilador. Es fácil de entender por qué sigue oscilando pero difícil de entender por qué comienza a oscilar: hay muchas perturbaciones que alcanzan al circuito pero solo comienza a oscilar cuando su frecuencia coincide con la de oscilación, aunque después la forma (amplitud) de la onda dependerá de cómo es el circuito.

Lo que sucede en las reacciones químicas y en la difusión es ligeramente diferente: el sistema es homogéneo y no tiene ninguna simetría geométrica, pero la presencia de fluctuaciones debido al número de moléculas que proceden de diferentes reacciones rompe la inestabilidad y desaparece la homogeneidad.

Interpretación de las reacciones químicas oscilantes con las ideas de Turing

Aunque él no tuvo conocimiento de ello, muy relacionado también con la formación de los patrones de Turing, es el descubrimiento, en 1950, de la famosa reacción oscilante de Belousov-Zhabotinsky, como resalta Ball.^{1,2} Se analizará en cierto detalle, para mostrar cómo las teorías de Turing se aplicarían, años después, para la interpretación de esta curiosa reacción y otras similares.

Boris Pavlovich Belousov (1893–1970), estudiando el ciclo de Krebs, se encontró por azar una reacción que oscilaba entre dos estados y que parecía violar las leyes de la termodinámica, se trataba de una mezcla de bromato de potasio, sulfato de Ce (IV) y ácido cítrico. La concentración de los iones Ce (IV) y Ce (III) oscilaba, notándose esto mediante un cambio de color que variaba también de amarillo a incoloro. El cambio se debe a que los iones de Ce (IV) son reducidos por el ácido cítrico a Ce (III), y éstos son oxidados de nuevo a Ce (IV) por los iones bromato. Curiosamente ninguna revista quiso publicar aquel hallazgo, a pesar de que se trataba de un trabajo muy detallado que incluía el efecto de la temperatura y de la acidez en el período de oscilación. Estaba ilustrado con fotografías e indicaba la posibilidad de utilizar la ferroína (fenantrolina de hierro) como indicador por su color, como le había sugerido el profesor Safronov. A pesar de que las críticas de revisores y editores eran bastante mordaces, Belousov

siguió trabajando en el tema y, seis años más tarde, decidió enviar a otra revista un nuevo artículo con más información, pero también fue rechazado.⁷ Por eso abandonó sus trabajos, a pesar de la insistencia del bioquímico E. S. Schnoll.

Según Anatoly Markovich Zhabotinsky (1938–2008),⁸ en 1961, al graduarse en el Departamento de Biofísica de la Universidad Estatal de Moscú estudió la reacción de Belousov, por indicación del Profesor E. S. Schnoll pero sustituyendo el ácido cítrico por ácido malónico, porque así no se interferiría en el cambio de color.

Al estudiarlo, se dio cuenta de que el cambio de color se debía a los iones cerio y no al bromo como opinaba Belousov. Se comunicó con este último, que le facilitó copia de los manuscritos que había enviado a las revistas, sin ningún éxito, y se sintió muy satisfecho de que siguiera estudiando la reacción.

Zhabotinsky siguió buscando qué sustancia era el catalizador y llegó a la conclusión que la reacción consistía en dos partes: la oxidación autocatalítica de los iones Ce (III) a Ce (IV) por bromato y la reducción, en sentido inverso, por el ácido malónico. Durante toda la reacción se estaban produciendo derivados bromados del ácido malónico. La reducción de los iones Ce (IV) iba acompañada de la producción de iones bromuro a partir de los bromoderivados. Los iones bromuro son inhibidores potentes de la oxidación autocatalítica, posiblemente porque hay una reacción rápida del ácido bromoso o de algún derivado de bromo con el autocatalizador.

Este tipo de reacciones oscilantes se conocerían como reacciones Belousov–Zhabotinsky (BZ). El hallazgo no se conoció ampliamente hasta 1967 que se publicó el primer artículo sobre este tema fuera de la Unión Soviética.

En la bibliografía se puede encontrar una reacción oscilante anterior a la BZ, como la que describió Bray⁹ en 1921. En esta reacción el agua oxigenada actúa como oxidante y como reductor: puede oxidar el yodo a yodato pero a la vez puede reducir el yodato a yodo. Bray se dio cuenta de esta posibilidad haciendo cálculos con los datos de energía libre de Lewis y Randall. La primera es autocatalítica y rápida en las disoluciones que contienen yodato y la segunda es lenta.

Las oscilaciones que se producen en este tipo de reacciones son otra consecuencia del balance entre la velocidad de difusión y la velocidad de un proceso autocatalítico. La reacción oscila entre dos ramas que tienen varios procesos intermedios (a veces varias decenas). Pero si la reacción se lleva a cabo en una disolución sin agitación, el cambio de color no sucede en todas partes a la vez y se propaga como una serie regular de “ondas químicas”, creando formas llamativas como se ve en la Figura 3.¹⁰ Aunque estas

ondas químicas son diferentes de los patrones que explica Turing, el fundamento es análogo. A nivel didáctico, se sugiere la consulta de la página web del IES Jorge Manrique de Palencia que ilustra ampliamente la formación de esas “ondas químicas”.¹⁰

Las conexiones entre estos sistemas oscilantes, así como otros tan dispares como las explicaciones del biólogo Meinhardt sobre la propagación de una infección o la propagación de fuego en un bosque, tienen un soporte termodinámico conocido desde los años 1960s, cuando Prigogine y Lefever publicaron su modelo de sistema no lineal oscilante.¹¹ El modelo recibió el nombre de *Brusselator*, por la ciudad en donde se descubrió, y daba una descripción bastante razonable de la reacción de BZ, al establecer que tiene que haber un proceso positivo (autocatalisis) y uno negativo (inhibidor) que incluyen especies químicas con coeficientes de difusión diferentes que operan alejados de un equilibrio termodinámico.

Estas ideas sirven también para fundamentar otros fenómenos de óptica no lineal, catálisis superficial, electroquímica, llamas de baja presión, expansión de la vegetación, etc. Por ello, el número de investigaciones sobre temas relacionados con este tipo de comportamientos ha crecido en las últimas décadas de forma impresionante.

Las reacciones químicas oscilantes pueden dar lugar de forma espontánea a modulaciones espaciales de concentración de las especies involucradas. Esta auto-organización es el resultado de la asociación entre la reacción química y la difusión molecular de las especies. De esta forma, como ya hemos indicado, se originan las conocidas como “ondas viajeras de la actividad química” que pueden dar lugar a diversos tipos de patrones ya sea en bandas paralelas o en celosías hexagonales originando, en determinadas condiciones, los patrones de Turing solo con variar la estructura física del medio, para que la difusión sea distinta.

Los primeros que consiguieron los patrones de Turing mediante reacciones químicas fueron Patrick de Kepper y sus colaboradores,¹² de la Universidad de Burdeos, al estudiar, desde principios de los años 1970s, una reacción alternativa de la BZ conocida como CIMA (*chlorite-iodide-malonic acid*). Después de varios intentos en los que conseguían que aparecieran las estructuras pero que desaparecían rápidamente, consiguieron unas estructuras estables en diciembre de 1989, en una cápsula petri con un gel, que dificultaba el movimiento. La reacción está controlada por los iones yoduro (activador) y clorito (inhibidor), que tienen inicialmente una velocidad de difusión similar. Al utilizar almidón, como detector de la presencia del yodo; yodo y almidón forman un complejo que por su tamaño se difunde con dificultad a través del gel. Esa difusión lenta es lo que convierte a esta reacción en el ejemplo ideal de las estructuras que explicaba Turing.

Actualmente son muy numerosos los trabajos e investigaciones que se refieren a este tema y entre ellos citaríamos como más interesantes los de este mismo grupo de la Universidad de Burdeos.^{13–15}

Vanag y Epstein¹⁶ hacen un interesante resumen de este tema y de las diferentes reacciones y situaciones que permiten llegar a las estructuras de Turing. Entre las reacciones citan la conocida como FIS (ferrocianuro, yodato y sulfito), en la



Figura 3. Fotografía de “ondas químicas” en una reacción oscilante¹⁰ (derecha) y simulación computacional de una reacción análoga.

que el ferrocianuro actúa como control del yodo, la CDIMA (*chlorine dioxide, iodide, malonic acid*), y las conocidas como reacciones Landolt (yodato y bisulfito con almidón, yodato y arsenito, etc.). Todas ellas se encuentran en el texto de Shakhshiri,¹⁷ como ejemplo de reacciones químicas para vistosas demostraciones.

Una de las que se considera más espectacular es la de Briggs-Rauscher,¹⁸ que en realidad es la unión de las reacciones de Bray⁹ y de BZ,⁸ y que emplea yodato de potasio, peróxido de hidrógeno, ácido perclórico (se puede sustituir por sulfúrico), ácido malónico, sulfato de manganeso(II) y almidón. Se puede ver en un video realizado en la Universidad de Huelva.¹⁹

Field²⁰ propone un experimento de cátedra con la reacción BZ que consiste en utilizar un cilindro sin graduar en el que inicialmente se colocan tres de los reactivos y se agita mecánicamente, hasta que se mezclen bien. Posteriormente, cuando ya está en reposo, se le añade, cuidadosamente con una pipeta, el cuarto reactivo. De esta forma aparecen una serie de bandas a lo largo del cilindro. Cuando se mezcla todo se produce la reacción de oscilación, pero como la mezcla no es perfecta, se pueden ver unas bandas como si fuera amebas que se desplazan a lo largo de la disolución.

Epstein,²¹ en un interesante artículo en el que explica detalladamente en qué consisten las “ondas químicas” y que acompaña del cálculo matemático, propone la realización de una de las reacciones Landolt: arsenito-yodato en medio tampón de hidrogenosulfato y sulfato. El experimento se realiza en un tubo de ensayo, para comprobar cómo se desplaza la onda formando anillos a lo largo del tubo.

Se pueden formar los patrones de Turing en reacciones oscilantes mediante el control de la temperatura, la velocidad de agitación, o el medio en el que se desarrolla, el cual puede obstaculizar la difusión (como puede ser una microemulsión o medios microheterogéneos). Se pueden variar las formas introduciendo un agente complejante que varíe la velocidad de difusión. Si alguna de las sustancias es fotosensitiva se pueden variar por iluminación, incluso poniendo una pantalla con diferentes figuras que dejen pasar la luz en determinadas posiciones.

El estudio de este tipo de reacciones químicas, por ser más sencillo y más fácil de controlar, ha sido fundamental para poder entender los fenómenos biológicos y la teoría de los morfógenos.

Conclusiones

Al conmemorarse el centenario del nacimiento de Alan Turing, padre de la informática y de la inteligencia artificial, hemos resumido algunos aspectos en los que la contribución de sus ideas matemáticas permitieron aclarar, con el paso de los años, algunos aspectos de biología y de química, destacando la teoría química de la morfogénesis, las reacciones oscilantes y la formación de los patrones de Turing.

A nivel docente, el tratamiento de estos temas puede ser buena ocasión para introducir a los alumnos de los distintos niveles educativos en la importancia de la interdisciplinariedad en el avance de la ciencia, así como el interés que supone el conocimiento matemático para la química, entre otros temas.

En particular, es llamativa para los alumnos la consideración de los patrones de Turing para la justificación de formas naturales, como se recogen, a modo de ejemplo, en la Figura 4.



Figura 4. Formas geométricas naturales que se explican por los patrones de Turing.

Ball explica la formación de patrones de Turing de algunas reacciones oscilantes, de una forma muy didáctica, comparándolo con lo que sucede con la arena del desierto (Figura 5) cuando la lleva el viento y se forman montículos y hondonadas al depositarse los granos de arena: a medida que la cresta se hace más grande impide que se depositen granos de arena en las hondonadas, se trata de un sistema activador-inhibidor que activa la cresta e inhibe la hondonada.



Figura 5. Arena del desierto, donde se aprecia una estructura ondulada que responde a los patrones de Turing.

Agradecimiento

Se agradece la ayuda recibida por la Universidad Politécnica de Madrid, a través del proyecto de innovación educativa “Agentes activos y catalizadores: nuevos recursos educativos para la química”.

Bibliografía

1. P. Ball, *Chemistry World*. **2012**, 9(6), 46–50.
2. P. Ball, *Nature's patterns: a tapestry in three parts*. Oxford University Press, **2011**.
3. M. H. A. Newman, Alan Mathison Turing. 1912–1954, *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*. Vol. 1/1955, pp 253–263. Disponible en: <http://tinyurl.com/c6s7tdu>, visitada el 2/12/2012.
4. Alan Turing from Wikipedia: <http://tinyurl.com/47kug>, visitada el 2/12/2012.
5. A. M. Turing, *Phil. Trans. Royal Soc. London, Series B, Biological Sci.* **1952**, 237, 37–72.
6. S. Turing, J. F. Turing, L. Irvine, M. Davis, *Alan M. Turing: Centenary Edition*, Cambridge University Press, **2012**.
7. A. T. Winfree, *J. Chem. Ed.* **1984**, 61, 661–663.
8. A. M. Zhabotinsky, *Chaos* **1991**, 1, 379–386.
9. W. C. Bray, *J. Am. Chem. Soc.* **1921**, 43, 1262–1267.
10. Aulas virtuales del IES Jorge Manrique de Palencia: <http://tinyurl.com/c7s5pmq>, visitada el 2/12/2012.
11. I. Prigogine, R. Lefever, *J. Chem. Phys.* **1968**, 48, 1695–1700.
12. V. Castets, E. Dulos, J. Boissonade, P. de Kepper, *Phys. Rev. Lett.* **1990**, 64, 2953–2956.
13. J. Horváth, I. Szalai, P. de Kepper, *Science*, **2009**, 324, 772–775.
14. I. Szalai, D. Cuiñas, N. Takács, J. Horváth, P. de Kepper, *Interface Focus* **2012**, 2, 417–432.
15. Structures et dynamiques non-linéaires (équipe scientifique du Centre National de Recherche Paul Pascal): <http://tinyurl.com/cbzojtc>, visitada el 2/12/2012.
16. V. K. Vanag, I. R. Epstein, *Chaos* **2008**, 18, 026107.
17. B. Z. Shakhshiri, *Chemical Demonstrations: A Handbook for Teachers of Chemistry*, Vol. 2, University of Wisconsin Press, **1985**.
18. T. S. Briggs, W. C. Rauscher *J. Chem. Educ.* **1973**, 50, 496.
19. Universidad de Huelva, La reacción oscilante de Briggs-Rauscher: <http://tinyurl.com/bnheejr>, visitada el 2/12/2012.
20. R. J. Field, *J. Chem. Educ.* **1972**, 49, 308–3011.
21. I. R. Epstein, *J. Chem. Educ.* **1983**, 60, 494–496.

EMBO Workshop
The programme for this event was reviewed and approved by the EMBO Course Committee.

Glycoproteins from Structure to Disease

24–26 April 2013 | Balearic Islands, Spain

ORGANIZERS
Annalisa Pastore
National Institute for Medical Research, UK
Josefa Donoso
University of Balearic Islands, Spain
Pierandrea Temussi
National Institute for Medical Research, UK
Gabriel Martorell
University of Balearic Islands, Spain
Miquel Adrover
University of Balearic Islands, Spain

CO-ORGANIZERS
Francisco Muñoz
University of Balearic Islands, Spain
Bartomeu Vilanova
University of Balearic Islands, Spain
Juan Frau
University of Balearic Islands, Spain
Joaquín Ortega
University of Balearic Islands, Spain
Sebastian Alberti
University of Balearic Islands, Spain

REGISTRATION
before 15 February 2013
Students* 250 EUR
Academics 350 EUR
Industry 400 EUR
before 15 March 2013
Students* 300 EUR
Academics 400 EUR
Industry 450 EUR
*proof of student status required

Includes:

- access to oral and poster presentations
- conference bag and a CD-ROM with the abstracts
- coffee breaks and the certificate of attendance

SPEAKERS

Frédéric Allain
Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Switzerland

R. Leo Brady
University of Bristol, UK

Andrea Carfi
Novartis Pharmaceuticals Corporation, USA

Jesús Jiménez-Barbero
Spanish National Research Council (CSIC), Spain

Xavier Fernandez-Busquets
Barcelona Centre for International Health Research (CRESB), Spain

Ana Maria Ponces-Freire
University of Lisbon, Portugal

Koby Levy
Weizmann Institute, Israel

Cameron Neylon
RAL, Didcot, UK

Kerensa Broersen
University of Twente, Netherlands

Human Rezaei
Institut Scientifique de Recherche Agronomique (INRA), France

Louise Serpell
University of Sussex, UK

Ignacio Tuñón
University of Valencia, Spain

Paul J Thornalley
University of Coventry, UK

Christine M. Szymanski
University of Alberta, USA

Mario Schubert
Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Switzerland

Kelley Moremen
University of Georgia, USA

CONTACT
Margalida Homar
UIBCongrés, Technical Secretariat
Tel +3497117200
fax +34971172020
info@uibcongres.org

EMBO
excellence in life sciences

<http://events.embo.org/13-glycoproteins>

