

**JOHNJOE McFADDEN**

**JIM AL-KHALILI**

# **BIOLOGÍA AL LÍMITE**

**CÓMO FUNCIONA LA VIDA  
A MUY PEQUEÑA ESCALA**

**RBA**

Título original: *Life on the Edge*

© Johnjoe McFadden y Jim Al-Khalili, 2014.

© de la traducción: Joandomènec Ros, 2015.

© de esta edición digital: RBA Libros, S.A., 2019.

Diagonal, 189 - 08018 Barcelona.

[www.rbalibros.com](http://www.rbalibros.com)

REF.: ODBO509

ISBN: 9788491874294

Composición digital: Newcomlab, S.L.L.

Queda rigurosamente prohibida sin autorización por escrito del editor cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra, que será sometida a las sanciones establecidas por la ley. Todos los derechos reservados.

## Índice

### [Agradecimientos](#)

#### [1. Introducción](#)

#### [2. ¿Qué es la vida?](#)

#### [3. Los motores de la vida](#)

#### [4. La pulsación cuántica](#)

#### [5. Buscando la casa de Nemo](#)

#### [6. La mariposa, la mosca del vinagre y el petirrojo cuántico](#)

#### [7. Genes cuánticos](#)

#### [8. La mente](#)

#### [9. Cómo empezó la vida](#)

#### [10. Biología cuántica: la vida en el límite de una tempestad](#)

#### [Epílogo: vida cuántica](#)

#### [Notas](#)

PARA PENNY Y OLLIE, JULIE, DAVID Y KATE

## AGRADECIMIENTOS

Ha costado tres años escribir este libro, aunque los autores han colaborado en la investigación de este campo nuevo y excitante, que une la física cuántica, la bioquímica y la biología, desde hace casi dos décadas. Pero cuando se trata de esta área transdisciplinar de la ciencia que es la biología cuántica es imposible llegar a ser lo bastante experto como para explicar, con la suficiente profundidad y con la suficiente confianza, toda la ciencia que se necesita para pintar todo el cuadro, en particular cuando se trata de escribir el primer libro sobre el tema para un público profano.

Es totalmente cierto que ninguno de los dos autores podríamos haber escrito esta obra por separado, puesto que cada uno de nosotros aporta al conjunto su propia experiencia desde los mundos de la física y de la biología, respectivamente. Es todavía más cierto que no habríamos podido producir un libro del que ambos estamos inmensamente orgullosos sin la ayuda y los consejos de muchas personas, la mayoría de las cuales son líderes mundiales en sus áreas de investigación.

Estamos en deuda con Paul Davies por las muchas conversaciones fructíferas que ha tenido con nosotros a lo largo de los últimos quince años sobre mecánica cuántica y su importancia potencial en el campo de la biología. También lo estamos con muchos físicos, químicos y biólogos que ahora están haciendo grandes progresos en este nuevo campo y de cuya pericia y profundo conocimiento de sus áreas de especialidad carecíamos, y seguimos careciendo. En particular, estamos en deuda con Jennifer Brookes, Gregory Engel, Adam Godbeer, Seth Lloyd, Alexandra Olaya-Castro, Martin Plenio, Sandu Popescu, Thorsten Ritz, Gregory Scholes, Nigel Scrutton, Paul Stevenson, Luca Turin y Vlatko Vedral. También queremos darle las gracias a Mirela

Dumic, coordinadora del Instituto de Estudios Avanzados (IAS) de la Universidad de Surrey, que casi en solitario organizó el taller internacional «Biología cuántica: Situación actual y oportunidades» en Surrey en 2012, que tuvo gran éxito y que contó con la financiación conjunta del IAS, el Consejo de Investigación en Biotecnología y Ciencias Biológicas (BBSRC) y el proyecto MILES (Modelos y Matemática en las Ciencias de la Vida y Sociales). Dicho taller reunió a muchas de las principales figuras (se trata todavía de un campo emergente y el número de personas que trabajan en él es relativamente reducido) que en la actualidad se hallan implicadas en la investigación sobre biología cuántica en todo el mundo, y que contribuyeron a que en verdad nos sintiéramos parte de esta apasionante comunidad de investigación.

Una vez tuvimos el borrador del libro, pedimos a varios de los colegas citados con anterioridad que lo leyeran y nos dieran su opinión. Por ello estamos especialmente agradecidos a Martin Plenio, Jennifer Brookes, Alexandra OlayaCastro, Gregory Scholes, Nigel Scrutton y Luca Turin. También queremos agradecer a Philip Ball, Pete Downes y Greg Knowles el haber leído parte del borrador final, o el texto en su integridad, y por haber proporcionado muchos comentarios perspicaces y útiles, que han mejorado muchísimo el libro. Le debemos un «¡gracias!» muy grande a nuestro agente, Patrick Walsh, sin el cual el libro no habría despegado, y a Sally Gaminara, de Random House, por su fe en nosotros y por entusiasmarse tanto con el proyecto. Y debemos un «¡gracias!» todavía mayor a Patrick y Carrie Plitt, de Conville & Walsh, por sus consejos y sugerencias sobre la estructura y formato del libro, y por ayudarnos a modelarlo en una versión final que se halla a años luz de su chapucero estado inicial. También estamos agradecidos a Gillian Somerscales por su brillantez editorial.

Y por último, pero no por ello menos importante, queremos dar las gracias a nuestras familias por su apoyo sin lími-

tes, en particular durante aquellos períodos en los que nos enfrentábamos a finales de plazo, tanto los que nos imponíamos nosotros como los fijados por los editores, lo que significaba dejar todos los demás compromisos a un lado y encerrarnos con nuestros ordenadores portátiles. Hemos perdido la cuenta de las tardes, fines de semana y vacaciones familiares en los que la biología cuántica tenía que ser lo primero. Esperamos que el libro haya valido la pena.

Por nosotros dos y por el nuevo campo de la biología cuántica, confiamos en que el viaje no haya hecho más que empezar.

JOHNJOE M CFADDEN Y JIM AL-KHALILI

*Agosto de 2014*

## 1

## INTRODUCCIÓN

El frío invernal ha llegado pronto a Europa este año y hay un helor penetrante en el aire vespertino. Enterrado en lo más recóndito de la mente de una joven hembra de petirrojo, un sentido de propósito y determinación, que hasta ahora había sido vago, se hace más intenso.

El pájaro ha pasado las últimas semanas devorando muchos más insectos, arañas, gusanos y bayas de lo que solía ser su ingesta normal, y ahora su peso es casi el doble del que tenía cuando su pollada salió del nido, en agosto. Este peso adicional es, en su mayor parte, reservas de grasa, que necesitará como combustible para el arduo viaje en el que está a punto de embarcarse.

Esta será su primera migración lejos del bosque de abetos del centro de Suecia en el que ha vivido a lo largo de su corta vida y donde crio a sus polluelos hace solo unos meses. Por suerte para ella, el invierno anterior no fue muy severo, porque hace un año no había llegado todavía a la edad adulta y, por lo tanto, no era lo bastante fuerte para emprender un viaje tan largo. Pero ahora, liberada de sus responsabilidades maternas hasta la próxima primavera, solo tiene que pensar en sí misma, y está lista para huir del invierno que se acerca, dirigiéndose hacia el sur para buscar un clima más cálido.

Han pasado dos horas desde la puesta de sol. En lugar de instalarse para pasar la noche, salta en la penumbra creciente hasta la punta de una rama cercana a la base del enorme árbol que ha considerado su hogar desde la primavera. Se sacude rápidamente, como si fuera un corredor de maratón que relaja los músculos antes de una carrera. Su pecho anaranjado brilla a la luz de la luna. El esmerado es-



fuerzo y cuidado que puso en la construcción de su nido (que está apenas a unos pocos metros de distancia, parcialmente escondido sobre la corteza cubierta de musgo del tronco del árbol) es ahora un tenue recuerdo.

No es el único pájaro que se prepara para la marcha, pues otros petirrojos, tanto machos como hembras, han decidido también que esta es la noche adecuada para iniciar su larga migración hacia el sur. En los árboles que la rodean, la hembra de petirrojo oye cantos fuertes y penetrantes que ahogan los sonidos usuales de otros animales forestales nocturnos. Es como si las aves se sintieran obligadas a anunciar su partida al enviar a los demás habitantes del bosque el mensaje de que deberían pensárselo dos veces antes de plantearse invadir el territorio de los pájaros y los nidos vacíos mientras estén fuera. Porque estos petirrojos, con toda seguridad, planean volver en la primavera.

Con una rápida inclinación de la cabeza a uno y otro lado, para asegurarse de que no hay moros en la costa, la hembra de petirrojo echa a volar hacia el cielo vespertino. Las noches se han ido haciendo más largas a medida que avanzaba el invierno, y tiene por delante unas diez horas bien buenas de vuelo antes de que pueda volver a descansar.

Emprende un rumbo de  $195^\circ$  ( $15^\circ$  al oeste en dirección sur). A lo largo de los días siguientes, seguirá volando, más o menos, en la misma dirección, y en un día bueno recorrerá trescientos kilómetros. No tiene ni idea de lo que le espera a lo largo del viaje, ni sensación alguna del tiempo que le tomará. El terreno que rodea su bosque de abetos le es familiar, pero pasados unos cuantos kilómetros está volando sobre un paisaje iluminado por la luna y extraño, de lagos, valles y pueblos.

En algún punto cercano al mar Mediterráneo, la hembra de petirrojo alcanzará su destino; aunque no se dirige a ninguna ubicación específica, cuando llegue a un punto favorable se detendrá y memorizará los hitos locales para poder retornar allí en los años siguientes. Si tiene la fuerza sufi-

ciente, puede incluso llegar a volar directamente hasta la costa septentrional de África. Pero esta es su primera migración, y ahora su única prioridad es escapar del frío penetrante del invierno nórdico que se avecina.

La hembra no parece reparar en los petirrojos que la rodean y que vuelan todos, aproximadamente, en la misma dirección; algunos de ellos ya deben de haber hecho este viaje muchas veces. Su visión nocturna es magnífica, pero no busca ningún hito en el terreno (como haríamos nosotros si emprendiéramos un viaje de este cariz), ni resigue el patrón de las estrellas en el claro cielo nocturno al tiempo que consulta su mapa celeste interno, como hacen otras muchas aves que migran por la noche. En lugar de ello, posee una habilidad muy notable y varios millones de años de evolución a los que agradecerles su capacidad de hacer lo que se convertirá en una migración otoñal anual, un trayecto de más de tres mil kilómetros.

Desde luego, la migración es algo común en el reino animal. Por ejemplo, cada invierno, los salmones frezan en los ríos y lagos de Europa septentrional, dejando alevines que, una vez que han hecho eclosión, siguen el curso de su río hasta el mar y hacia el Atlántico Norte, donde crecen y maduran; tres años después, estos salmones jóvenes retornan para reproducirse en los mismos ríos y lagos en los que salieron del huevo. Las mariposas monarca del Nuevo Mundo migran miles de kilómetros hacia el sur y atraviesan todo Estados Unidos en otoño. Ellas, o sus descendientes (porque se reproducen en ruta), retornan luego al norte, a los mismos árboles en los que se convirtieron en ninfas en primavera. Las tortugas verdes que salen del huevo en la isla de Ascensión, en el Atlántico Sur, nadan a lo largo de miles de kilómetros de océano antes de volver, cada tres años, a reproducirse en exactamente la misma playa de la que surgieron, cubierta de cáscaras de huevos. Y la lista sigue: muchas especies de aves, ballenas, caribúes, langostas de mar, ranas, salamandras e incluso abejas son capaces de em-

prender viajes que pondrían en un aprieto a los mayores exploradores humanos.

Durante siglos ha sido un misterio la manera en que los animales consiguen encontrar su camino alrededor del globo. Ahora sabemos que utilizan métodos de lo más variado: algunos emplean la navegación solar durante el día y la navegación celeste durante la noche; algunos memorizan hitos en el terreno; otros pueden incluso oler su camino por el planeta. Pero el sentido de navegación más misterioso de todos es el que posee el petirrojo: la capacidad de detectar la dirección e intensidad del campo magnético de la Tierra, lo que se conoce como magnetorrecepción o magnetocepción. Y aunque ahora sabemos de otros muchos animales que poseen esta capacidad, la manera en que el petirrojo (*Erithacus rubecula*) encuentra su camino a través del globo es del mayor interés para nuestro relato.

El mecanismo que permite a nuestra hembra de petirrojo saber lo lejos que ha de volar y en qué dirección está codificado en el ADN que heredó de sus padres. Esta capacidad es refinada e insólita: un «sexto sentido» que utiliza para trazar su rumbo. Porque, como muchas otras aves, y de hecho insectos y animales marinos, la hembra de petirrojo tiene la capacidad de sentir el débil campo magnético de la Tierra y de extraer de él información direccional mediante un sentido de navegación innato, que en su caso necesita un nuevo tipo de brújula química.

La magnetocepción es un enigma. El problema es que el campo magnético de la Tierra resulta muy débil: entre 30 y 70 microteslas en la superficie, suficiente para desviar una aguja de brújula finamente equilibrada y sin apenas fricción, pero solo alrededor de la centésima parte de la fuerza de un típico imán de frigorífico. Esto plantea un enigma: para que un animal detecte el campo magnético de la Tierra, este ha de influir de algún modo en una reacción química en algún lugar del cuerpo del animal; al fin y al cabo, así es como todos los seres vivos, nosotros incluidos, sienten

cualquier señal externa. Pero la cantidad de energía que proporciona la interacción entre el campo magnético de la Tierra y las moléculas del interior de las células vivas es inferior a la milmillonésima parte de la energía necesaria para romper o producir un enlace químico. Así pues, ¿cómo puede percibir este campo magnético el petirrojo?

Los misterios, por pequeños que sean, resultan fascinantes porque siempre existe la posibilidad de que su solución conduzca a un cambio fundamental en nuestra comprensión del mundo. Por ejemplo, las reflexiones de Copérnico en el siglo XVI acerca de un problema relativamente menor con relación a la geometría del modelo geocéntrico del sistema solar de Ptolomeo, le llevó a desplazar el centro de gravedad del universo y apartarlo de la humanidad. La obsesión de Darwin por la distribución geográfica de las especies animales y el misterio de por qué las especies de pinzones y sinsontes de islas aisladas tienden a ser tan especializadas le condujeron a proponer su teoría de la evolución. Y la solución del físico alemán Max Planck al misterio de la radiación de un cuerpo negro, relacionado con la manera en que los objetos calientes emiten calor, le llevó a sugerir que la energía se halla en burujos discretos llamados «cuantos», lo que condujo al nacimiento de la teoría cuántica en el año 1900. Así pues, ¿acaso la solución del misterio de cómo encuentran las aves su camino alrededor del globo podría conducir a una revolución en el campo de la biología? La respuesta, por extraño que parezca, es que sí.

Pero misterios como este son también el lugar predilecto de pseudocientíficos y místicos. Tal como afirmó Peter Atkins, un químico de Oxford, en 1976: «El estudio de los efectos del campo magnético sobre las reacciones químicas ha sido desde hace mucho tiempo un terreno por el que triscan los charlatanes». <sup>1</sup> En efecto, en un momento u otro se ha propuesto toda suerte de exóticas explicaciones de los mecanismos que emplean las aves migratorias para

guiarse a lo largo de sus rutas, desde la telepatía hasta antiguos alineamientos (rutas invisibles que conectan varias ubicaciones arqueológicas o geográficas supuestamente dotadas de energía espiritual), por no hablar del concepto de «resonancia mórfica» que se inventó el polémico parapsicólogo Rupert Sheldrake. Por lo tanto, las reservas que planteaba Atkins en la década de 1970 eran comprensibles, y reflejaban un escepticismo generalizado entre la mayoría de los científicos que por aquel entonces trabajaban para encontrar cualquier indicio de que los animales eran capaces de notar el campo magnético de la Tierra. Sencillamente, no parecía que hubiera ningún mecanismo molecular que permitiera que un animal lo hiciera... o, al menos, ninguno dentro del ámbito de la bioquímica convencional.

Pero el mismo año en que Peter Atkins manifestaba su escepticismo, el equipo de ornitólogos alemanes radicado en Fráncfort compuesto por el matrimonio Wolfgang y Roswitha Wiltschko publicó en *Science*, una de las principales revistas académicas mundiales, un importantísimo artículo que estableció, sin ningún género de dudas, que, en efecto, los petirrojos pueden detectar el campo magnético de la Tierra. <sup>2</sup> Y, todavía más notable, demostraron que el sentido de las aves no parece funcionar de la manera en que lo hace una brújula normal. Porque mientras que las brújulas indican la diferencia entre el polo norte y el polo sur magnéticos, un petirrojo solo puede distinguir entre polo y ecuador.

FIGURA 1.1. El campo magnético de la Tierra.

Para comprender cómo podría funcionar una brújula de este tipo, tengamos en cuenta las líneas del campo magnético, las sendas invisibles que definen la dirección de un campo magnético y a lo largo de las cuales se alineará la aguja de una brújula cuando se coloque en cualquier punto de dicho campo. Las conocemos, sobre todo, por ser las lí-

neas que generan las limaduras de hierro sobre un pedazo de papel situado sobre un imán de barra. Imagine ahora el lector toda la Tierra como un imán de barra gigantesco con las líneas del campo magnético que surgen del polo sur, irradian hacia fuera y se curvan en bucles para entrar en su polo norte (véase figura 1.1). La dirección de estas líneas de campo cerca de cada polo es casi vertical, y salen o entran del suelo, pero se aplanan y corren casi paralelas a la superficie del planeta cuanto más cerca se hallan del ecuador. De modo que una brújula que mida el ángulo de inclinación entre las líneas del campo magnético y la superficie de la Tierra, lo que llamamos una «brújula de inclinación», puede distinguir entre la dirección hacia un polo y la dirección hacia el ecuador, pero no puede distinguir entre los polos norte y sur, porque las líneas de campo tienen el mismo ángulo con el suelo en ambos extremos del globo. El estudio de 1976 de los Wiltschko estableció que el sentido magnético del petirrojo funcionaba exactamente igual que una brújula de inclinación. El problema era que nadie tenía idea de cómo una brújula de inclinación biológica de este tipo podía funcionar, porque, sencillamente, en aquella época no existía mecanismo conocido, ni siquiera concebible, que pudiera explicar de qué manera podía detectarse el ángulo de inclinación del campo magnético de la Tierra en el cuerpo de un animal. La respuesta resultó hallarse dentro de una de las más sorprendentes teorías científicas de la época moderna, y tenía que ver con la extraña ciencia de la mecánica cuántica.

#### UNA REALIDAD OCULTA Y FANTASMAGÓRICA

Si realizamos una encuesta informal entre científicos y les preguntamos cuál creen que es la teoría científica que ha tenido más éxito, que es más general y que ha sido más importante, es probable que la respuesta dependa de si le hacemos la pregunta a alguien especializado en ciencias fi-

sicas o en ciencias biológicas. La mayoría de los biólogos considera que la teoría de Darwin de la evolución mediante selección natural es la idea más profunda que jamás se haya concebido. Sin embargo, es probable que un físico aduzca que la mecánica cuántica debería ocupar el puesto de honor; al fin y al cabo, es el fundamento sobre el que se asienta gran parte de la física y de la química, y nos proporciona un panorama notablemente completo de las piezas fundamentales de todo el universo. De hecho, sin su poder explicativo, desaparecería gran parte de lo que ahora sabemos acerca de cómo funciona el mundo.

Casi todo el mundo habrá oído hablar de «mecánica cuántica», y la idea de que esta es un área de la ciencia desconcertante y difícil que solo comprende una minoría muy reducida e inteligente de humanos pertenece a la cultura popular. Pero lo cierto es que la mecánica cuántica ha sido parte de toda nuestra vida desde principios del siglo xx . La ciencia se desarrolló como teoría matemática a mediados de la década de 1920 para explicar el mundo de lo muy pequeño (el micromundo, como se le llama), es decir, el comportamiento de los átomos que conforman todo lo que vemos a nuestro alrededor, y las propiedades de las partículas todavía más pequeñas que constituyen dichos átomos. Por ejemplo, al describir las reglas que los electrones obedecen y cómo estos se disponen dentro de los átomos, la mecánica cuántica socaliza toda la química, la ciencia de los materiales e incluso la electrónica. A pesar de su carácter extraño, sus reglas matemáticas se hallan en el núcleo mismo de la mayoría de los avances tecnológicos del último medio siglo. Sin la explicación que la mecánica cuántica nos proporciona de cómo los electrones se desplazan a través de los materiales, no habríamos comprendido el comportamiento de los semiconductores, que son el fundamento de la electrónica moderna, y sin una comprensión de los semiconductores no habríamos desarrollado ni el transistor de silicio ni, posteriormente, el microchip y el