

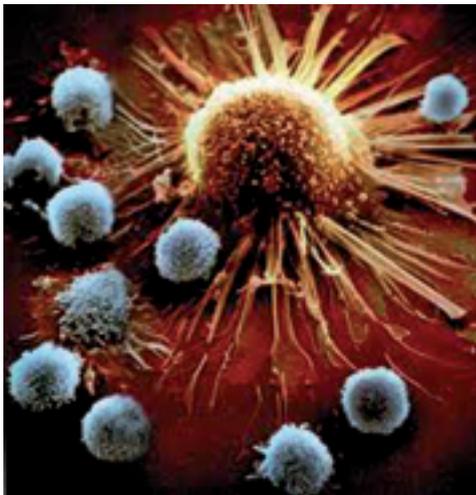
Puntos de interés

Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica y sus actores¹



MODELANDO LAS RELACIONES DEL SISTEMA INMUNE CON CÉLULAS CANCERÍGENAS

Los avances en las técnicas de inmunoterapia contra el cáncer fueron, para la revista *Science*, el mayor hito científico del 2013, habiendo recibido un enorme interés mediático en junio de 2015 en *The Guardian* y *The Economist*. Dicho tratamiento pretende **reforzar el sistema inmune en el proceso de identificación y destrucción de las células cancerígenas**. En los últimos años se viene desarrollando una intensa actividad en la **modelización matemática**



y física del cáncer. Algunos de estos modelos involucran diversas poblaciones celulares que interactúan entre sí mediante diversos mecanismos físicos y químicos. En particular, **modelos formados por células cancerígenas, sanas e inmunitarias** han sido desarrollados con éxito recientemente.

Se sabe que, **cuando una célula inmunitaria reconoce a una cance-**

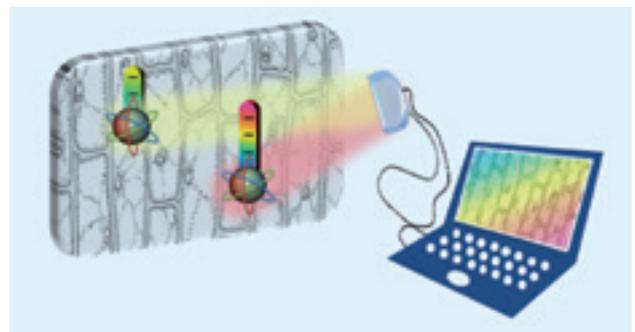
rigena, procede a inducir su muerte o apoptosis mediante la perforación de su membrana y la introducción de unas proteínas a través de la misma. (La figura ilustra uno de estos “ataques” mostrando un grupo de linfocitos rodeando a una célula cancerígena). Ello implica que, aun cuando las células inmunitarias sean muy eficaces, la geometría del tumor tenga su importancia. Llegado un punto, no importa cuántas células inmunitarias de más haya, dado que al no estar en contacto, apenas ejercen una influencia. Por este motivo la función que rige la tasa de destrucción de las células cancerígenas satura, alcanzando un valor máximo. Sin embargo, cuando las células inmunitarias no reconocen fácilmente a las células cancerígenas del tumor, no se observa una saturación de dicha velocidad en la práctica. Esta observación puede explicarse de modo matemático. En los casos en los que la eficacia en el reconocimiento de las células cancerígenas sea moderada, la velocidad de destrucción de las células cancerígenas no llega a saturar completamente. El análisis del modelo matemático mediante el uso de técnicas de la Dinámica No Lineal permite hacer una estimación del nivel de expresión de ligandos (proteínas en la membrana de las células cancerígenas) para destruir plenamente el tumor, donde están las células cancerígenas.

Alvaro G. López, Jesús M. Seoane y Miguel A. F. Sanjuán de la URJC han validado y estudiado recientemente (DOI: 10.1007/s11538-014-0037-5) un **modelo matemático con tres poblaciones celulares y una ley generalizada para la velocidad con la que el sistema inmune destruye el tumor**. Dicha ley está formada por una combinación de términos que saturan y que no saturan. El modelo servirá sin duda de punto de partida para el desarrollo de otros

modelos más realistas. De hecho, se están actualmente desarrollando modelos híbridos de autómatas celulares para confirmar las hipótesis planteadas en este trabajo con respecto a la ley que rige la velocidad de destrucción de los tumores.

CÓMO HACER UN TERMÓMETRO CUÁNTICO

Recientes avances en la **preparación y manipulación** de sistemas cuánticos ya permiten trabajar en el laboratorio con sensores formados por **sistemas cuánticos individuales**. Se ha hecho así posible, en particular, estimar **temperaturas con precisión del orden del milikelvin** y una resolución espacial por debajo de la décima de micra. Este tipo de tecnología tiene **aplicaciones**



inmediatas en campos tan diversos como la física de materiales, la microelectrónica, la química, la biofísica y, muy especialmente, la medicina, ya

¹ Animamos al lector a que proponga contribuciones para ser consideradas en esta sección y, en su caso, a debatir temas que aquí se presentan enviando sus comentarios para la sección “Pulsos e impulsos”.

que estos “**nano-termómetros**” podrían convertirse en una potente herramienta de diagnóstico, facilitando el tratamiento selectivo de enfermedades a nivel celular.

La imagen ilustra cómo combinando estimaciones —construidas, por ejemplo, a partir de medidas de fluorescencia de distintos centros de color en nano-diamantes distribuidos sobre una muestra biológica— es posible trazar un **mapa de temperaturas de alta resolución**. Además de los desafíos experimentales que plantea esta **termometría nanométrica**, surgen **preguntas fundamentales**. ¿Impone el tamaño de la sonda límites fundamentales en su sensibilidad? Si así fuera, ¿qué sistemas cuánticos son óptimos para medir temperaturas?

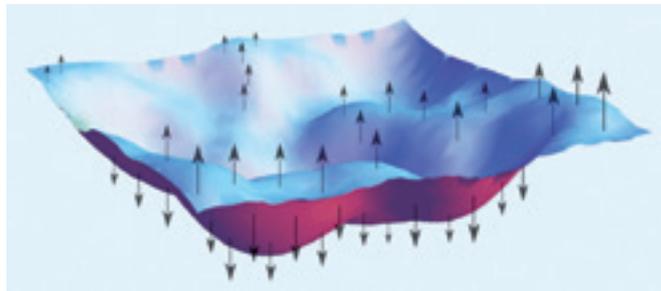
Luis A. Correa, Mohammad Mehboudi y Anna Sanpera, de la Universitat Autònoma de Barcelona, en colaboración con la Universidad de Nottingham han dado respuesta a estas y otras preguntas (DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.220405). En este trabajo **modelan nano-termómetros como sistemas cuánticos individuales en equilibrio térmico con la muestra**. Midiendo la energía de la sonda, estiman la **temperatura de la muestra** como aquella que hace compatibles las probabilidades de ocupación observadas en los niveles de energía con un estado de equilibrio térmico. Haciendo uso de herramientas estadísticas, también es posible calcular las barras de error que acompañan a esta estimación. **Minimizar la incertidumbre**, pasa por maximizar la capacidad calorífica de la sonda, lo cual no es de extrañar dado que la capacidad calorífica es una medida de la variación en la energía media de un sistema ante pequeños cambios de temperatura.

Los investigadores establecen así que el **espectro de energía óptimo para una sonda** arbitraria con un número finito de estados cuánticos, posee tan sólo dos niveles de energía: un nivel fundamental, que contiene un único estado, y un nivel excitado, a una cierta energía óptima dependiente de la temperatura, que contiene todos los estados cuánticos restantes. Nano-termómetros con

un espectro de energías más rico proporcionarían una menor precisión en términos absolutos, pero contarían con la ventaja de mantener su precisión constante en un mayor rango de temperaturas. En el trabajo también se consideran **situaciones dinámicas de interés práctico**, como la estimación de temperatura cuando el tiempo disponible es insuficiente para la termalización de la sonda.

CORRUGANDO GRAFENO

Uno de los materiales con mayor proyección hoy día es el **grafeno**: una única lámina de átomos de carbono dispuestos en red hexagonal. Sus extraordinarias propiedades, tanto mecánicas como electrónicas, lo han convertido en el principal candidato para **transformar la tecnología**. Esta posibilidad está relacionada con la observación de que una lámina de grafeno suspendida (por haberse depositado sobre un sustrato rígido con huecos) presenta numerosas **ondulaciones con longitudes de onda**



de decenas de nanómetros o menores, en algunos casos de escala atómica.

Los **procesos a nivel atómico** que llevan a estas deformaciones, que condicionan las propiedades del material, no se conocen suficientemente todavía, debido a la complejidad de extraer información macroscópica a partir de las interacciones entre fonones y electrones. Por esta razón, Miguel Ruiz-García y Luis L. Bonilla, de la Universidad Carlos III de Madrid, junto con Antonio Prados, de la Universidad de Sevilla (DOI: 10.1088/1742-5468/2015/05/P05015), en vez de intentar obtener los efectos macroscópicos en el material a partir de las interacciones atómicas, han buscado **el modelo mesoscópico más sencillo que reproduce los efectos observados**. Ha resultado ser una red

elástica de átomos acoplados con un sistema de **seudoespines, esto es, variables con valores ± 1** (figura). El acoplamiento es tal que, según el valor del pseudospín, se ejerce una fuerza sobre el átomo de la red que trata de sacarlo del plano. Y el pseudospín puede cambiar de signo con una probabilidad que depende de la deformación transversal al plano.

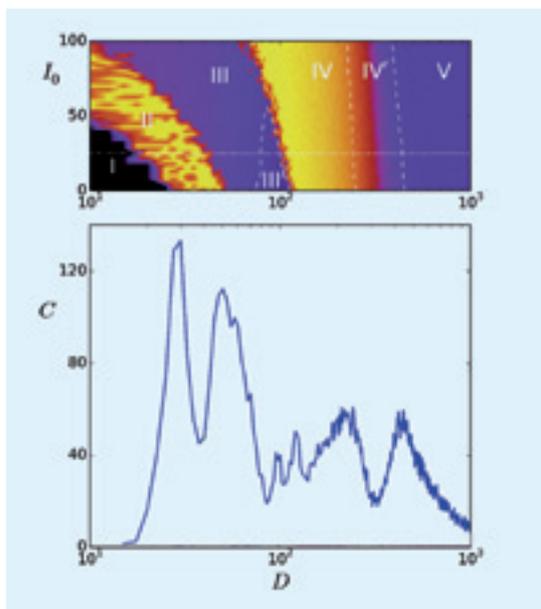
Este escenario permite describir los **diferentes tipos de corrugaciones** verticales que puede presentar una hoja de grafeno que, en promedio, es plana. También **predice la existencia de estados** en los que la hoja está totalmente combada y puede o no presentar corrugaciones. Las observaciones experimentales conocidas no dejaban claro si estos estados eran relevantes, pero la microscopía de efecto túnel ha mostrado muy recientemente que la lámina de grafeno puede adoptar como **estado estable la configuración combada**, mientras que un **estado plano** con ondulaciones superpuestas es **metaestable**. Esto puede tener implicaciones tecnológicas, pues cambios de temperatura inducidos por

la corriente del microscopio podrían hacer “saltar” la lámina de su posición plana con ondulaciones a estar rígidamente combada. El modelo presenta este “salto” como una especie de **cambio de fase** entre los dos estados, y puede ser útil para optimizar las configuraciones que interesen.

Como tantas veces en física, un modelo sencillo permite **analogías** que ayudan a comprender una fenomenología difícil, y sugiere nuevos estudios, planteando en este caso **interrogantes** como cuáles son las interacciones microscópicas que podrían dar lugar a un modelo mesoscópico similar al propuesto.

¿LOGRARÁ LA FÍSICA COMPRENDER LA MENTE?

Los físicos sabemos describir con fidelidad matemática **cambios de fase**, a veces sin caer en la cuenta de que son situaciones dramáticas. Como cuando **el agua solidifica, adoptando una inesperada estructura**, tan distante que ya no llamamos agua, o **se hace vapor ex-**



tendiéndose sin límite por el espacio, aunque apenas había cambiado de volumen a lo largo de todo el calentamiento previo, o cuando ciertos **materiales actúan a distancia** al hacerse ferromagnéticos y otros muestran **levitaciones “milagrosas”** si se hacen superconductores. Al menos una propiedad puede sufrir espontáneamente en estos casos un cambio súbito y enorme, digamos, “infinito”. Y el cambio puede ser todavía más valiente y extraño si no hay equilibrio termodinámico sino, como es típico en la naturaleza, **heterogeneidad espacial e irregularidad temporal**. Es el caso de **cerbros evolucionados cuya estructura y funciones de alto nivel vienen asociándose desde hace algunos años con cambios de fase y criticidad**. Tratando de explicar estas observaciones, Joaquín Torres y Joaquín Marro, en el Instituto Carlos I de la UGR, han estudiado numéricamente (DOI: 10.1038/srep12216) **redes de neuronas** modeladas como ecuaciones en derivadas parciales que se relacionan según **complejas topologías de interacciones sinápticas que cambian rápidamente** siguiendo la actividad de su entorno.

La conducta de este sistema resulta ser fascinante. Para empezar, los investigadores han detectado y caracterizado hasta siete **comportamientos cualitativamente distintos, o fases** (de colores en la parte alta de la figura), al variar el parámetro D que describe la suma de **ruido** originado en otras partes (para una **excitabilidad I_0** dada). Estas fases incluyen **reposo** neuronal total o dis-

continuado, **sincronizaciones totales, parciales o cambiantes** con el tiempo, recuperación de **memorias** y situaciones muy dinámicas que recuerdan nuestros estados de **vigilia y atención**. Además, **al introducir una débil señal, su correlación C con la respuesta que produce muestra seis picos** bien definidos (curva en la parte inferior de la figura) que se corresponden con **transiciones** (que pueden ser de primer o segundo orden) **entre las fases** observadas. Esta conducta sugiere cómo sencillos **experimentos psicofísicos** tratando de procesar una señal débil en el cerebro humano compitiendo con otros ruidos han de ser **capaces de detectar cambios significativos en la actividad mental**, abriendo así un vasto campo para la experimentación.

Otro resultado general notable del estudio se refiere a lo robusto que es el comportamiento resultante al modificar detalles del modelo, particularmente, la topología de la red. Por ejemplo, dentro de límites razonables, la situación que refiere la figura adjunta **apenas cambia, tanto si la red considerada es totalmente conectada, aleatoriamente diluida, con invariancia de escala, “pequeño mundo”... o se usan datos recientes del conectoma humano**. El modelo aclara cómo (y por qué) es el **rápido centelleo de las sinapsis lo que controla de hecho la complejidad reticular** y, por tanto, la fenomenología emergente. El modelo también parece ser una herramienta adecuada para tratar de descifrar qué nos diferencia de otras especies.

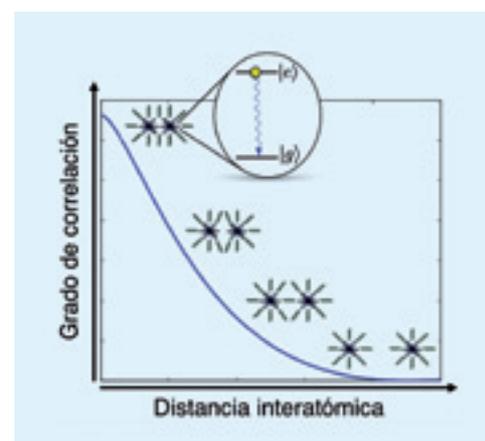
DINÁMICA EN SISTEMAS CUÁNTICOS: ¿MÁS QUE LA SUMA DE LAS PARTES?

Si dos átomos en estados electrónicos excitados están suficientemente separados, cada uno emite luz independientemente según su tasa de emisión espontánea. Sin embargo, **cuando la distancia que separa los átomos es más pequeña que la longitud de onda de la luz emitida, el sistema empieza a comportarse como un todo** emitiendo fotones coherentes conjuntamente, en vez de hacerlo individualmente, en un

proceso llamado **superradiancia** que fue descubierto por Robert H. Dicke en 1954.

Es una situación paradigma de dinámica correlacionada en un sistema cuántico compuesto por varias partes de modo que **la dinámica del “todo” no puede predecirse** a partir de la dinámica de las “partes” que pueden no interactuar directamente unas con otras. La figura ilustra el cambio en el grado de correlación con la distancia interatómica.

Este tipo de correlaciones en la dinámica aparecen en muchos sistemas físicos en la naturaleza así como en varios dispositivos en el ámbito de las nuevas tecnologías cuánticas, tales como trampas de iones, circuitos superconductores y redes ópticas. En estas plataformas físicas **son fuente de errores**, a menudo correlacionados en-



tre sí, lo que supone un desafío sustancial para el desarrollo y funcionamiento estable de, por ejemplo, los deseados ordenadores cuánticos.

Ángel Rivas y Markus Müller de la Universidad Complutense de Madrid han considerado recientemente esta interesante situación (DOI: 10.1088/1367-2630/17/6/062001 —véase en este DOI un vídeo en el que los autores explican brevemente el problema, su relevancia, y la idea principal del método sugerido) desde el punto de vista de la **“teoría general de recursos” que permite indagar la existencia de orden entre dinámicas correlacionadas**. De esta manera, han desarrollado **un método que**, conocida la evolución temporal de un sistema cuántico compuesto por varias partes, **permite medir**, esto es, concluir el grado de correlación de su dinámica,

llegando a dar un valor numérico entre 0 y 1. Los autores comentan que este resultado va a permitir evaluar cuantitativamente **cómo influyen las correlaciones dinámicas en el comportamiento de un sistema cuántico**. En particular, se puede estimar de este modo hasta qué punto **la correlación condiciona el emergente campo de las tecnologías cuánticas**, donde su papel en fenómenos de transporte, rendimiento de algoritmos cuánticos y en el mantenimiento de la coherencia cuántica a largos tiempos es en este momento objeto de estudio.

ECUACIONES MACROSCÓPICAS PARA CONJUNTOS DE NEURONAS

El interés que la ciencia oficial tiene hoy por profundizar en el conocimiento del cerebro y las enormes expectativas puestas en ello se hacen patentes en proyectos internacionales a gran escala, como el Blue Brain europeo y el Brain Initiative estadounidense. Varias disciplinas convergen actualmente en estos estudios y, en particular, es lícito preguntarse, como ya se apunta al hablar de otro trabajo en esta misma sección, ¿puede la física contribuir al empeño

rociencia es habitual trabajar con una variable macroscópica conocida como firing rate —digamos, tasa de disparo o descarga— que mide el número de neuronas que emiten un impulso eléctrico por unidad de tiempo. La actividad cerebral se monitoriza a menudo en la práctica **detectando experimentalmente esta magnitud** que, de hecho, también se corresponde bien con uno de los **métodos que usan las neuronas para codificar la información**. Por tanto, al estudiar computacionalmente el cerebro, se vienen proponiendo modelos basados en ella (*firing-rate models*) cuyo objetivo suele ser el comprender la interrelación entre áreas distintas del cerebro para **explicar funciones como, por ejemplo, el control motor, la memoria a corto plazo y la toma de decisiones**.

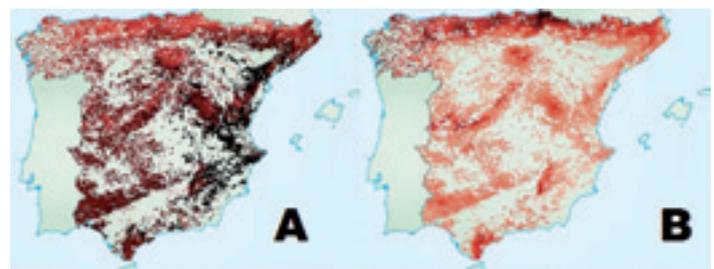
Pese a su popularidad, estos modelos son actualmente heurísticos o, en el mejor de los casos, meras aproximaciones cerca de estados colectivos estacionarios. Una colaboración reciente entre Ernest Montbrió, de la Universitat Pompeu Fabra, Diego Pazó, del Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC), y Alex Roxin, del Centre de Recerca Matemàtica, ha encontrado (DOI: 10.1103/PhysRevX.5.021028) un **modelo de tasa de descarga** que, sin embargo, puede **deducirse exactamente de las ecuaciones que gobiernan el conjunto de neuronas**.

La figura muestra, en el panel superior, la respuesta del conjunto a una corriente transitoria aplicada (un punto por cada descarga). El panel inferior muestra la tasa de descarga (curva negra) y la predicción teórica a partir del nuevo modelo propuesto (curva naranja).

Este modelo, al constituir un sistema dinámico que relaciona adecuadamente variables microscópicas y macroscópicas, puede servir como un **buen punto de partida**, más firme que otros modelos en uso, en **desarrollos en neurociencia computacional**.

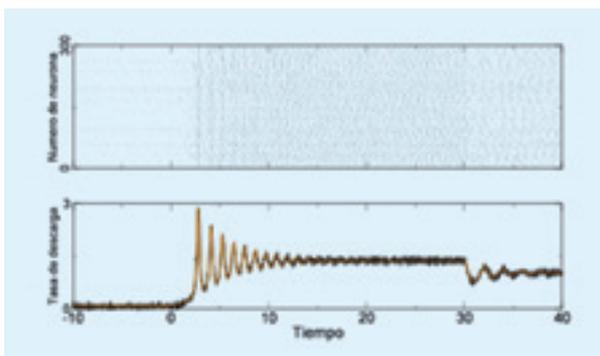
RIQUEZA ECOLÓGICA Y VARIABLES DE ENTORNO

La riqueza de especies presentes en una cierta región varía a gran escala con el clima, siendo típicamente mayor al ir de los polos hacia el ecuador. Sin embargo, a escala local, la **relación entre riqueza de especies y clima** no está tan clara. En España, los detallados datos del Inventario Forestal Español (IFE) permiten abordar el problema, pero no han aclarado todavía cómo depende la riqueza de especies en variables como temperatura media y precipitación anual. En una colaboración internacional encabezada por Mara Baudena, en la que han participado físicos, matemáticos, ecólogos y economistas en la UCIII de Madrid, el BIFI en Zaragoza, y las Universidades de Alcalá de Hena-



res, Utrecht, Cape Town y Stirling, **se ha adaptado un método usado para comprender la riqueza productiva de las naciones al caso de los bosques españoles** (DOI: 10.1038/srep11561).

La idea central consiste en **considerar el ecosistema como una red bipartita en la que las especies están conectadas con los lugares donde crecen** (a la escala de 1 km² del IFE). Luego se define una **“riqueza potencial”**, mayor para las especies que crecen en lugares con mayor riqueza ecológica. Se distinguen así sitios en los que las especies que aparecen no suelen coexistir con muchas otras, de modo que no es de esperar que puedan albergar especies adicionales, de otros sitios en los que las especies presentes sí suelen aparecer acompañadas de mayor diversidad. Los autores del estudio encuentran que esa riqueza potencial, cuya definición amortigua considerablemente el ruido estadístico, sí depende claramente de las condiciones climáticas, siendo mayor en las zonas áridas del Mediterráneo (mientras que los



de entender el cerebro en algo más que proporcionar aparatos de medida cada vez más sofisticados como la resonancia magnética funcional? Muchos físicos creen que sí, y algunos adoptan el punto de vista de que el cerebro puede considerarse como conjuntos de neuronas interaccionando entre ellas de forma no lineal.

De modo análogo a como se hace con la presión o la temperatura cuando se estudia en física un gas, **en neu-**

datos originales del IFE no muestran dependencia alguna con la temperatura o la precipitación). La comparación de la figura A, que muestra los lugares con más riqueza potencial en color más oscuro, con la B, que presenta los datos de precipitación media anual con el mismo convenio, ilustran claramente esta relación.

El método permite además **identificar sitios anómalos**, como ocurre por ejemplo en casos en que zonas de haya común (que suele desplazar a otras especies) muestran una alta diversidad. A la inversa, en bosques mediterráneos donde el pino carrasco se encuentra junto con muchos arbustos, se detectan sitios anómalos con menos diversidad de la esperada. Estos datos son de gran **utilidad para la gestión de bosques** y en particular para la regeneración de lugares degradados por malas prácticas agrícolas, incendios, etc., permitiendo aprovechar al máximo los servicios del ecosistema.

Como indican los autores, igual que ellos han adaptado a la ecología una idea aparecida en economía, podría ahora aplicarse a las relaciones sociales en un contexto geográfico.

ESTIRANDO PROTEÍNAS

La elasticidad de los tejidos biológicos depende de proteínas modulares atornilladas a estructuras rígidas como, por ejemplo, la *titina* que juega un papel importante en la contracción y distensión de los músculos. Una **proteína modular** contiene un número de moléculas similares (que pueden estar

plegadas o desplegadas) conectadas por cadenas péptidas cortas (*linkers*). En las últimas dos décadas se han realizado numerosos **experimentos estirando biomoléculas**, tales como el ADN, ARN o la citada titina, con microscopios de fuerza atómica (AFM), pinzas ópticas, etc. Estos experimentos **ayudan a esclarecer los mecanismos de despliegue y repliegue** de las biomoléculas que están detrás de sus propiedades elásticas, **así como a identificar sus partes componentes o su función biológica**.

En un experimento con AFM, una proteína modular se pega entre la plataforma y la punta del microscopio que, al separarse, la estiran. Se puede controlar la longitud total de la proteína y medir la fuerza entre sus extremos o bien se puede controlar la fuerza y medir la longitud de la proteína. En el caso de longitud controlada, la fuerza es una función diente de sierra de la longitud y cada caída de la fuerza corresponde al despliegue de un módulo. Al subir la fuerza en el caso de fuerza controlada, se puede producir un despliegue secuencial de los módulos de la proteína seguido por un repliegue abrupto de todos los módulos si se baja la fuerza después. En estos experimentos juegan papeles importantes la estructura molecular, el movimiento Browniano de las moléculas y la diversidad de las proteínas.

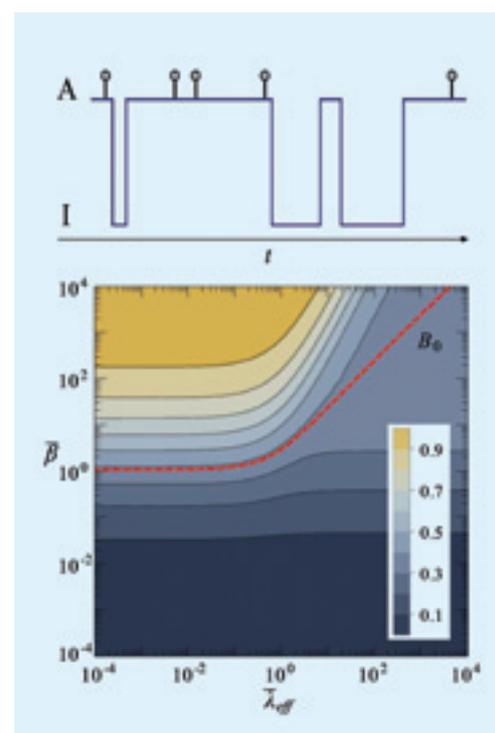
Luis L. Bonilla, de la Universidad Carlos III de Madrid, Ana Carpio, de la Universidad Complutense de Madrid, y Antonio Prados, de la Universidad de Sevilla, han propuesto un **modelo mesoscópico** cuyo análisis permite elucidar estos papeles y **explicar los resultados experimentales** a fuerza controlada (DOI: 10.1209/0295-5075/108/28002) y a longitud controlada (DOI: 10.1103/PhysRevE.91.052712).

La configuración del sistema viene dada por la elongación de los módulos proteínicos cuya energía libre incluye un potencial biestable para cada uno y una interacción armónica a primeros vecinos entre ellos. Las propiedades de equilibrio de la proteína modular se encuentran minimizando la energía libre mientras su dinámica viene descrita por ecuaciones de Langevin sobrea-mortiguadas.

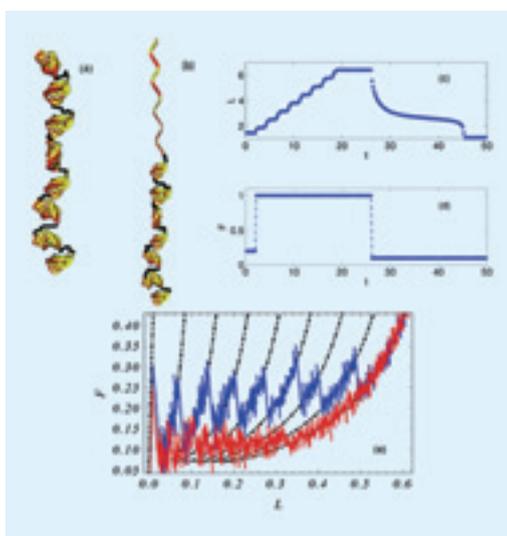
Los resultados obtenidos con el modelo mesoscópico **explican el despliegue secuencial de los módulos y su repliegue abrupto en condiciones de fuerza controlada como transiciones a través de estados virtuales modificados por ruido térmico**. Las curvas de fuerza-extensión en condiciones de longitud controlada también se obtienen a partir del modelo y concuerdan con los experimentos.

EXPLOSIONES DE ACTIVIDAD EN REDES COMPLEJAS

Al estudiar **cómo ciertos procesos biológicos o sociales aleatorios transcurren en el tiempo**, se observan periodicidades o intervalos de duración



típicos. Es habitual que los elementos de un sistema complejo muestren una actividad caracterizada por secuencias de alto dinamismo seguidas de largas etapas de inactividad. Es un **comportamiento racheado** frecuente en ámbitos tan alejados entre sí como las telecomunicaciones —en la **frecuencia entre cartas**, e-mails y llamadas telefónicas— y la biología —en los **lapsos entre impulsos neuronales y en la síntesis de mRNA en las células**—, por ejemplo.



Guillermo García-Pérez, Marián Bogaña y M. Ángeles Serrano de la UB han mostrado (DOI: 10.1038/srep09714) que **este comportamiento puede ser explicado a partir de las interacciones entre sus constituyentes**. Para ello, han considerado un sistema cuyos **elementos pueden estar activos** y producir eventos aleatoriamente, o **inactivos**. Los elementos están **conectados entre sí formando una red compleja de interacciones que determinan su activación o desactivación**: los elementos inactivos son activados aleatoriamente por sus vecinos activos, mientras que la desactivación ocurre a una tasa constante.

A pesar de su sencillez, este marco teórico ofrece una fenomenología muy interesante. Por una parte, las interrupciones por inactividad inducen irregularidad en la producción resultante (diagrama superior de la figura). Por otra parte, si la producción endógena de un elemento es racheada, la dinámica de activación y desactivación también puede homogeneizar el patrón temporal de la producción resultante (gráfico inferior). En todo caso, **el número de conexiones de un elemento determina crucialmente su comportamiento**. Los elementos altamente conectados permanecen en el estado inactivo poco tiempo y, consecuentemente, su producción es semejante a la endógena, mientras que los elementos con pocas conexiones presentan una producción más modulable. Estos resultados indican que **la heterogeneidad en el número de vecinos de los elementos en una red ayuda** a proteger el funcionamiento de los núcleos altamente conectados, al mismo tiempo que los elementos con menos conexiones resultan dianas más convenientes para introducir modificaciones en el sistema sin alterar drásticamente el funcionamiento global.

La **línea quebrada** en la parte superior de la figura **ilustra esquemáticamente el comportamiento de un elemento**, que puede estar activo (A) o

inactivo; los marcadores (arriba) indican los acontecimientos de producción. **El panel inferior muestra los regímenes** en función de la actividad de producción endógena (eje vertical) y de la probabilidad de activación por unidad de tiempo (eje horizontal). El **color indica el nivel de irregularidad** (creciente de gris a amarillo). La línea roja es el valor endógeno. Se puede observar que las interacciones pueden tanto incrementar como disminuir las irregularidades.

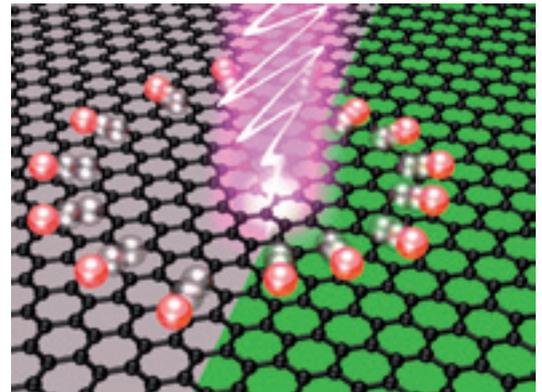
CONVERSIÓN DE LUZ EN ELECTRICIDAD USANDO GRAFENO

La conversión de luz en electricidad está presente en muchos aspectos de nuestra vida cotidiana. El proceso podría verse revolucionado gracias al **grafeno, una lámina de átomos de carbono mecánicamente flexible y que es capaz de absorber luz en una amplia gama de colores, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo lejano**. Aunque la eficiencia y velocidad de conversión de energía fotónica en eléctrica son dos parámetros de extrema importancia para muchas aplicaciones, hasta ahora no se habían medido en fotodetectores basados en grafeno. Klaas-Jan Tielrooij y Frank Koppens, del Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) en Barcelona, han llevado a cabo dos estudios para avanzar en el entendimiento de ambos parámetros.

En el primero, en colaboración con el Instituto Max Planck en Mainz, la empresa española Graphenea S. L. y el MIT en Estados Unidos, estudiaron la **eficiencia con la que la luz que es absorbida en el grafeno se transfiere a electrones** en el mismo (DOI: 10.1038/nphys2564). Los electrones que ocupan la banda de conducción en el grafeno se pueden ver como un gas en equilibrio térmico, es decir, comparten su energía

y poseen una temperatura común. Los investigadores evaluaron la eficiencia con la que esta temperatura aumenta debido a la absorción de luz, mostrando que es muy elevada, cercana al 100 %. Esta **alta eficiencia** resulta muy útil debido a que el calentamiento de los electrones se puede convertir en una señal eléctrica.

Esa conversión en señal eléctrica es el objetivo del segundo estudio (DOI: 10.1038/nano.2015.54). En colaboración con el grupo liderado por el Niek van Hulst en el ICFO y el MIT, los investigadores generaron una señal eléctrica utilizando el efecto Seebeck, el cual convierte un gradiente de temperatura en energía eléctrica. Utilizando pulsos de luz ultrarrápidos, determinaron la **velocidad con la que la luz absorbida se convierte en señales eléctricas**, que resulta ser extremadamente alta: tan sólo 50 femtosegundos.



El hecho de que la conversión de luz en electricidad en el grafeno se produzca de forma tan rápida explica por qué el calentamiento electrónico es tan eficiente: la fuerte interacción entre electrones en la banda de conducción hace que el calentamiento se produzca antes de que la energía se pueda disipar de ninguna otra forma alternativa. Estos resultados demuestran que **el grafeno es un material excepcional para su uso en generaciones futuras de fotodetectores ultrarrápidos**.