

Encuentros en la **b**iología



Epitranscriptómica

Ciencia y Sexo

Mujeres STEM@UMA

Vol IX | No 166
INVIERNO | 2018-2019

ENCUENTROS EN LA BIOLOGÍA
Revista de divulgación científica
Indexada en *Dialnet*

Entidad editora:

Universidad de Málaga. EDITADA CON LA COLABORACIÓN DE LA UNIDAD DE IGUALDAD DE GÉNERO DE LA UMA, DEL INSTITUTO DE HORTOFRUTICULTURA SUBTROPICAL Y MEDITERRÁNEA "LA MAYORA" (IHSM-UMA-CSIC) Y EL DECANATO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

Depósito legal: MA-1.133/94

ISSN (versión electrónica): 2254-0296

ISSN (versión impresa): 1134-8496

Periodicidad:

4 NÚMEROS ORDINARIOS (TRIMESTRALES) Y AL MENOS
1 NÚMERO EXTRAORDINARIO MONOGRÁFICO AL AÑO

Correspondencia a:

JUAN ANTONIO PÉREZ CLAROS
DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
29071 - MÁLAGA

ENCUENTROSENLABIOLOGIA@UMA.ES

EQUIPO EDITORIAL

COEDITORES

- Juan A. Pérez Claros
johnny@uma.es
Paleontología
Encuentros con las novedades.
- Ana Grande Pérez
agrande@uma.es
Genética-virología,
Patogénesis virales.
Jóvenes científicos.

COMITÉ EDITORIAL EJECUTIVO

- Antonio Diéguez
dieguez@uma.es
Filosofía de la ciencia
A debate, reseñaciones
- Beatriz Martínez Poveda
bmpoveda@uma.es
Biología molecular del
cáncer y enfermedades
cardiovasculares
- Enrique Viguera
eviguera@uma.es
Genética y genómica
Eventos especiales
- Francisco José Villena
francis.villena@icloud.com

Jóvenes científicos

- José M^a Pérez Pomares
jmperezp@uma.es
Biología del desarrollo y
cardiovascular
Entrevistas
- Héctor Valverde Pareja
hvalverde@uma.es
Biología evolutiva
molecular
Maquetación y difusión
- M. Gonzalo Claros
claros@uma.es
Bioquímica, biología
molecular y
bioinformática.
*Escribir bien no cuesta
trabajo*
- Miguel Á. Medina
Torres
medina@uma.es
Biología molecular y de
sistemas, biofísica y
bioquímica
Monitor
- Ramón Muñoz-Chápuli
chapuli@uma.es
Biología del desarrollo y
cardiovascular
*Coordinación de la
edición electrónica, foros*

de la ciencia

COMITÉ EDITORIAL ASOCIADO

- Alicia Rivera
arivera@uma.es
Neurobiología y
enfermedades
neurodegenerativas
- Belén Delgado Martín
belendm@uma.es
Bioquímica y Biología
Molecular
- Jesús Olivero
jesusolivero@uma.es
Zoogeografía y
biodiversidad animal
- José Carlos Dávila
davila@uma.es
Biología celular y
neurobiología
- Juan Antonio Guadix
Domínguez
jaguadix@uma.es
Desarrollo embrionario,
diferenciación celular y
biología de células
madre
- Juan Carlos Codina
jccodina@uma.es
Microbiología,
educación secundaria
- Luis Díaz Martínez

luisdiaz@uma.es

- Biotecnología y
bioinformática
- Luis Rodríguez Caso
caso@eelm.csic.es
Técnicas de laboratorio
- Margarita Pérez Martín
marper@uma.es
Fisiología animal,
neurogénesis
- María Rosa López
Ramírez
mrlopez@uma.es
Química física,
astronomía
- Raúl Montañez
Martínez
raulmm@gmail.com
Biología sintética y de
sistemas
- Rafael Antonio Cañas
Pendon rcanas@uma.es
Biología Molecular de
plantas

COMITÉ EDITORIAL DE HONOR

- Esteban Domingo
edomingo@cbm.uam.es
Evolución de virus
- Gonzalo Álvarez Jurado
g.alvarez@usc.es
Genética

La portada



El sexo puede ser tratado desde muchos puntos de vista. En este número se aborda desde una perspectiva científica. En última instancia no deja de ser uno de los más exitosos mecanismos evolutivos que posibilitan compartir e incrementar la variabilidad genética.

Página 6

Ilustración realizada por J.A. Pérez-Claros

Índice

Editorial	3
La imagen comentada	4
Ciencia y Sexo	6
Mujeres STEM@UMA	21
Escribir bien no cuesta trabajo: Últimas novedades del Sistema Internacional	27
Epitranscriptómica	30

Editorial

Especialismo y diletantismo

La Biología se ha convertido en un edificio enorme, con tantas habitaciones y de tan enmarañada distribución, que los habitantes de unas ya no hablan el mismo idioma que los de las otras. Ha crecido y crecido, como la Torre de Babel y, al igual que en la construcción de esta, los constructores han terminado por no entenderse entre sí. Un metafórico castigo de Yahveh a una vanidad humana enredada en una ciencia mecanizada controlada por peritos contables que la dirigen mediante su financiación. Esta dinámica de la ciencia hace de algunos científicos genuinos hombres-masa, obreros de la publicación en serie, operarios de la mecanización del conocimiento tal como nos describió perfectamente Ortega y Gasset y que ya quisimos exponer en nuestro

anterior número. Diletantismo es el término peyorativo inventado por el científico-masa, usado una y otra vez como excusa para no levantar un milímetro la mirada de su estrechísima área de trabajo. Pero diletante viene del italiano *diletante*, 'que se deleita'. La ciencia no puede ser privada del deleite ante una nueva técnica, un nuevo enfoque o un nuevo hallazgo. En el fondo, ese deleite es el motor que la hace avanzar. Rompamos muros y abramos nuevas puertas entre estas habitaciones tan alejadas del saber científico. Quizás no podamos aprender el idioma de los moradores de áreas alejadas, pero podemos buscar diccionarios que nos lo traduzcan. Encuentros en la Biología está en ese empeño y tú, lector, sin saberlo quizás, también.

La imagen comentada



Nexstar 6SE, ZWO ASI120MC a foco primario.
Mosalco de 17 fotografías.
Jueves 1 de Junio de 2017, 22:40,
Málaga.
Carlos Coca Ortega

La Luna, único satélite natural de la Tierra, se formó a partir de la aglomeración del material eyectado en órbita fruto de una grandísima colisión en los albores del nacimiento de nuestro planeta (hipótesis del nacimiento por acreción). Desde su formación, hace aproximadamente 4.500 millones de años, ha sido nuestra compañera y ha visto surgir la vida, y de forma indirecta, ha ayudado a su expansión y su evolución hacia formas de vida más complejas. ¿Cómo es esto posible? Su mera presencia, tan próxima a la Tierra, ha ayudado a que nuestro eje de rotación se presente relativamente estable alrededor de unos 23 grados. Sin ella, el planeta presentaría un movimiento de precesión enorme, pudiendo girar desde los 0 hasta los 90 grados, acabando así con las estaciones tal y como las conocemos. Literalmente, uno de los hemisferios podría estar “abrasándose” mientras que el otro permanecería congelado al no recibir la luz del Sol. Difícilmente la vida podría haber llegado al grado de complejidad actual en un clima tan extremo. Pero por suerte, no es así. La Luna, junto con el Sol, es la gran generadora de las mareas. Muchos seres vivos de los océanos han evolucionado acoplando sus ciclos reproductivos a éste fenómeno, como es el caso de muchas especies de corales, cefalópodos como los calamares y algunas especies de peces. Estos últimos también cambian su comportamiento nocturno dependiendo de la fase lunar, volviéndose más activos los depredadores mientras que las presas descienden en la columna de agua para no ser descubiertos por ellos. Mamíferos nocturnos como la musaraña, aves rapaces nocturnas como los búhos y las lechuzas. . . todos ellos rigen sus ciclos vitales al son

de la Luna. Los insectos, como las polillas, también han adaptado su cortejo a los ciclos lunares, coincidiendo con las noches más iluminadas, próximas a la Luna Llena. Incluso los mismos seres humanos, coincidiendo los 28 días del ciclo lunar con el ciclo menstrual de las mujeres, reminiscencia de un pasado en el que no se dominaba el fuego y era una ventaja evolutiva ovular las noches en las que los hombres no salían a cazar. . . En la fotografía observamos una luna en fase creciente (al estar hecha con un telescopio catadióptrico, la izquierda y la derecha nos aparecen volteadas). En ella apreciamos claramente la zona del terminador, produciendo juegos de luces y sombras en los cráteres como Theophilus, Cyrillus y Catharina (un poco abajo del centro de la imagen), así como Mare Serenitatis al norte, Mare Crisium al Oeste, Mare Fecunditatis al centro-izquierda y Mare Tranquillitatis al centro. En este “mar” descendió la primera misión tripulada a la Luna al final de la década de los sesenta en el histórico vuelo del Apollo 11, llegando así por fin la misma vida a ese cuerpo celeste que, sin el cual, no estaríamos aquí. La vida en la Tierra está ligada a la Luna, y en el plazo de unos pocos años (mitad de la década que viene) los humanos estableceremos en su órbita la llamada Deep Space Gateway o Portal de Espacio Profundo. Abasteciendo a las naves espaciales con combustible de hidrógeno a partir del hielo conservado en el fondo de los cráteres de las regiones polares lunares, la vida se impulsará hacia nuevos destinos dentro de nuestro propio Sistema Solar.

Carlos Coca Ortega (Doctorando FPI, UMA). corcar@uma.es

LA CIENCIA Y EL SEXO

por VICTORIA DE ANDRÉS, MIGUEL ÁNGEL MEDINA Y PAUL PALMQVIST

FACULTAD DE CIENCIAS. UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

DEANDRES@UMA.ES, MEDINA@UMA.ES, PPB@UMA.ES

Palabras clave: *Sexo, Ciencia sin Límites*

Keywords: *Sex, Unbounded Science*

Enviado: 16 marzo 2019

Aceptado: 18 marzo 2019

Vivimos un momento social en el que las referencias al sexo en los medios de comunicación son continuas. De ellas, abundan las que apuntan a la naturaleza “biológica” de muchos aspectos sexuales en nuestra especie. Sin embargo, estas alusiones no siempre se realizan de una manera correcta. Muy al contrario, bajo el amparo de la presunta científicidad de lo que se afirma se cometen errores cuyo origen, en la mayoría de los casos, estriba en un escaso conocimiento de la biología de *Homo sapiens* y en una visión comparada y evolutiva del tema prácticamente nula. Para aportar luz en torno a este tema, en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Málaga se celebró un debate el pasado otoño de 2017 donde tres especialistas de diferentes ámbitos de la biología aportaron datos y reflexiones interesantes, moderados por la directora del programa *Ciencia sin Límites*. Manteniendo el *modus operandi* de este proyecto, se confrontaron y complementaron los enfoques zoológicos, filosóficos, paleontológicos y bioquímicos en una sucesión de intervenciones por parte de los miembros de la mesa, donde las ideas fluyeron de forma dinámica y, por qué no decirlo, apasionante. En este artículo se ordenan y desarrollan los aspectos más relevantes de tales intervenciones.

A debate on “Sex and Science” took place last autumn in the Faculty of Sciences of the University of Málaga. The event organizer (Victoria de Andrés, animal biologist) and three specialists from different scientific fields (Miguel Ángel Medina, biochemist), (Antonio Diéguez, philosopher of science) and (Paul Palmqvist, paleontologist) discussed on a number of topics relevant to this issue, including: (i) the nature and evolutionary advantages of sex; (ii) the pheromones and the “biochemistry of love”; (iii) the singularity of human sexuality among mammals and primates; (iv) the explanations for menarche in women; and (v) the evolutionary paradox of homosexuality. This paper summarizes the main arguments raised by the speakers on these issues.

¿Qué es el sexo?

Es muy frecuente observar cómo se utilizan indistintamente los términos *sexo*, *sexualidad* y *genitalidad*. Ello supone incurrir en errores importantes desde el punto de vista biológico, pues no se trata de sinónimos sino de palabras que responden a realidades conceptuales bien diferenciadas.

En Zoología, se denomina *sexo* al conjunto de diferencias existentes en morfología, fisiología y comportamiento entre los individuos de una determinada especie heterogamética (como es la nuestra), orientadas a la producción de gametos y la reproducción^[1]. En la naturaleza el sexo es fundamentalmente dual, dando lugar a individuos macho y a individuos hembra. Los primeros se caracterizan por poseer órganos encargados de producir gametos masculinos, esto es, poseen gónadas llamadas testículos que generan espermatozoides. Las hembras, por su parte, tienen gónadas denominadas ovarios, cuyos gametos son los óvulos. La unión de ambos gametos, haploides, tiene lugar durante el proceso de fecundación, restableciendo el número diploide de la especie tras concluirse

los procesos de anfimixia (fusión de las membranas de los gametos) y cariogamia (unión de los núcleos de ambas células). No obstante, es necesario aclarar que, en muchos animales, pueden aparecer también otros tipos de individuos en lo que a su sexo se refiere. Así, existen especies con individuos hermafroditas (que son machos y hembras a la vez) y/o individuos asexuados (que no son ni machos ni hembras porque no tienen gónadas y, por lo tanto, no producen gametos)^[2]. En las especies hermafroditas, a su vez, se pueden establecer modalidades sincrónicas (si son machos y hembras simultáneamente) pero también protogónicas o protoándricas (si primero pasan por una fase hembra y después se vuelven machos o viceversa, respectivamente). Ello se debe a que el determinismo del sexo no responde a una modalidad única. Aunque es mayoritario el mecanismo de determinación cromosómica del sexo, en muchas especies machos y hembras presentan la misma composición cromosómica y son factores ambientales los que entran en juego. Así, en algunas tortugas marinas el sexo está determinado por la temperatura a la que se encuentran expuestos los huevos durante el periodo

de incubación, mientras que es frecuente que entre los teleósteos (peces óseos modernos) se cambie de sexo en respuesta a estímulos hormonales, dependiendo de lo que mejor convenga según la proporción de machos y hembras presentes en la población. De hecho, un mismo pez puede cambiar de sexo varias veces durante el transcurso de su vida^{[3][4][5]}.

Por otra parte, en la naturaleza también existen especies no heterogaméticas, aunque no se van a tratar en este artículo.

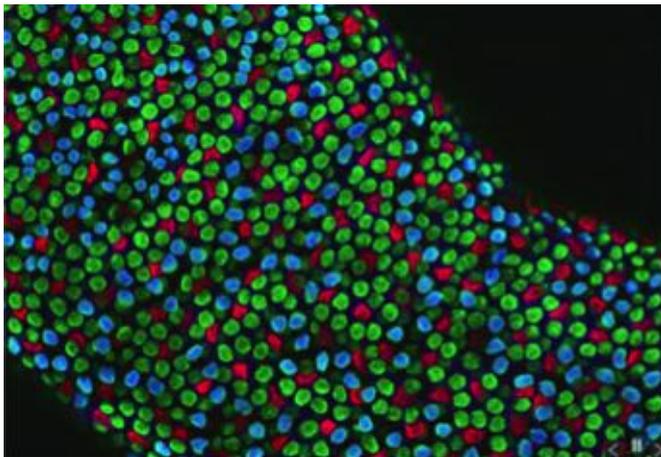


Figura 1. Preparación de los gametos. Los verdaderos actores en el juego del sexo son los gametos, espermatozoides y óvulos. Su producción en las gónadas está bajo el control de un programa genético jerárquico, que controla la identidad y la diferenciación sexual. Esta imagen, de inmunofluorescencia confocal, muestra un túbulo seminífero en la gónada de un ratón macho, teñido para mostrar las células de soporte de Sertoli (GATA4 positivo, rojo), espermatogonias y espermatozoides (TRA98 positivo, verde), y espermatogonias diferenciadoras (DMRT6 positivo, azul).

Autores: Teng Zhang y Aidan Peterson, University of Minnesota

Son diferentes las formas en las que se puede discernir el sexo de un determinado animal. Lo más habitual es reconocer morfológicamente las anatomías diferenciadas de los individuos en función de que se trate de machos o hembras (aunque, recordemos, también pueden existir otros morfotipos en algunas especies). No obstante, el sexo de los individuos de muchas especies no implica la existencia de diferencias evidentes en sus caracteres sexuales (tanto de naturaleza primaria como secundaria), lo que hace que para caracterizar sexualmente a algunos animales haya que recurrir a técnicas organográficas, fisiológicas, citológicas o, incluso, genéticas (como veremos en el capítulo siguiente). Es únicamente en el primer caso (esto es, al hacer referencia exclusivamente a estructuras y órganos, tanto externos como internos, implicados en el dimorfismo sexual) cuando *sexo* se puede utilizar como sinónimo de *genitalidad*. Nues-

tra especie se incluye en este grupo. *Homo sapiens* sería, pues, una especie animal que tiene dos sexos (hombre y mujer), separados (gonocorismo), que se manifiestan de forma permanente (desde el nacimiento hasta la muerte) y que no presenta individuos hermafroditas ni asexuados.

Si asumimos como válida esta equivalencia terminológica para el caso de los humanos, es necesario señalar que la misma no sería extensible al concepto de *sexualidad*. La razón estriba en que este último término implica aspectos que se escapan del ámbito puramente biológico, al incluir connotaciones psicológicas, sociales y éticas. Todas estas áreas se relacionan entre sí, son inseparables y cada una de ellas juega un papel importante en cómo percibimos hombres y mujeres todo lo relacionado con lo sexual.

¿Por qué el sexo?

Reproducirse sexualmente es carísimo. Explicado en términos energéticos, se podría afirmar que los procesos implicados en la reproducción sexual son muy elaborados y los recursos que se invierten en ellos son elevados. Entonces, ¿por qué prosperó este mecanismo desde el punto de vista evolutivo? La respuesta es muy fácil: porque aporta grandes ventajas. La mezcla de genes entre cromosomas procedentes de ambas líneas parentales que tiene lugar en la recombinación meiótica durante la formación de los gametos, junto al azar que supone el que sea un determinado espermatozoide (y no otro) el que fecunde a un determinado óvulo (en vez de a otro), hacen que la variabilidad potencial de descendientes fértiles que se pueden generar sea enorme. Ello implica que se multiplique exponencialmente el abanico de posibilidades genóticas sobre el que, *a posteriori*, puede actuar la selección natural, aumentando con ello las posibilidades de supervivencia de la especie en los entornos siempre cambiantes de nuestro planeta.

En segundo lugar, la reproducción sexual permite también que se tamponen los efectos negativos de muchas mutaciones deletéreas que genera el azar, pues la dotación diploide permite la expresión del segundo alelo del gen en cuestión, situado en el cromosoma homólogo. De igual manera, posibilita que las infrecuentes mutaciones ventajosas que surgen en individuos separados se puedan combinar en un solo ser^[6]. Por otra parte, Sir Ronald Fisher ya sugirió hace un siglo que el sexo podría facilitar la propagación de genes ventajosos, al permitirles escapar mejor de su entorno genético, si surgieran en un cromosoma con genes nocivos^[7]. Un último argumento lo aportan los autores que sugieren que el sexo ayudaría a los individuos a resistir los parásitos. En esta nueva inter-

pretación biológica de la paradoja de la Reina Roja de Carroll, los anfitriones sexuados estarían continuamente *corriendo* (adaptándose) para *permanecer en un mismo lugar* (resistir a los parásitos)^[8].

Sobre el determinismo genético del sexo

Los principios básicos del sexo son cuatro y se evidencian en las múltiples formas en que se produce la determinación del sexo y la reproducción sexual en organismos tan diversos como los protoctistas ciliados, las algas, los hongos, las plantas y los animales^[9]. Esos principios conservados son: (i) cambios en la ploidía, (ii) formación de gametos por meiosis, (iii) reconocimiento del "sexo complementario" y (iv) fusión célula-célula para producir un cigoto.

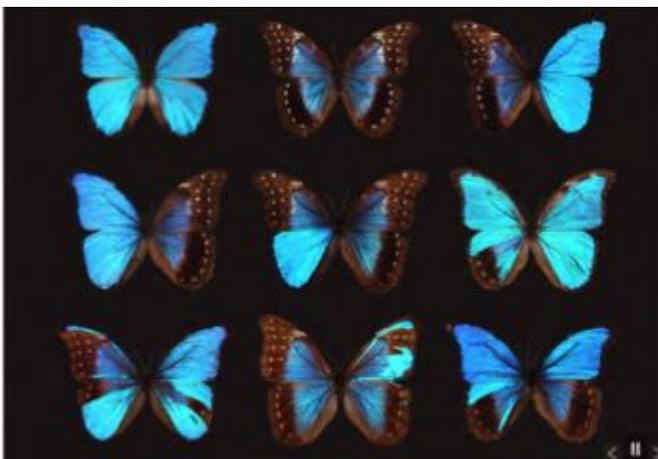


Figura 2. La confusión. Casi todos los animales vienen en dos sexos, macho y hembra. Pero, a veces, las líneas pueden ser borrosas. Los ginandromorfos son casos raros en los que se encuentran tejidos de identidad masculina y femenina mezclados en el mismo animal. Esto puede ocurrir a través de aberraciones genéticas por las cuales las células del cuerpo pierden factores determinantes del sexo y adoptan la identidad sexual opuesta. En especies con una obvia diferencia de apariencia según el sexo, como la mariposa morfo (*Morpho menelaus didius*), los resultados pueden ser espectaculares. Arriba, a la izquierda, un macho, y a su derecha, una hembra. El resto son ginandromorfos en mayor o menor medida. Autor: Nipam Patel, UC Berkeley

Si tratamos de reconstruir la cronología de las investigaciones sobre el determinismo del sexo, hemos de recurrir a la revisión realizada por Ursula Mittwoch^[10]. En ella leemos cómo, antes del "redescubrimiento" en 1900 de las leyes de Mendel, en 1896 Edmund Wilson señalaba en la primera edición de su libro *The Cell in Development and Inheritance* que "el sexo no viene determinado por la herencia, sino por el efecto combinado de condiciones externas". Sin embargo, pronto hubo de rectificar ante su descubrimiento de dos diferencias en los cromosomas

de los espermatoцитos de insectos^[11]. Se le adelantó en cuatro años Netty Stevens, con el hallazgo de que en los machos (pero no en las hembras) de *Tenebrio molitor* hay un cromosoma de menor tamaño que el resto^[12]. A este cromosoma lo denominó "Y", dándose la denominación "X" a su par de mayor tamaño. Puede resultar sorprendente el hecho de que el número concreto y correcto de 46 cromosomas (23 pares) en las células somáticas humanas, de los que 44 son autosomas y los dos restantes son los cromosomas sexuales, "X" e "Y" en personas de sexo masculino y dos "X" en mujeres, no se estableció hasta 1956^{[13][14]}. Poco tiempo después, el papel clave de estos cromosomas en la función sexual en humanos quedó demostrado en los primeros artículos sobre pacientes de síndrome de Turner con fenotipo femenino y genotipo "XO" y con síndrome de Klinefelter con fenotipo masculino y genotipo "XXY"^{[15][16][17]}. Es interesante destacar que la mención de estos síndromes llevó a una interesante discusión en la mesa de debate acerca del relativismo del concepto de "género sexual" y del desmoronamiento de la visión simplista de los dos polos (contrapuestos o complementarios) masculino y femenino. Además, se adelantó que varias semanas después del debate, la revista *Investigación y Ciencia* tenía anunciada la publicación de un número monográfico (mes de noviembre de 2017) sobre "Ciencia, sexo y género".



Figura 3. El amor está en el aire. El sexo consiste en conseguir que los gametos femeninos y masculinos se unan. La evolución ha ideado una miríada de formas de entrega, una de las más espectaculares de las cuales es el polen de las plantas. El polen viene en una deslumbrante variedad de formas, tamaños y estructuras superficiales. Un grano de polen libera los espermatozoides masculinos, que germinarán una vez que el grano haya llegado a los órganos sexuales femeninos de la flor, llevado allí por el viento o por vectores de polinización animales. Aquí, el grano de polen de un álamo se ve antes del viaje en la antera, el órgano productor de polen de la flor. SEM coloreado a mano. Aumento original: X3,500. Para más imágenes: <http://www.robkesseler.co.uk>. Autor: Rob Kesseler.

Pero retomemos la revisión cronológica. El asentamiento del concepto de "cromosomas sexuales" condujo al inicio de la carrera para identificar genes determinantes del sexo. El primero fue identificado en 1990^[18]. Se trata del gen SRY (de "*Sex-determining Region Y gene*"), presente en el cromosoma "Y", que se sobreexpresa en las células de Sertoli y codifica un factor de transcripción esencial para el desarrollo adecuado de los órganos reproductores masculinos. De hecho, se ha demostrado que algunas personas con genotipo "XY" pero fenotipo femenino presentan mutaciones en SRY^[19]. En poco tiempo, quedó demostrado que hay muchos otros genes (la mayoría autosómicos) necesarios para el desarrollo correcto de los órganos reproductores. De hecho, una revisión de 2012 enumera hasta doce genes autosómicos implicados en el desarrollo de los testículos y cinco en el desarrollo de los ovarios^[20]. Entre ellos se incluyen el gen SF1 del cromosoma 9, el gen WT1 del cromosoma 11, el gen AMH del cromosoma 19 y, particularmente, el gen SOX9 del cromosoma 17. Este último ha de ser inducido por SRY para permitir un desarrollo correcto de los testículos.



Figura 4. Intimidad nuclear. Dos células del ciliado *Oxytricha* abrazándose durante la conjugación. El sello distintivo último del sexo es la reorganización de los genes que cada individuo transmite a la siguiente generación. Como la mayoría de los organismos portan dos conjuntos de genes, la producción de gametos suele implicar una reducción a la mitad de dicho conjunto, de modo que cada gameto aporta una porción idéntica de genes a la siguiente generación. Cuando los gametos de sexos opuestos se fusionan en el momento de la fertilización, emerge un nuevo individuo con el doble juego restaurado. Pero como siempre ocurre en la biología y en el sexo, hay muchas variaciones sobre este tema. En los protoctistas ciliados, por ejemplo, los núcleos de cada pareja de apareamiento se dividen, produciendo el conjunto de genes reducido a la mitad. El sexo de los ciliados es, en esencia, un intercambio simultáneo de núcleos entre parejas de apareamiento - un asunto muy íntimo en verdad. Autor: Robert Hammersmith, Bail State University.

Toda esta secuencia de más de medio siglo de descubrimientos acerca del determinismo genético del sexo parecía haber postergado al olvido la aseveración original de Wilson en 1896. Sin embargo, una serie de estudios pioneros en las décadas de los sesenta y setenta del siglo pasado mostraron en los reptiles un determinismo del sexo dependiente de la temperatura, poniendo de nuevo el foco en el determinismo ambiental del sexo^[21].



Figura 5. Abanico de coqueteo. Para las hembras de muchos animales, el sexo y la reproducción son particularmente costosos. Sus gametos, los ovocitos, suelen requerir más recursos que los espermatozoides, por lo que una hembra producirá menos óvulos que un macho (aunque hay muchas excepciones a esta regla). Como consecuencia, las hembras a menudo tienen que elegir cuidadosamente cuándo y con quién reproducirse. Esto crea una presión evolutiva en los machos que ha llevado a la evolución de una miríada de formas de anunciar sus ventajas a las hembras y llamar su atención. Uno de los ejemplos menos conocidos, pero más llamativo, es la exhibición de cortejo de las diminutas arañas pavo real australianas. Aquí, un representante de este grupo, un *Maratus volans* macho, se muestra extendiendo su colorido abanico durante un ritual de cortejo que se acompaña de un baile complejo, que rivaliza con el de las aves del paraíso. La complejidad y diversidad de tales despliegues traicionan el poder de la selección sexual como motor de la evolución. (Para más información sobre la araña pavo real, visite estos sitios web <https://www.youtube.com/user/Peacockspiderman> y <https://www.flickr.com/photos/59431731@N05/sets/>). Autor: RJürgen Otto.

Para finalizar esta apresurada cronología, quizás el descubrimiento más interesante del último decenio en este campo sea la implicación de MAP quinzas (en concreto, MAP3K4 y MAP3K1) en la conexión funcional entre la determinación genética del sexo y sus requerimientos bioenergéticos mitocondriales^{[22][23]}. Es previsible un futuro desarrollo de los estudios que ligen mecánicamente el metabolismo energético y la determinación del sexo.

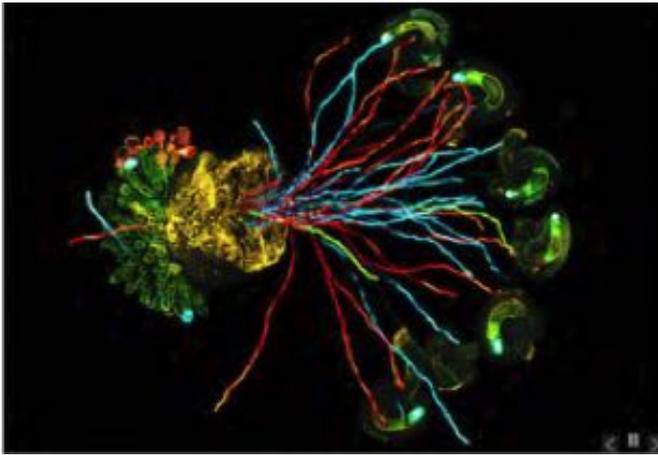


Figura 6. Cuando sucede lo mágico. La fecundación, unión de los gametos masculino y femenino, es el objetivo final del sexo, su punto final y el comienzo de un nuevo ciclo de vida. En las plantas con flores, los granos de polen masculinos, suministrados por los insectos o por el aire, germinan en el pistilo femenino (lado izquierdo de la imagen), formando tubos de polen alargados (que expresan tres proteínas fluorescentes, mTFP1(azul), Venus(verde) y TagRFP(naranja)). Estos tubos llevan los espermatozoides al óvulo femenino (lado derecho de la imagen). Como es muy difícil analizar la fertilización de las plantas en tiempo real, debido a que este proceso ocurre en lo profundo del pistilo, aquí se ha utilizado un sistema semi *in vitro*, que revela cómo los tubos de polen individuales son guiados hacia los óvulos. Autores: Yoli Mixuta, Daisuke Kurihara y Tetsuya Higashiyama, Nagoya University.

Las feromonas y la "bioquímica del amor"

En el debate "Ciencia y sexo" se abordó también el tema de "la bioquímica del amor", aportándose luz sobre algo tan mediático como si existe o no una base bioquímica que justifique la atracción sexual. Es necesario aclarar que hablar de "ciencia y sexo" y de "bioquímica y amor" no es lo mismo, por cuanto aquello que denominamos *amor* se diferencia nítidamente de lo que entendemos por *sexo*. Cuando hablamos de *amor* no nos estamos refiriendo simplemente a una "emoción" o a un "sentimiento", sino a un complejo proceso biológico dinámico y bidireccional^[24]. Los aspectos evolutivos de la noción de *amor* ponen el énfasis en su papel dinamizador clave del carácter fundamentalmente social de la vida en la Tierra. El amor generaría vínculos emocionales claves para afrontar los desafíos de la vida en comunidad. En este contexto, conviene indicar aquí que, para los autores de la hipótesis denominada como del "cerebro social" o la "inteligencia maquiavélica", las relaciones estrechas de pareja (en casos extremos, monogamia de por vida) y el cuidado de la prole podrían ser el motor inicial de la socialización en los mamíferos y las aves. Así, las relaciones entre aquellos individuos no emparentados que colaboran estrechamente entre

sí, como ocurre en muchas especies de primates, no serían sino en última instancia un epifenómeno de las relaciones estables de pareja^{[25][26]}. En este contexto, es necesario hacer una referencia a la oxitocina como la hormona responsable del amor. Es un hecho bien corroborado, desde el punto de vista bioquímico, el que se produce una liberación de oxitocina en los adultos expuestos a experiencias fuertemente estresantes y que esa oxitocina contribuye a que éstos asuman su papel en el cuidado de la prole. Hoy día se sabe que esta molécula es un componente importante de un complejo sistema neuroquímico que posibilita la adaptación corporal a situaciones altamente emotivas. No obstante, la oxitocina no se encuentra sola en esta función. Otras moléculas implicadas en la definición de las dinámicas sociales basadas en los afectos son la hormona vasopresina, el neurotransmisor dopamina y los opioides endógenos^{[27][28]}.

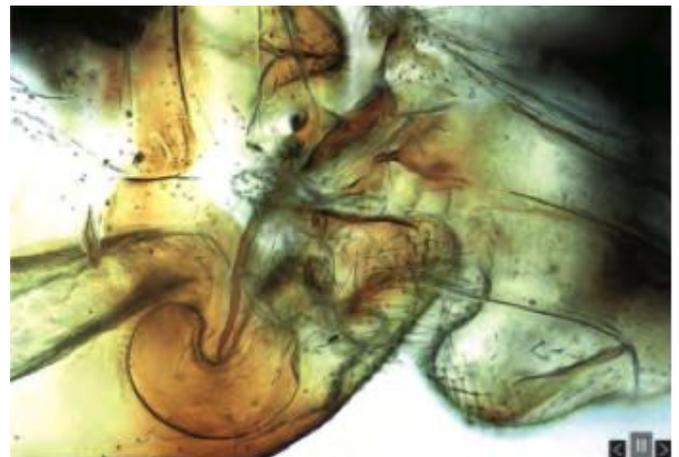


Figura 7. Cópula inversa. Para muchas especies, el sexo no es un asunto íntimo en absoluto. A menudo, los gametos simplemente se arrojan al medio ambiente, dejándolos a su suerte para que se reúnan. Pero muchas otras especies han desarrollado la fertilización interna y la cópula para asegurar el éxito reproductivo. La variedad morfológica de los órganos sexuales que han evolucionado para lograr esta hazaña es tan asombrosa como la diversidad de la vida misma; sin embargo, un tema recurrente es la evolución de los órganos intestinales: los penes de vulgo en los machos. Pero no hay reglas en el sexo y la guerra, así que conozca a Neotrogla, un grupo de insectos de cueva brasileños que son únicos en el reino animal en el hecho de que las hembras han desarrollado penes. Durante la cópula, que puede durar hasta tres días, la hembra (a la derecha) monta al macho e inserta su pene en su abertura genital, una vagina de facto. A través de ella, absorbe la eyaculación del varón, lo que también puede proporcionarle beneficios nutritivos, algo de vital importancia en el ambiente de las cuevas empobrecidas en alimentos y un posible impulsor de esta evolución genital inversa. (Para más información, véase [http://www.cell.com/current-biology/abstract/S0960-9822\(14\)00314-5](http://www.cell.com/current-biology/abstract/S0960-9822(14)00314-5)). Autor: Kazunori Yoshizawa, Hokkaido University.



Figura 8. Sintiéndose como en casa. El resultado final del sexo, la reproducción, es el premio final de la evolución. Sin embargo, las oportunidades de tener relaciones sexuales son limitadas, por lo que se debe tener cuidado en la elección de la pareja sexual para asegurar el mejor resultado reproductivo posible. Esto es particularmente cierto en el caso de las hembras, que en general producen menos gametos e invierten más en la reproducción. Es por eso que a menudo son quisquillosas con respecto a las características de sus futuros compañeros. A veces las hembras se aparean con muchos machos para aumentar sus posibilidades de producir la mejor descendencia posible. Para el macho, esto significa que nunca puede estar seguro del éxito. Es por eso que en muchas especies los machos están más listos para aparearse y a menudo compiten ferozmente por las hembras. Los cuernos del escarabajo de África Oriental *Onthophagus rangifer* son un testamento visible de estas presiones evolutivas. Con estos cuernos, los machos luchan contra sus rivales para mantenerlos alejados de la hembra, vigilada en un túnel. El crecimiento del cuerno es costoso para los machos y puede acortar el tamaño de los ojos, alas o genitales, dependiendo de la especie. Autores: Olga Helmy y Douglas Emien, University of Montana.

Sin embargo, esta forma bioquímica de entender el amor poco tiene que ver con la bioquímica de la atracción sexual, en la que juegan un papel decisivo las feromonas. Aunque popularmente se dice que los adolescentes "cargados" de hormonas sexuales huelen a feromonas y hay un complejo y rico "mercado de olores" que ofrece perfumes "almizclados" con feromonas de otros organismos para atraer a la contrapartida sexual, lo cierto es sólo muy recientemente se ha identificado la primera feromona de mamífero que activa el eje hipotalámico del sistema endocrino que controla la conducta sexual. En 2014, un grupo japonés publicaba en *Current Biology* un artículo en el que identificaba una molécula señalizadora olfativa, el 4-etiloctanal (un aldehído), que activa el regulador central de la reproducción en las cabras^[29]. Este interesante descubrimiento de la biología básica tuvo una amplia repercusión, siendo muy comentado en las páginas de ciencias de la prensa generalista

y en "blogs de ciencias" con titulares tan llamativos como "El olor a cabra que las enciende", "Descubren el olor de los machos de cabra que excita sexualmente a las hembras" o "El aroma de macho cabrío las vuelve locas"^{[30][31][32]}. No es de extrañar, pues, que haya "avispados" que quieran hacer su agosto vendiendo perfumes y jabones impregnados con esta feromona^[33].

Para concluir este apartado, se hace necesaria la alusión a la conferencia invitada especial del Humboldtiano Enrique Cerdá, titulada "Las raíces del sexo" y celebrada el 15 de septiembre de 2017 (apenas un mes antes de nuestro debate) en el Salón de Actos del Rectorado de la Universidad de Málaga, en el marco del *XXVI Encuentro de la Asociación Alexander von Humboldt de España*. En ella, repasando con gracia y aguda ironía la parte de su propia producción científica, centrada en la genética y el metabolismo de los hongos, y en sus ciclos de vida sexual y asexual, Cerdá vino a poner el énfasis en lo mucho que los hongos nos enseñan en lo que respecta a la determinación del sexo^{[34][35]}. Particularmente interesante resultó la aportación de su grupo al descubrimiento de unas feromonas derivadas del metabolismo del beta-caroteno necesarias para el acoplamiento sexual en *Phycomyces*^[36]. Merece la pena mencionar que, aludiendo a conceptos relacionados con "la frecuencia del sexo" en los hongos, y recordando que se trata de organismos que combinan mecanismos de reproducción asexual y sexual, es resaltable la muy escasa frecuencia con que las levaduras practican el sexo: de media sólo una vez... ¡cada 10.000 generaciones!^[37]

¿Qué nos dice la Biología Evolutiva sobre la sexualidad humana?

Cuando queremos estudiar la evolución de un determinado rasgo o estructura orgánica presente en un grupo de organismos, el enfoque más adecuado suele ser buscar la información disponible en el registro fósil, el único archivo que permite acceder a la dimensión temporal de los procesos evolutivos durante el pasado de la Tierra. Ahora bien, este registro lo que suele conservar es información de los tejidos esqueléticos de las especies extintas. Por ello, al plantearnos el estudio del comportamiento de los organismos pretéritos, como ocurre al indagar en la conducta sexual de nuestros antepasados, el registro fósil nos suele ofrecer pocas evidencias directas y debemos cambiar de perspectiva. La alternativa más fiable es adoptar un enfoque comparativo sobre dichos comportamientos y los factores que guardan relación con ellos en las especies más estrechamente relacionadas con la nuestra. Dicho análisis sugiere

que la sexualidad de *H. sapiens* combina una serie de rasgos distintivos, algunos únicos, los cuales se pueden considerar en buena medida como paradojas evolutivas. Entre ellos, destacan: (i) el carácter lúdico del sexo en nuestra especie, no relacionado exclusivamente con la reproducción, rasgo que resulta poco común en mamíferos y primates; (ii) la naturaleza divergente de la sexualidad en las dos especies de simios más próximas a nosotros, chimpancés y bonobos, lo que dificulta inferir el comportamiento reproductivo de nuestros antepasados; (iii) las diferencias de rasgos vitales entre ambos sexos, como en lo relacionado con su morbilidad y mortalidad; (iv) la existencia de una fase de menopausia prolongada en la mujer; y (v) la paradoja, en términos estrictamente evolutivos, de la homosexualidad y la disforia de género, y su posible valor adaptativo a nivel de selección de grupos.



Figura 9. Placer y dolor. Los poetas parecen asociar el sexo con la cercanía y la armonía, pero, en la realidad biológica, es también un feroz choque de intereses entre machos y hembras. Cada pareja hace todo lo posible para maximizar su propio éxito reproductivo, lo que significa transmitir la mayor cantidad posible de sus propios genes a la siguiente generación. Esto puede crear conflictos que impulsan la evolución de estructuras aparentemente paradójicas, como los genitales que parecen armas. Los genitales masculinos del escarabajo de las semillas *Callosobruchus maculatus* portan numerosas espinas afiladas que causan lesiones internas a las hembras durante el apareamiento. Los machos con estas espinas dorsales se benefician al poder transmitir más genes a la siguiente generación que sus competidores, un efecto que parece provenir de un mayor paso de sustancias de señalización a través del tracto genital lesionado de la hembra. La buena noticia: los escarabajos hembra de las semillas están bien adaptados para hacer frente a esta lesión; aunque se vean gravemente lesionados por las espinas dorsales, no sufren daños importantes por el apareamiento. Para más información, véase [http://www.cell.com/current-biology/abstract/S0960-9822\(12\)01193-1](http://www.cell.com/current-biology/abstract/S0960-9822(12)01193-1) y [http://www.cell.com/current-biology/abstract/S0960-9822\(09\)00617-4](http://www.cell.com/current-biology/abstract/S0960-9822(09)00617-4). Autores: Goran Amqvist y Johanna Röhn, Uppsala University.

Entre otras muchas cosas, los seres humanos nos diferenciamos de gran parte de los primates en que nuestra sexualidad no atiende solo a fines reproductivos. La razón es que la receptividad sexual de la mujer no depende exclusivamente de su actividad hormonal durante la fase de ovulación, aunque ciertamente aumenta en los días del ciclo menstrual en los que ésta tiene lugar. Por ello, las mujeres suelen estar dispuestas a copular en cualquier momento del día y del mes. En cambio, las hembras de buena parte de los mamíferos, en especial los grandes herbívoros, sólo son receptivas a la cópula durante el estro anual en el breve período de tiempo destinado a la procreación. Por ello, en estas especies los machos sólo copulan en dicha época del año, y eso si tienen suerte, pues las hembras sólo se aparean con los ganadores en la contienda con sus rivales. Aunque en los primates el estro es mensual, ello no se traduce por lo general en mayores oportunidades de practicar el sexo y menos aún en hacerlo por placer^{[38][39]}; así, la actividad sexual del primate hembra se paraliza durante el embarazo y la lactancia, no volviendo a entrar en celo hasta pasado un tiempo tras el destete de la cría. Por ello, el componente lúdico del sexo en *H. sapiens* contrasta con el escaso uso que hacen del mismo otras especies de primates, incluidos los simios antropomorfos, nuestros parientes vivos más próximos. Así ocurre, por ejemplo, en los gorilas (*Gorilla gorilla*), cuyas cópulas se restringen al intervalo fértil en torno a la ovulación. Si tenemos en cuenta que la gestación se prolonga en esta especie 250 días y que la hembra tras el parto amamanta a su cría durante los siguientes cinco o seis años, las veces que un gorila macho disfruta del sexo con alguna de las hembras de su harén están ciertamente contadas.

La excepción se encuentra en los bonobos o chimpancés pigmeos (*Pan paniscus*). Estos primates son menos territoriales y violentos que sus primos, los chimpancés comunes (*Pan troglodytes*): no libran guerras de exterminio con los clanes vecinos (como sucede en estos últimos y en los humanos) y no suelen practicar el infanticidio. Los bonobos son famosos por la frecuencia de sus cópulas, que muchas veces tienen lugar cara a cara (en las hembras la vagina se encuentra adelantada, como en humanos), por las masturbaciones recíprocas entre machos y los frotamientos genitales entre hembras, así como por las interacciones sexuales entre individuos adultos y jóvenes^{[40][41][42][43]}. Esta intensa actividad sexual les ayuda a reforzar la cohesión del grupo, liberando las tensiones que surgen de las interacciones sociales en el seno del mismo. Los grupos de bonobos tienen una jerarquía matriarcal, a diferencia de los chimpancés comunes y de nosotros mismos, siendo las

coaliciones de hembras las que “ponen en su sitio” a los machos más agresivos, cargados de testosterona. Por esta razón, se les denomina con frecuencia como los “chimpancés hippies”, al estar más interesados en “hacer el amor” que en “practicar la guerra”. En cambio, las hembras de chimpancé común no disfrutan de tales privilegios, pues en su sociedad la estabilidad del grupo depende de coaliciones entre machos, donde su posición jerárquica determina en gran medida el acceso a la cópula con las hembras sexualmente receptivas. Tales hembras, cuando tiene lugar la hinchazón genital indicativa de que están ovulando, son “secuestradas” por el macho dominante, quien trata de monopolizar el sexo con ellas, pero sus “lugartenientes”, de quienes depende que el líder conserve su posición jerárquica, también participan en las cópulas. Las marcadas diferencias de sociabilidad y comportamiento sexual entre chimpancés comunes y bonobos podrían tener una base neurológica. Así, los bonobos parecen tener más materia gris en la amígdala central y en la ínsula anterior del hemisferio cerebral derecho, regiones implicadas en la percepción del sufrimiento, tanto propio como ajeno. Igualmente, los circuitos neuronales que conectan la amígdala y el córtex cingulado anterior están más desarrollados, lo que permitiría un mayor control de los impulsos agresivos, traducándose en su mayor empatía y sensibilidad^[44]. Tales características habrían favorecido la evolución de un comportamiento social más elaborado.

En todo caso, la intensa promiscuidad sexual de ambas especies de chimpancés explica el gran desarrollo de sus testículos (120 g), que llegan a representar un tercio de su masa cerebral, en comparación con las dimensiones más modestas de los humanos (40 g) y, sobre todo, de los gorilas (30 g), cuyo tamaño corporal llega a triplicar el del chimpancé^[45]. Si comparamos a los chimpancés con los gorilas, en los que el macho dominante monopoliza a su harén asegurándose la procreación, la enorme diferencia en tamaño testicular entre las dos especies vendría determinada por la intensa competencia espermática que tiene lugar entre los machos de chimpancé para la fecundación. Esto ha llevado a ciertos autores a considerar que, en nuestra especie, la relación entre tamaño testicular y corporal de los varones, de valor intermedio entre chimpancés y gorilas, podría sugerir como “natural” la monogamia, aunque con ligeras tendencias hacia la promiscuidad.

Ahora bien, no hace falta ser un bonobo o un humano para disfrutar del sexo “no conceptivo”, como ilustran los monos carablanca (*Cebus capucinus*) de Costa Rica, los primates más encefalizados tras nuestra especie, cuyas hembras practican de forma

regular el sexo durante la gestación y la lactancia. Ocurre igual en los macacos japoneses o de cara roja (*Macaca fuscata*), en los que las hembras dominantes “montan” a las subordinadas, alcanzando el orgasmo durante tales simulaciones, en varias especies de delfines y también en algunos carnívoros sociales, en particular las hienas manchadas (*Crocuta crocuta*), cuya jerarquía es matriarcal.

Desgraciadamente, no podemos inferir qué tipo de comportamiento sexual, el de los chimpancés comunes o el de los bonobos, y qué orden de jerarquía social, masculina o femenina, debemos considerar como el “estado ancestral” de nuestra condición humana. La razón es que los antepasados de *H. sapiens* se separaron en el curso de la evolución del antecesor común a chimpancés y bonobos hace entre cinco y siete millones de años, como corrobora el hallazgo de *Sahalanthropus tchadensis*, *Orrorin tugenensis* o *Ardipithecus ramidus*, especies candidatas a representar el primer homínido, mientras que las dos especies de chimpancés habrían divergido entre sí más recientemente, hace menos de dos millones de años, según indica el “reloj molecular de la evolución”. Esto se traduce en que no hay manera de averiguar con un mínimo de certeza si el comportamiento sexual de uno u otro se podría considerar como la condición ancestral presente en dicho antepasado común a chimpancés y humanos. En todo caso, resolver esta cuestión no es algo trivial, e incluso sería peligroso en términos políticos, pues saber qué conducta sexual caracterizó a nuestros ancestros, la de los bonobos o la de los chimpancés comunes, podría usarse para justificar biológicamente determinados comportamientos en nuestra especie, por aquello del “está en nuestros genes”. Pero, igualmente, averiguar si una u otra conducta sexual representa una condición derivada podría llevar a algunos a argumentar que dicha condición es más deseable, por ajustarse mejor a las modas cambiantes en cada época sobre lo “políticamente correcto”, como ocurre hoy día con el comportamiento “lúdico, abierto y tolerante” de los bonobos, más acorde con las expectativas de un sector de la sociedad occidental actual.

El segundo aspecto a discutir es la existencia de una fase prolongada de menopausia en la mujer, cuya explicación en términos evolutivos sigue abierta al debate. Esta característica se debe analizar en un contexto más amplio, el de la longevidad potencial de los seres humanos, más elevada de lo esperable en un mamífero de nuestro tamaño, y también en relación al hecho de que las mujeres vivan por término medio más tiempo que los hombres, algo más de cinco años en las sociedades occidentales (aunque la probabilidad de que a una determinada edad los varones

mantengan una vida saludable sea algo mayor).

Estas diferencias de mortalidad y morbilidad entre los sexos son frecuentes entre los mamíferos, aunque en algunas especies se invierten, pero en todo caso conviene tener en cuenta que la esperanza de vida prolongada en los países avanzados es el resultado de una tendencia iniciada entre mediados del siglo XVIII y comienzos del XIX, lo que resulta irrelevante en términos evolutivos. Dicha tendencia tuvo lugar tras la adopción de hábitos de higiene personal y el uso de vacunas y antibióticos, lo que produjo una disminución drástica de la mortalidad infantil, permitiendo además que cada vez más adultos alcancen la vejez. Esto llevó a pasar de una esperanza de vida en torno a los 25 a 40 años durante la mayor parte de nuestra historia evolutiva (esto es, desde el Paleolítico hasta la revolución industrial) a más de 80 años en los países desarrollados en la actualidad. La tendencia no parece haber alcanzado su final. Así, la longevidad ha aumentado en cuatro años entre 1990 y 2010, y en algo menos las expectativas de vida saludable (diez meses por cada año ganado), lo que tiene el efecto indeseable de traducirse en una fase cada vez más prolongada de dependencia al alcanzar la vejez^[46].

La información anterior cobra mayor sentido si se relaciona con la existencia de una fase prolongada de menopausia en las mujeres. La menopausia se define como aquel momento, en torno a los 51 años, en el que la mujer pierde la fertilidad tras su última regla. Aunque en las hembras de muchos mamíferos, primates incluidos, se produce también una disminución de la capacidad reproductiva con la edad, la pérdida drástica de función ovárica que tiene lugar en las mujeres con la menopausia es el resultado de una cierta “programación” genética, exclusiva de nuestra especie, lo que en las sociedades modernas supone que la fase postmenopáusica pueda alargarse más de tres décadas. Por ello, cabe plantearse hasta qué punto esta singularidad biológica podría haber evolucionado en concierto con nuestra elevada longevidad potencial, al desempeñar un papel adaptativo a nivel de selección de grupos familiares.

Una posible explicación consiste en la llamada “hipótesis de la abuela”, inspirada en el estudio de las sociedades tradicionales de cazadores-recolectores, que contempla la interrupción temprana de la capacidad reproductiva de la mujer como una estrategia adaptativa para sacar adelante a su último hijo al tiempo que colabora en la crianza de los nietos. Obviamente, el registro fósil no ofrece pistas directas que permitan datar la aparición de la menopausia, aunque no es descabellado pensar que se debió producir hace en torno a un millón ochocientos mil años, momento

en el que tuvo lugar el primer aumento significativo de encefalización del género humano en el continente africano. Es entonces cuando aparece en el escenario evolutivo *H. ergaster*, con quien se llega a los 800-950 cm³ de capacidad craneal. En esta especie el tamaño y la estructura corporal alcanzan proporciones similares a las de la humanidad actual, el encéfalo se lateraliza y el lóbulo frontal adquiere mayor tamaño y complejidad, lo que indica un aumento de memoria y capacidades cognitivas. Asimismo, en las improntas endocraneales se aprecia ya el desarrollo de las áreas de Broca y Wernicki, implicadas en el control de los músculos que intervienen en la fonación, lo que sugiere la posibilidad del inicio del lenguaje. Todo ello permite inferir una mayor capacidad de planificación y organización social, así como el desarrollo de mapas mentales del territorio más elaborados.



Figura 10. Ascética animal. Bdeloides del clon ScM1.1, asignados al género *Philodina* por morfología. La mayoría de las especies de rotíferos descritas consisten en varias especies evolutivas crípticas. El animal fue recogido en un pantano en el Cañón Scotia, en las Montañas Huachaca, Arizona. El sexo tiene lugar en todos los linajes principales del árbol de la vida, pero hay muchas excepciones: la mayoría de los organismos unicelulares se pueden reproducir sin sexo durante una cantidad considerable de tiempo. Además, muchas plantas se reproducen asexualmente e, incluso, algunos animales pueden reproducirse sin él, al menos durante algún tiempo. Pero ningún animal asexual ha cautivado la mente de aquellos que tratan de entender la evolución del sexo y su mantenimiento más que los rotíferos bdeloides. Este grupo de microscópicos comedores de agua dulce parece haber vivido sin sexo durante docenas de millones de años. Si han sido realmente abstinentes durante todo este tiempo (lo que no es fácil de probar), plantea un acertijo: si los beneficios del sexo son tan universales y fundamentales, ¿cómo es que los bdeloides pueden prescindir de él? Con el sexo, como ocurre a menudo en la biología, podemos aprender más sobre un proceso por su ausencia. Autor: Bill Birky, University of Arizona

Ahora bien, conviene tener en cuenta que el ca-

nal del parto es más estrecho en los humanos que en los grandes simios, especialmente en sentido anteroposterior, como resultado del cambio postural que tuvo lugar con la remodelación de la pelvis implicada en la adopción de una locomoción bípeda. Como consecuencia, el volumen cerebral máximo que puede tener el recién nacido se sitúa en 385 cm³. Por ello, el incremento de encefalización en *H. ergaster* se traduciría en un mayor grado de expansión cerebral postnatal: en *H. sapiens* el cerebro aumenta de volumen 3,6 veces desde el nacimiento, hasta alcanzar los 1.400 cm³ de promedio en el adulto, mientras que en el chimpancé este aumento es menor (2,8 veces). Ello se tradujo, con seguridad, en un mayor grado de dependencia de los neonatos en comparación con las especies anteriores de homínidos, ya que serían alumbrados en un estado más prematuro y desvalido, lo que implicaría un alargamiento del periodo de crianza y maduración postnatal. En este contexto, las mujeres menopáusicas podrían haber jugado un papel relevante a nivel de selección de grupos familiares, al asistir a sus hijas en el parto y en la crianza de los nietos^[47], algo que también se observa, aunque en menor grado, en los chimpancés.



Figura 11. Apareamiento de titanes. La reproducción comporta riesgos a la integridad de los individuos en el caso de los depredadores, normalmente desconfiados e irascibles, como ocurre con los grandes felinos modernos. Reproducción de dos esqueletos de tiranosaurio en posición de cópula. MUJA (Museo del Jurásico de Asturias). La reconstrucción de la escena pudiera no ser correcta, pues algunos autores opinan que las extremidades superiores de estos dinosaurios, ridículamente pequeñas como resultado de una alometría negativa en los terópodos, podrían desempeñar un papel durante la cópula, para que el macho sujete a la hembra, como ocurre hoy día con los rudimentos de extremidades posteriores conservados en las serpientes constrictoras (boídos). Fuente: <http://www.museojurasicoasturias.com/es/1/el-museo/1/exposicin-permanente/5/cretcico.html>

La mayor longevidad de las mujeres podría explicarse, en parte, por las diferencias entre ambos sexos en su dotación de cromosomas sexuales (recuérdese, XY en el varón y XX en la mujer). Así, el que las mujeres porten dos cromosomas X, de los cuales uno se inactivaría al azar en cada célula, podría explicar su mayor longevidad, pues los alelos del segundo cromosoma compensarían a los dañados con la edad en el cromosoma X activo. Además, existen diversas enfermedades que están ligadas a anomalías genéticas en el cromosoma sexual femenino, las cuales no se manifiestan en las mujeres al tratarse normalmente de alelos recesivos. Esto significa que las mujeres pueden ser heterocigóticas (y por tanto portadoras) respecto a los genes ubicados en este cromosoma sexual, pero los hombres son todos hemicingóticos, por lo que expresan siempre tales mutaciones. Igualmente, el cromosoma X alberga un gen crítico para la reparación de ADN, que si es defectuoso en un varón podría comprometer la reparación de aquellas mutaciones surgidas durante la división celular.

Finalmente, la “hipótesis de la abuela” se complementa con la denominada “hipótesis del patriarcado”, que se basa en el hecho obvio de que solo las personas más longevas pueden trasladar el potencial genético de su longevidad a los descendientes. Dado que la selección natural favorece aquellas características que propician que los individuos se reproduzcan, pero es ciega frente a las que se manifiestan tardíamente cuando ya lo han hecho, el que la capacidad reproductiva desaparezca en las mujeres con la menopausia supondría que serían entonces los varones, en quienes dicha capacidad se prolonga indefinidamente, los que explicarían una selección positiva hacia la mayor longevidad de nuestra especie. Esta hipótesis se ve apoyada por el hecho de que muchas mujeres muestran preferencias a la hora de buscar pareja por hombres mayores que ellas, lo que permite la selección de aquellos varones que presentan una menor carga de mutaciones (ya que habrían tenido más tiempo para expresarlas si las portasen). Ahora bien, la “hipótesis del patriarcado” no da cuenta de la mayor longevidad potencial de las mujeres, salvo si consideramos que los varones con características sexuales masculinas más acentuadas serían quienes tendrían mayores oportunidades de acceder durante su vida a más compañeras sexuales con las que reproducirse. La razón es que los niveles elevados de hormonas masculinas, en particular la testosterona, dan como resultado un fenotipo más viril y, a la vez, son responsables de la menor duración de la vida en los varones, al predisponer a un mayor riesgo frente a determinadas enfermedades, como las cardiovasculares. Esto implica un modelo de selección antagónica por parte

de las mujeres sobre las dos características que determinarían en un varón su eficacia biológica (*fitness*), la capacidad de supervivencia (selección negativa) y el potencial reproductivo (selección positiva). De hecho, un estudio de la longevidad de los eunucos de la corte coreana mostró en estos individuos una vida media de 70 años, entre 14 y 19 años más que en otros grupos de estatus similar^[48]. En función de lo expuesto, la selección por parte de las mujeres de aquellos varones que presentan el fenotipo más viril traería aparejada, indirectamente, su menor longevidad al alcanzar la ancianidad, lo que explicaría las diferencias de mortalidad entre ambos sexos.

El último punto a comentar en este análisis es en relación a la paradoja evolutiva que representa la existencia de personas cuya orientación sexual o identidad de género no coinciden con la esperable de su sexo. A fin de cuentas, la selección natural propicia el que en una población aumenten de frecuencia aquellas conductas sexuales que permiten la reproducción de los individuos, favoreciendo con ello que se transmitan a la siguiente generación los genes que las determinan. Por ello, sorprende constatar que la homosexualidad esté bien representada en los antropoides, especies que presentan los hábitos sociales más desarrollados. En cambio, no se ha documentado hasta ahora entre los prosimios, de comportamiento solitario^[49]. En lo relativo a los seres humanos, los elevados porcentajes de homosexualidad existentes en todas las sociedades no revelan diferencias interculturales, siendo similares en las monógamas y las polígamas.

Uno de los aspectos a considerar aquí es en qué medida se puede considerar la homosexualidad como debida a los genes o al ambiente (esto es, el viejo debate “*nature*” vs. “*nurture*”). Los datos disponibles parecen indicar la influencia de ambos factores: en un 52 % de los casos en que los individuos homosexuales tenían gemelos univitelinos (esto es, con la misma dotación genética), estos últimos también eran homosexuales, mientras que dicha proporción descendió al 22 % en el caso de los gemelos dicigóticos (procedentes de óvulos distintos) y a solo el 10 % tanto en los hermanos no gemelos como en los adoptados. Resulta también interesante, en relación al papel desempeñado por el ambiente externo, que se produzca un aumento de la incidencia de las conductas homosexuales en los animales mantenidos en cautividad y entre la población carcelaria, pero que en cambio no se haya detectado una relación entre homosexualidad y niveles bajos de andrógenos.

En función de todo esto, los posibles mecanismos que darían cuenta, desde un punto de vista evolutivo, de la pervivencia de las conductas homosexuales en

el seno de una población se podrían enmarcar en los tres siguientes marcos explicativos: en primer lugar, cabría considerar la selección de parentesco (*inclusive fitness*) y la “manipulación parental”, pues los varones homosexuales ayudarían a criar a sus sobrinos, los hijos de sus hermanas, o a sus propios hermanos, lo que en definitiva aumentaría la eficacia biológica de sus hermanas y/o padres. De esta manera, los genes responsables de las conductas homosexuales serían portados (y transmitidos) por las mujeres, quizás ubicándose en el cromosoma X, lo que explicaría la mayor incidencia de este fenómeno entre la población masculina (hemicigota para tales genes). En segundo lugar, podría tratarse de un “polimorfismo balanceado”, esto es, un comportamiento no adaptativo pero asociado a selección directa sobre otro rasgo ligado a un gen próximo en el cromosoma, aunque todavía no se ha propuesto de forma convincente cuál podría ser dicho rasgo. Finalmente, podría tratarse de un efecto de la selección de aquellas conductas que determinan el altruismo recíproco entre individuos del mismo sexo. Esto último jugaría un papel esencial en una especie tan altamente social como la nuestra, al determinar el mantenimiento de alianzas estables y duraderas entre los varones^[50]. Tales alianzas, necesarias en actividades de riesgo para la supervivencia individual, como la caza o la guerra, favorecerían la bisexualidad, según se ha documentado en diversos cuerpos de élite del ejército, desde el Batallón Sagrado de Tebas de la Grecia antigua (unidad formada por 150 parejas, consistentes en un miembro conductor de mayor edad y un compañero más joven) hasta los modernos marines.

En fin, a tenor de lo expuesto y discutido anteriormente, podemos afirmar que la sexualidad humana es a la vez compleja y única. La biología evolutiva nos ofrece explicaciones para algunas de sus singularidades, aun cuando en otros casos las respuestas continúan siendo elusivas. Por ello, lo más adecuado es plantearnos las preguntas apropiadas sin atender a tabúes ni sesgos culturales, explorando la diversidad de conductas sexuales que nos ofrece en nuestro entorno el Reino Animal.

Sexo a todo color

Esperamos que este artículo haya servido para aclarar conceptos en torno a un tema tan en boga socialmente como es el sexo. No obstante, si alguno de los lectores es partidario de la idea de que el sexo sin imágenes ni es sexo ni es nada, la directora del programa *Ciencia sin Límites* asume su responsabilidad en la negativa a recurrir a herramientas audiovisuales que interfieran en la dinámica de los

debates (¡máxime si se trata de imágenes de sexo!) y desea resarcir tan tremenda deficiencia compensando el interés mostrado por los lectores con una espectacular galería de "sexo a todo color", aportada por gentileza del Dr. Medina. Se trata del "Cell Picture Show" que, con el patrocinio de Zeiss, se publicó el 5 de septiembre de 2016 conjuntamente con el número especial de *Current Biology* sobre la biología del sexo comentado más arriba. Se trata de una selección de diez impactantes imágenes junto a la presentación en el MUJA (Museo del Jurásico de Asturias) de dos esqueletos de tiranosaurio apareándose. Las imágenes y sus comentarios se han insertado a lo largo de este ensayo.

Referencias

- ¹Blackwelder RE y Shepherd BA. *The Diversity of Animal Reproduction*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1981.
- ²Blackwelder RE y Garoian GS. *Handbook of Animal Diversity*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1986.
- ³Reinboth R. Intersexuality in fishes. *Mem. Soc. Endocrinol.* 18: 515-43, 1970.
- ⁴Reinboth R. *Intersexuality in the animal Kingdom*. Springer-Verlag, Berlín, 1975.
- ⁵Reinboth R. Physiological problems of teleost ambisexuality. *Environ. Biol. Fishes* 22: 249-59, 1988.
- ⁶Birdsell JA y Wills C. The evolutionary origin and maintenance of sexual recombination: A review of contemporary models. *Evolut. Biol.* 33: 27-137, 2003.
- ⁷Fisher RA. The evolution of sexual preference. *Eugen. Rev.* 7: 184-92, 1915.
- ⁸Ridley M. *The Red Queen: Sex and the Evolution of Human Nature*. Viking Books, UK, 1993.
- ⁹Ni M y otros. Sex in Fungi. *Annu. Rev. Genet.* 45: 405-30, 2011.
- ¹⁰Mittwoch U. Sex determination. *EMBO Rep.* 14: 588-92, 2013.
- ¹¹Wilson, E. Recent research on the determination and heredity of sex. *Science* 29: 53-70, 1909.
- ¹²Stevens, NM. Studies in spermatogenesis, with special reference to the accessory chromosome. *Publ. Carnegie Inst. Wash.* 36: 1-32. 1905.
- ¹³Tiju JH y Levan A. The chromosome number of man. *Hereditas* 42: 1-6, 1956.
- ¹⁴Ford CE y Hamerton JL. The chromosome of man. *Nature* 178: 1020-3, 1956.
- ¹⁵Ford CE y otros. A sex-chromosome anomaly in a case of gonadal dysgenesis (Turner's syndrome). *Lancet* 273: 711-3, 1959.
- ¹⁶Fraccaro M y otros. Chromosome complement in gonadal dysgenesis. *Lancet* 273: 866, 1959.
- ¹⁷Jacobs PA y Strong JA. A case of human intersexuality having a possible XXY sex-determining mechanism. *Nature* 183: 302-303, 1959.
- ¹⁸Sinclair AH y otros. A gene from the human sex-determining region encodes a protein with homology to a conserved human binding motif. *Nature* 346: 352-4, 1990.
- ¹⁹Affara NA y otros. Analysis of the SRY gene in 21 sex-reversed XY females identifies four new point mutations in the conserved DNA binding domain. *Hum. Mol. Genet.* 2: 785-9, 1993.
- ²⁰Eggers S y Sinclair A. Mammalian sex determination - insights from human and mice. *emphChromosome Res.* 20: 215-38, 2012.
- ²¹Pieau C y otros. Temperature-dependent sex determination and gonadal differentiation in reptiles. *Cell Mol. Life Sci.* 55: 889-900, 1999.
- ²²Bogani D y otros. Loss of mitogen-activated protein kinase kinase 4 (MAP3K4) reveals a requirement for MAPK signalling in mouse sex determination. *Plos Biol.*, 7: e1000196, 2009.
- ²³Pearlman A y otros. Mutations in MAP3K1 cause 46 XY disorders of sex development and implicate a common signal transduction pathway in human testis determination. *Am. J Hum. Genet.* 87: 898-904, 2010.
- ²⁴Carter CS y Porges SW. The biochemistry of love: an oxytocin hypothesis. *EMBO Rep.* 14: 12-6, 2013.
- ²⁵Dunbar RIM y Shultz S. Evolution in the Social Brain. *Science* 317: 1344-7, 2007.
- ²⁶Dunbar RIM. The social brain hypothesis and its implications for social evolution. *Ann. Hum. Biol.* 36: 562-72, 2009.
- ²⁷Bales KL y otros. Both oxytocin and vasopressin may influence alloparental care in male prairie voles. *Horm. Behav.* 44: 354-61, 2004.
- ²⁸Aragona BJ y Wang Z. Dopamine regulation of social choice in a monogamous rodent species. *Front. Behav. Neurosci.* 3: 15, 2009.
- ²⁹Murata K y otros. Identification of an olfactory signal molecule that activates the central regulator of reproduction in goats. *Curr. Biol.* 24: 681-6, 2014.
- ³⁰URL: <http://www.abc.es/ciencia/20140227/abci-olor-cabar-enciende-ellas-201402271303.html> (Consultado el 4 de octubre de 2017).
- ³¹URL: <https://www.lavanguardia.com/natural...descubren-el-olor-de-los-machos-de-cabra-que-excita-sexualmente-a-las-hembras.html> (Consultado el 4 de octubre de 2017).
- ³²URL: <https://www.xatakaciencia.com/biologia/el-aroma-de-amcho-cabrio-las-vuelve-locas> (Consultado el 4 de octubre de 2017).
- ³³URL: <http://www.ebay.com/itm/MEDUSA-039-S-PHEROMONE-GOAT-039-...mp-BOTTLE-OF-PERFUME-TROPIC-SCENT> (Consultado el 4 de octubre de 2017).
- ³⁴Corrochano LM y Cerdá-Olmedo E. Sex, light and carotenes: the development of *Phycomyces*. *Trends. Genet.* 8: 268-74, 1992.
- ³⁵Idnurm A. Sex determination in the first-described sexual fungus. *Eukar. Cell* 10: 1485-91, 2011.

- ³⁶Alcalde E y otros. Cyclofarnesoids and methylhexanoids produced from β -carotene in *Phycomyces blakesleeianus*. *Phytochem.* 124: 38-45, 2016.
- ³⁷Nieuwenhuis BPS y James TY. The frequency of sex in fungi. *Phil. Trans. R. Soc. B* 371: 20150540, 2016.
- ³⁸Dixson A. Homosexual behaviour in primates. In: A. Poiani (Ed.), *Animal Homosexuality: A Biosocial Perspective*, pp. 381-400. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- ³⁹Driscoll EV. Bisexual species. *Scie. Am. Mind.* 19: 68-73, 2008.
- ⁴⁰de Waal FBM. Bonobo sex and society. *Scie. Am.* 272: 82-8, 1995.
- ⁴¹de Waal FBM. Sex as an alternative to aggression in the bonobo. En: (Abramson, P. y Pinkerton, S., eds.) *Sexual Nature, Sexual Culture*. University of Chicago Press, Chicago, pp. 37-56, 1995.
- ⁴²Parish AM. Sex and food control in the "uncommon chimpanzee": how bonobo females overcome a phylogenetic legacy of male dominance. *Ethol. Sociobiol.* 15: 157-79, 1994.
- ⁴³Clay Z y otros. Female bonobos use copulation calls as social signals. *Biol. Let.* 7: 513-6, 2011.
- ⁴⁴Rilling JK y otros. Differences between chimpanzees and bonobos in neural systems supporting social cognition. *SCAN* 7: 369-79, 2012.
- ⁴⁵Harcourt AH y otros. Testis weight, body weight and breeding system in primates. *Nature* 293: 55-7, 1981.
- ⁴⁶Salomon, JA y otros. Healthy life expectancy for 187 countries, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden Disease Study 2010. *Lancet* 380: 2144-2162, 2012.
- ⁴⁷Hawkes K y otros. Grandmothering, menopause, and the evolution of human life histories. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 95: 1336-9, 1998.
- ⁴⁸Min KJ y otros. The lifespan of Korean eunuchs. *Curr. Biol.* 22: R792-3, 2012.
- ⁴⁹Vasey PL. Homosexual behavior in primates: a review of evidence and theory. *Int. J. Primatol.* 16: 173-204, 1995.
- ⁵⁰Kirkpatrick RC. The evolution of human homosexual behavior. *Curr. Anthropol.* 41: 385-413, 2000.
-
-

Mujeres STEM@UMA

Este número se lo dedicamos a investigadoras del campo de la Agricultura, mujeres STEM que desarrollan su actividad científica en el Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea (IHSM) "La Mayora" (<https://www.ihsm.uma-csic.es/>). Se trata de un Instituto Mixto de la Universidad de Málaga y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) creado en 2010 que comprende la Estación Experimental "La Mayora", situada en Algarrobo Costa, y un edificio en construcción en la ampliación del Campus de la Universidad de Málaga. Las investigadoras protagonistas de la presente sección pertenecen a las distintas líneas de investigación del IHSM "La Mayora", a saber, Mejora Genética y Biotecnología, Fruticultura Subtropical y Mediterránea, Interacciones Planta-Patógeno, y Biología y Control de Enfermedades de Plantas.



Unidad para la Igualdad
entre mujeres y hombres



Investigación en Agricultura



Dra. Carmen R. Beuzón cbeuzon@uma.es

Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora" Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas IHSM-UMA-CSIC, Málaga - Mecanismos moleculares de la patogénesis en bacterias

Doctorada en Biología en 1996 por la Universidad de

Sevilla, se trasladó en 1998 con una beca de la European Molecular Biology Organization (EMBO) al Imperial College London (Reino Unido), donde permaneció hasta 2002 con un contrato asociado a un proyecto financiado por Medical Research Council (MRC). En 2002, se incorporó a la Universidad de Málaga como investigadora del programa "Ramón y Cajal". Ha continuado en el Departamento de Genética de la UMA primero como Profesora Contratada Doctora, luego como Profesora Titular y desde octubre de 2017 como Catedrática de Genética, compaginando docencia e investigación, como parte de la cual ha dirigido 6 tesis doctorales y numerosos trabajos de fin de Grado y Máster. Desde 2010 forma asimismo parte del instituto mixto UMA-CSIC, IHSM "La Mayora", donde es jefa de la Línea de Investigación Interacción Planta-Patógeno. Con su incorporación a la UMA, cambió su tema de trabajo de doctorado y estancia postdoctoral centrado en bacterias patógenas, concretamente en el estudio de los mecanismos moleculares implicados en la colonización

y desarrollo de enfermedad por *Salmonella*, e inició una línea de investigación en las bases moleculares de la colonización y establecimiento de enfermedad por parte en la bacteria patógena de plantas *Pseudomonas syringae*, que ha obtenido financiación continuada del Plan Nacional de investigación desde 2003 hasta la fecha, así como financiación de la Junta de Andalucía y la Fundación Genoma España. Asimismo ha participado o participa en 3 Acciones COST financiadas por la UE.



Dra. Araceli Castillo Garriga ara@uma.es
Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora"- Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMA-CSIC, Málaga) - Interacción planta-patógeno

Estudió Ciencias Biológicas en la Universidad de Málaga y se doctoró en el Área de Genética por la misma Universidad en 2002. Durante los años 2004-2008, completó su formación postdoctoral en dos excelentes centros de investigación del Reino Unido, en Clare Hall Laboratories (Cancer Research UK, CRUK) y en el Wellcome Trust Center for Cell Biology-University of Edinburgh, donde se especializó en el estudio de los fenómenos epigenéticos que controlan la formación de los centrómeros en levaduras. A finales de 2008, se incorporó al Área de Genética de la Universidad de Málaga donde es Profesora Titular y forma parte del Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "la Mayora" (IHSM), centro mixto entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universidad de Málaga (UMA). En la actualidad, lidera un grupo que estudia la importancia de las modificaciones genéticas y epigenéticas que se producen en las plantas en respuesta a estreses bióticos como la infección por virus y bacterias fitopatógenas (<http://www.ihsm.uma-csic.es/>).



Dra. Dolores Fernández-Ortuño dfernandez-ortuno@ihsm.uma-csic.es
Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora" Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMA-CSIC), Málaga - Hongos fitopatógenos

Es Doctora en Biología por la Universidad de Málaga (2007). Su carrera científica, centrada en estudios de resistencia a fungicidas en diversos hongos fitopatógenos, se ha completado con dos estancias postdoctorales en el extranjero. Realizó una estancia de tres años como investigadora postdoctoral, becada por el Ministerio de Ciencia e Innovación, en el grupo de Resistencia a Fungicidas en Rothamsted Research (Reino Unido), donde llevó a cabo estudios en enfermedades fúngicas de gramíneas, tanto en aspectos de resistencia a fungicidas como en dinámica de poblaciones. Dolores realizó una segunda estancia de otros tres años y medio como investigadora postdoctoral en la Universidad de Clemson (Estados Unidos). Financiado por el programa Marie-Curie COFUND U-Mobility, Dolores ayudó a cientos de agricultores a tomar decisiones más racionales sobre el empleo de fungicidas para combatir la podredumbre gris en fresa, causada por el hongo *Botrytis cinerea*. En septiembre 2015, se incorpora al IHSM-UMA-CSIC, a través del programa competitivo ComFuturo, para llevar a cabo un novedoso programa de monitorización de resistencia a fungicidas en patógenos de la fresa. En febrero de 2018, se reincorpora a la UMA como investigadora del Subprograma "Ramón y Cajal". Su trabajo, con elevado valor científico y académico, es además de gran interés aplicado para la agricultura, y así se refleja en numerosas publicaciones indexadas, participación en congresos, entrevistas en medios de comunicación, artículos en revistas de divulgación agrícola, además de por los diversos premios y reconocimientos recibidos.



Dra. Ana Grande Pérez agrande@uma.es
 Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora"- Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMA-CSIC, Málaga) - Evolución de virus

En 1998 se doctoró en Biología por la Universidad de Santiago de Compostela tras una estancia de 18 meses en la Universidad de Lund (Suecia). Investigó durante tres años en la School of Medicine de la Universidad de Manchester (Reino Unido) una nueva terapia antiviral, la mutagénesis letal. En 2003 regresó a España al laboratorio del Dr. Esteban Domingo en el Centro de Biología Molecular "Severo Ochoa" (Madrid) para continuar dichas investigaciones. A finales de 2004 se incorporó a la Universidad de Málaga (UMA) como investigadora del programa "Ramón y Cajal" donde inició una nueva línea de investigación sobre la evolución de virus de plantas. Su grupo estudia en plantas los mecanismos moleculares que conducen a la extinción de los virus de RNA por mutagénesis letal y el origen de la variabilidad genética de los virus emergentes de plantas de DNA como los geminivirus. Ha realizado estancias en el CNRS (Francia, 2008), el IBMCP-CSIC-UPV (Valencia, 2009) y en The Roslin Institute (Edimburgo, 2016). Desde 2017 es IP del grupo PAIDI BIO-264 "Biotecnología de Sistemas agrícolas". Es miembro del comité editorial de las revistas científicas internacionales *Scientific Reports* y *PeerJ*. Desde 2010 es Profesora Titular del Área de Genética de la UMA donde compagina docencia e investigación con la divulgación de la ciencia como miembro del consejo editorial de la revista *Encuentros en la Biología* y con el Dr. Enrique Viguera como coordinadores de *Encuentros con la Ciencia*. Desde 2003 ha sido mentora de talleres

para niños con AACC. Actualmente es mentora del programa Guía Me-AC-UMA, coordinadora de talleres de Ciencias e impulsora del programa COMO TÚ.



Dra. Ana Isabel López-Sesé lopez-sese@eelem.csic.es
 Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora"- Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMA-CSIC, Málaga) - Mejora genética vegetal

En 1997 se doctoró en Ciencias Biológicas por la Universidad de Málaga, llevando a cabo la investigación predoctoral sobre mejora genética para la búsqueda de resistencia a enfermedades víricas transmitidas por insectos a plantas hortícolas en la Estación Experimental "La Mayora" (CSIC). Posteriormente, y durante cuatro años, investigó en la Universidad de Madison en Wisconsin (Estados Unidos) con el Dr. Staub sobre temas relacionados con diversidad genética mediante herramientas moleculares. En 2003 regresó a España con un contrato del programa "Ramón y Cajal" a la Estación Experimental "La Mayora" (CSIC) para continuar dichas investigaciones y aplicarlas a la búsqueda de resistencia genética a diversas enfermedades y plagas de plantas hortícolas. Desde 2005 es científica titular del CSIC (www.csic.es) en el IHSM "La Mayora" (www.ihsm.uma-csic.es) y pertenece al grupo PAIDI AGR-129 "Cultivos Hortícolas y Mejora Genética". Su investigación se centra en la determinación de los factores genéticos y los mecanismos implicados en la resistencia en especies hortícolas a plagas y patógenos como los hongos *Podosphaera xanthii* y *Verticillium dahliae*, mediante el desarrollo de poblaciones segregantes (RIL, NIL...) a partir de líneas seleccionadas de bancos de germoplasma, la construcción de mapas genéticos, y la identificación de QTL y marcadores moleculares asociados a genes de resistencia. Es evaluadora frecuente en agencias nacionales como la ANEP, entre otras, e internacionales como la

DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst, Servicio Alemán de Intercambio Académico), así como de publicaciones en revistas internacionales. Desde hace varios años participa en actividades de divulgación como los "Cafés con Ciencia".



Dra. Catharina Merchante Berg merchante@uma.es
Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora"- Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMA-CSIC, Málaga) - Regulación de la traducción en plantas

Estudió Biología en la Universidad de Málaga y se doctoró en la misma Universidad en 2010. Durante los años 2011-2014 realizó su formación postdoctoral en la Universidad Estatal de Carolina del Norte (NC-SU), financiada por el programa Marie-Curie COFUND U-Mobility. Durante este postdoc se especializó en el estudio de la regulación de la traducción en respuesta a la señalización hormonal en *Arabidopsis*. A finales de 2014, y como continuación de su contrato postdoctoral, se reincorpora al Departamento de Biología Molecular y Bioquímica (UMA). En enero de 2017 consigue un contrato postdoctoral "Para la captación del talento en la investigación" del Plan Propio de la UMA y desde entonces compagina la investigación con actividades docentes. Desde 2018 lidera un grupo de investigación que trata de estudiar el papel que desempeña la regulación del proceso de traducción de proteínas en las respuestas de las plantas al ambiente. Desde enero de 2019 es investigadora del programa "Ramón y Cajal". A partir de su etapa postdoctoral ha colaborado frecuentemente en actividades de divulgación científica y participado como revisora en numerosas publicaciones en revistas internacionales.



Dra. Marta Montserrat Larrosa mmontserrat@eelm.csic.es

Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora"- Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMA-CSIC, Málaga) - Ingeniería de redes tróficas - Control biológico de plagas

Licenciada en Ciencias Biológicas, área de Biología Animal, Vegetal y Ecológica, por la Universidad Autónoma de Barcelona, se doctoró primero en ciencias agrícolas en el Institut per la Recerca i Tecnologia Agroalimentària (IRTA)- Universitat de Lleida (2001), y, posteriormente, se doctoró en Ecología por la Universidad de Amsterdam (2011), donde estuvo contratada en el departamento de dinámica de poblaciones del IBED-UvA (Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics-University of Amsterdam) como AIO primero (2000-2004) y como postdoctoral después (2004-2006). A mediados de 2006 se incorporó a la Estación Experimental "La Mayora", primero con un contrato post-doctoral y, a partir de septiembre del 2009, como Científica Titular del CSIC. En el IHSM-UMA-CSIC su principal línea de investigación se centra en la Ingeniería de Redes Tróficas (FWE, de sus siglas en inglés Food Web Engineering), definida como una extensión del control biológico de plagas por conservación que integra la ecología de comunidades y la ecología evolutiva en el manejo de agro-ecosistemas potencialmente expuestos a factores de estrés evolutivo, como el cambio climático. Es miembro de la Sociedad Española de Ecología Terrestre y de la Sociedad Española de Entomología Aplicada. Es miembro del comité editorial de las revistas *BioControl* (2015-presente) e *International Journal of Pest Management* (2014-2017). Es revisora habitual de artículos enviados a revistas científicas del área de Entomología y de Ecología.



Dra. Sonia Osorio Algar sosorio@uma.es

Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora"- Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMACSIC, Málaga) - Mejora Biotecnológica de Plantas

Licenciada en Química y Doctora, se incorpora en la Universidad de Málaga en el año 2012 con un contrato "Ramón y Cajal" tras haber estado cinco años en el Centro Max Planck Institute of Molecular Plant Physiology, Alemania. Su línea de trabajo, como investigadora principal, es la mejora del fruto de tomate y fresa, que compagina con su actividad docente. Desde su incorporación, S. Osorio ha participado activamente en docencia y redes colaborativas de investigación dentro de la misma Universidad, como con grupos de investigación nacional (IFAPA, CSIC, INIA, empresas privadas), y grupos internacionales (USA, Argentina, Francia, Italia, UK, Alemania, Israel, Noruega, Brasil, Chile). Está interesada en desarrollar herramientas biotecnológicas que ayuden a la mejora vegetal de los frutos de fresa y tomate, cultivos muy importantes económicamente para nuestro país. Recientemente ha sido financiada por la Comisión Europea en la convocatoria europea más competitiva del programa Horizon2020, la SFS-05-2015: Strategies for crop productivity, stability and quality. S. Osorio es coordinadora del proyecto titulado "Improving the stability of high-quality traits of berry in different environments and cultivation systems for the benefit of European farmers and consumers (GoodBerry)" con una financiación de 4,9 millones de euros en el que participan 19 grupos científicos y empresas de 6 países

Europeos además de Chile y China. El objetivo final de GoodBerry es que los resultados obtenidos en los cuatro años de proyecto (2016-2020), tengan un impacto positivo en áreas estratégicas clave, incluyendo producción sostenible mediante el desbloqueo genético de las variedades de baya comercialmente usadas hoy en día y la identificación de estrategias de gestión óptimas, importantes factores socioeconómicos, la economía basada en el conocimiento, la competitividad y la prosperidad, el desarrollo internacional, el avance de la ciencia fundamental y la explotación del conocimiento.



Dra. María Remedios Romero Aranda rromero@eelm.csic.es

Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora"- Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMACSIC, Málaga) - Ecofisiología, relaciones hídricas y calidad de la cosecha

Desarrolla su labor investigadora en el Departamento de Mejora Vegetal y Biotecnología del IHSM-La Mayora. Hizo sus estudios de licenciatura en CC Biológicas en la Universidad de Granada y desarrolló su proyecto de tesis doctoral en el Departamento de Horticultura del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Posteriormente se trasladó a la Estación de Bioclimatología del Institut National de la Recherche Agronomique

(INRA, Francia) donde estuvo desarrollando, durante dos años, investigaciones relacionadas con concentración ambiental de CO₂ en cultivos bajo invernadero. Transcurrida esta primera etapa de formación postdoctoral, desarrolló durante otros dos años, investigaciones sobre la salinidad del agua de riego y la fertilización foliar en el Citrus Research and Education Center de la Universidad de Florida en Lake Alfred (Estados Unidos). Regresó a España, concretamente al departamento de Fruticultura del IVIA, donde siguió investigando el efecto del riego salino sobre distintos patrones de cítricos. Posteriormente se incorporó, como investigadora del programa "Ramón y Cajal", a la Estación Experimental "La Mayora", donde inició una nueva línea de investigación sobre ecofisiología y relaciones hídricas en cultivos bajo invernadero. Precisamente, este fue el perfil de la plaza de Científico Titular que obtuvo unos años después, incorporándose ya como personal de plantilla del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Desde entonces, viene desarrollando investigaciones orientadas al fomento de una agricultura sostenible, respetuosa con el medio ambiente, en la que se apuesta por un uso eficiente del agua y los nutrientes, considerando siempre la calidad de la cosecha tanto en su aspecto físico como nutricional.



Dra. Noemí Ruiz López noemi.ruiz@uma.es
Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora"- Universidad de Málaga-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMA-

CSIC, Málaga) - Transporte de lípidos - Estrés abiótico en plantas

Hizo su tesis doctoral en el Instituto de la Grasa-CSIC y se doctoró en 2006 por la Universidad de Sevilla. Durante estos años, adquirió una amplia experiencia en el campo de la bioquímica y el metabolismo de lípidos en semillas. Tuvo una primera experiencia postdoctoral en Unilever R&D (Países Bajos) en la que estudió la reordenación enzimática en mezclas de triacilglicéridos y continuó su experiencia investigadora en Rothamsted Research (Reino Unido), estudiando el metabolismo para la producción de ácidos grasos largos omega 3 en semillas de *Camelina sativa* y *Arabidopsis thaliana*. Después de dos estancias breves en la Universidad Politécnica de Madrid y el Instituto de la Grasa, se incorporó a la UMA gracias a una beca Marie Curie Individual de la Unión Europea. Actualmente, está trabajando para comprender con detalle los mecanismos moleculares del transporte de lípidos y la señalización lipídica que se produce en los puntos de contacto entre el retículo endoplasmático y la membrana plasmática y que se generan en respuesta a diversos estreses abióticos en plantas. Mantener la productividad y la calidad de los cultivos es el centro de su investigación y por esa razón, es esencial un mayor conocimiento de cómo los lípidos están relacionados con las perturbaciones ambientales. El año pasado, recibió un contrato "Ramón y Cajal" y desde entonces, compagina su actividad docente, investigadora y de formación de estudiantes de doctorado en el Dpto. de Biología Molecular y Bioquímica de la Facultad de Ciencias.

Escribir bien no cuesta trabajo

Últimas novedades del Sistema Internacional

¿Por qué había que cambiarlo?

Toda medición ha de efectuarse siempre frente a un valor de referencia estandarizado para que se puedan comparar entre sí y para que los resultados sean coherentes en todo el mundo. Las referencias estandarizadas aceptadas en todo el planeta constituyen el Sistema Internacional de Unidades, cuya abreviatura internacional es SI (del francés *Système International d'Unités*), y cuyo garante es la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM, del francés *Bureau International des Poids et Mesures*). En la reunión de la Conferencia General de Pesas y Medidas mantenida en Versailles (Francia) el pasado 16 de noviembre de 2018 se ha producido la mayor revisión del SI desde 1875, porque se han modificado las definiciones de kilogramo para la masa, de amperio para la intensidad de corriente eléctrica, de kelvin para la temperatura y de mol para la cantidad de materia.

El cambio viene motivado por la eliminación de los pocos vínculos que quedaban con los patrones físicos o las referencias arbitrarias, como puede comprobarse en la definición todavía vigente, disponible en la [web de la BIPM](#). La independencia se ha logrado al quedar estas unidades referidas ahora a constantes físicas universales, más exactas e inherentemente estables. Las constantes elegidas han sido la constante de Planck (h) para el kilogramo, la constante de Boltzmann (k_B) para el kelvin, la carga elemental (e) para el amperio y el número de Avogadro (N_A) para el mol. Recordemos que para el metro, el segundo y la candela ya se usaban constantes universales:

- desde 1983 se viene usando la velocidad de la luz $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$ para definir el metro;
- la frecuencia de las microondas de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133 ($\Delta\nu_{Cs}$) para el segundo;
- la eficacia luminosa K_{cd} para la candela.

Los cambios no entrarán en vigor hasta el 20 de mayo de 2019 para hacerlo coincidir con el Día Mundial de la Metrología.

Para la mayoría de los mortales, los cambios no van a significar nada, pero para los metrologos sí que suponen un gran avance, al ofrecer las siguientes ventajas:

- Independencia con respecto a cualquier material, sustancia o técnica de medición, lo que implica una mayor exactitud de las medidas.
- Validez en todo el universo conocido y entendido por los humanos.
- Deducibles mediante experimentos.
- Estabilidad temporal con tal de que la estructura física del universo no cambie.
- No será necesario revisar las definiciones ante futuras mejoras de la tecnología que se emplee para su determinación.
- No serán patrimonio de ningún país.

Pero el cambio tiene su lado oscuro. Al menos temporalmente, a los metrologos se les complica la vida a la espera que de mejore la concordancia entre los experimentos realizados en distintos laboratorios. Ante cualquier discordancia en las medidas, por pequeña que sea, la BIPM actuará como árbitro: pedirá a los distintos grupos que midan los mismos objetos y establecerá valores medios. Como va a ser un proceso largo, más de 10 años según los expertos, los valiosos patrones físicos que hoy se encuentran repartidos por el mundo no se tirarán a la basura, sino que se seguirán empleando para las industrias que lo necesiten, como la aeroespacial o la biotecnológica.

Otro efecto colateral, que tampoco tendrá mucha repercusión en los mortales, es que las nuevas definiciones de las unidades fundamentales del SI son interdependientes, porque las unidades con las que se definen las constantes se expresan por combinación de varias unidades fundamentales (figura 1). Así pues, todas tendrán que adaptarse para quedar bien alienadas con las nuevas, porque cualquier error de precisión en la determinación de una de ellas tendrá repercusión sobre las otras. En la figura 1 se observa con claridad que, mientras que el mol es absolutamente independiente de las otras unidades, el segundo (también independiente) se necesita en las otras cinco unidades fundamentales. Por tanto, cualquier error a la hora de determinar la duración de un segundo afectará al patrón de kilogramo, kelvin, candela, metro y amperio. Pues bien, los metrologos señalan que la actual definición del segundo es menos precisa que la que se obtiene con los llamados

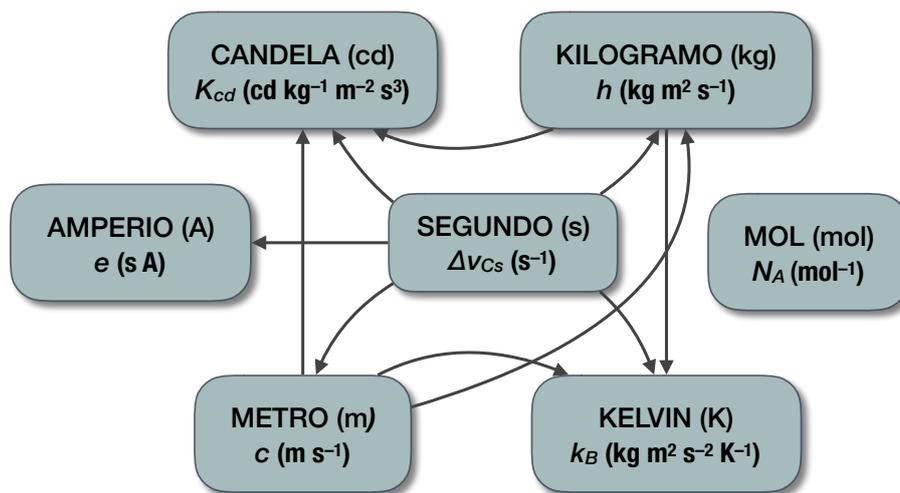


Figura 1: En las nuevas definiciones del Sistema Internacional, todas las unidades están definidas en función de una constante universal, de la que se indican su símbolo y, entre paréntesis, las unidades fundamentales en la que se expresa, con el fin de ilustrar importante interdependencia entre ellas. Dependen únicamente de sí mismos el mol (ni llegan ni salen flechas) y el segundo (salen 5 flechas, pero no llega ninguna).

«relojes ópticos» que emplean distintos átomos que interactúan con la luz visible, de mayor frecuencia que las microondas. Así que ya sabemos lo que nos espera a corto plazo: otra importante redefinición, esta vez del segundo, probablemente en 2026.

Veamos cómo han quedado las unidades afectadas por los últimos cambios, que los puedes comparar con las [definiciones todavía vigentes en la BIPM](#).

Kilogramo

La nueva definición acaba con más de cien años de tradición metrológica. La primera definición de kilogramo —los interesados en saber por qué el patrón de masa es el kilogramo en lugar del gramo, que consulten la entrada de mi nanoblog [¿Por qué es el kilogramo y no el gramo una unidad básica?](#)— se estableció en plena Revolución Francesa, y proponía que un decímetro cúbico de agua pura a 3,98 °C y a una atmósfera de presión (760 mmHg) equivalía a un kilogramo de masa. Si pensamos en lo difícil que es controlar la temperatura del agua, que la densidad del agua cambia con la presión (también de difícil control) y lo aún más difícil que es obtener agua pura, queda claro que la definición dista mucho de ser exacta para las necesidades del siglo XXI. La definición clásica tenía un problema aún más grave: al depender de la densidad del agua, que a su vez está relacionada con la masa, la definición es un círculo vicioso de definiciones.

Para estabilizar su valor, los franceses decidieron crear en 1889 un patrón mediante la fabricación un cuerpo de platino al 90 % e iridio al 10 % de un volumen tal que su masa equivale a un kilogramo. Este patrón, de-

nominado por algunos «el gran K» aunque oficialmente es el «prototipo internacional del kilogramo» (IPK, del inglés *International Prototype of the Kilogram*), cabe en la palma de la mano y la guarda la BIPM en Sèvres, a las afueras de París (Francia), bajo tres campanas de vidrio en un ambiente controlado ultralimpio. Con los años, se ha comprobado que no es un patrón estable porque está perdiendo masa a razón de 50 µg cada siglo con respecto a las copias que de él se han fabricado y guardado en iguales condiciones.

La nueva definición toma como valor numérico fijo de la constante de Planck

$$h = 6,626\ 070\ 040 \cdot 10^{-34} \text{ J s.}$$

La unidad J s equivale a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ (figura 1). Se ha tardado tanto tiempo en proponer este cambio porque hasta hace muy poco no se podía medir con suficiente precisión la h . Los avances en el método de la balanza de Kibble lo han hecho posible.

Kelvin

Quedará definido a partir del valor fijo de la constante de Boltzmann

$$k_B = 1,380\ 649 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

que relaciona energía y temperatura. La precisión de este cálculo es mucho mayor que el de la antigua definición basada en el punto triple del agua, un estado caracterizado por ciertas condiciones y una temperatura específica que presentaba los mismos problemas que la definición del kilogramo basado en el agua.

Amperio

Como los metrologos han perfeccionado los experimentos capaces de contar el flujo de electrones individuales en una corriente eléctrica, ahora podrá usarse la carga de una sola de estas partículas

$$e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ s A}$$

para determinar el amperio. Así pues, se descarta la antigua definición basada en un experimento ideal que implicaba dos cables infinitamente largos y se conecta con la comunidad eléctrica, que ha venido empleando la e desde 1990 por su mayor precisión.

Para saber más:

Agencia SINC. [Novedades en el Sistema Internacional de Unidades: kilo, amperio, kelvin y mol se redefinen](#). 2018 [consulta: 7-XII-18]

Bureau International des Poids et Mesures. [Sur la révision à venir du SI](#). 2018

[Draft Resolution A at 26th meeting of the CGPM](#). 16 de noviembre de 2018.

Elizabeth Gibney. [Metrologists ditch last physical standard units](#). *Nature* 563, 451-452. 2018

M.G. Claros. [Cómo traducir y redactar textos científicos en español. Reglas, ideas y consejos](#). *Cuadernos 39*. Fundación Dr. Antonio Esteve. 2017

M.G. Claros [El nanoblog del Gonz](#). 2018 [consulta: 7-XII-18]

M. GONZALO CLAROS

Mol

Hasta ahora se había definido a partir del número de átomos presentes en una muestra de 12 g de carbono 12, y pasará a estar determinado por el número de Avogadro

$$N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$$

El mol se redefinirá con respecto a un número específico de entidades (átomos o moléculas) y ya no dependerá de la unidad de masa, el kilogramo. De hecho, es la única unidad que carece de interrelación alguna con las demás (figura 1).

UNA NUEVA CAPA DE INFORMACIÓN: EPITRANSCRIPTÓMICA

por RAFAEL A. CAÑAS

INVESTIGADOR DEL DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA MOLECULAR Y BIOQUÍMICA. FACULTAD DE CIENCIAS. UNIVERSIDAD DE MÁLAGA. 4^A PLANTA EDIFICIO I+D, CAMPUS DE TEATINOS S/N 29071 MÁLAGA

RCANAS@UMA.ES

Palabras clave: epitranscriptómica, nucleósidos modificados, regulación de la traducción
Keywords: epitranscriptomics, modified nucleosides, translation regulation

Enviado: 13 noviembre 2018

Aceptado: 5 diciembre 2018

Los nucleósidos de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) sufren modificaciones químicas, principalmente en sus bases nitrogenadas, que constituyen una nueva capa de información. El conjunto de las modificaciones que sufre el ARN se conoce como epitranscriptoma. En este artículo se hace una revisión de la importancia fisiológica del epitranscriptoma, principalmente en la regulación de la traducción.

The nucleosides of nucleic acids (DNA and RNA) undergo chemical modifications, mainly in their nitrogenous bases, which constitute a new layer of information. The set of modifications suffered by RNA is known as epitranscriptome. In this article, we review the physiological importance of the epitranscriptome, mainly in the regulation of translation.

Introducción

Normalmente, en la docencia de la biología y sus ciencias hermanas se tiende a simplificar la composición de los nucleósidos, tanto del ADN como del ARN. Siempre se dice que el ADN está conformado por los desoxinucleósidos cuyas bases nitrogenadas son la adenina, la guanina, la citosina y la timina mientras que el ARN está compuesto por ribonucleósidos con las mismas bases nitrogenadas a excepción de la timina, que está sustituida por el uracilo. Aunque es cierto que tanto el ADN como el ARN se sintetizan a partir de los correspondientes cuatro nucleótidos, la composición de sus nucleósidos es mucho más rica y compleja. Esto se debe a que los nucleósidos del ADN y del ARN pueden sufrir modificaciones químicas que dan lugar a diferentes bases nitrogenadas que presentan otras características químicas. La existencia de modificaciones químicas en el ADN y en el ARN de todos los organismos y virus se conoce bien desde mediados del siglo XX, cuando se descubrió la desoxi-5-metilcitidina (dm⁵C) en el ADN y la pseudouridina (Ψ) en el ARN [1]. Desde entonces, se han identificado más alteraciones en el ADN [2], pero principalmente en el ARN donde se han descrito más de 160 modificaciones de los nucleósidos [3] (figura 1). Estos cambios se pueden deber a agentes físicos o químicos que alteran la estructura de los nucleósidos y pueden dar lugar a mutaciones, pero también pueden deberse a procesos fisiológicos celulares. En este segundo caso, estos cambios constituyen una segunda capa de información sobre la secuencia primaria de las bases nitrogenadas que permiten incluir un nivel

complementario de regulación génica. Estas modificaciones de los nucleósidos de los ácidos nucleicos son parte fundamental de los procesos epigenéticos (la epigenética es un concepto biológico muy discutido en el que no se entrará como tal; para más información sobre el término y su evolución en la biología, véase [4]). Un ejemplo perfecto de ello y ampliamente estudiado es la función de las metilaciones dm⁵C en las islas CpG del ADN genómico que promueven la inhibición de la transcripción génica. Estas metilaciones no son irreversibles o constantes y su perfil de aparición en las distintas regiones del genoma puede modificarse según las condiciones ambientales y de desarrollo [5].

Epitranscriptómica

Las modificaciones de nucleósidos en el ARN se identificaron y estudiaron inicialmente en los ARN ribosómicos (ARNr) y en los ARN transferentes (ARNt). En los ARNr tienen importancia para estabilizar el ribosoma y son fundamentales para su actividad biológica, al presentar cambios en su dinámica de aparición en función de las condiciones ambientales, lo que puede servir para regular la traducción de las proteínas [6]. Con respecto a los ARNt, un 17% de los nucleósidos son diferentes de los cuatro canónicos. En este caso, son importantes para la maduración y el plegamiento del ARNt, aunque también se suelen encontrar en el anticodón, lo que tiene especial relevancia para el reconocimiento entre el codón y el anticodón durante la traducción y, finalmente, para la incorporación de un determina-

do aminoácido a la cadena polipeptídica naciente [7]. En el resto de las especies de ARN también se han encontrado nucleósidos alternativos. Desde 1975 se conocía de la existencia de modificaciones de nucleósidos en la secuencia interna de los ARN mensajeros (ARNm), principalmente la *N*⁶-metiladenosina (*m*⁶A) y la 5-metilcitosina (5mC) [8][9].

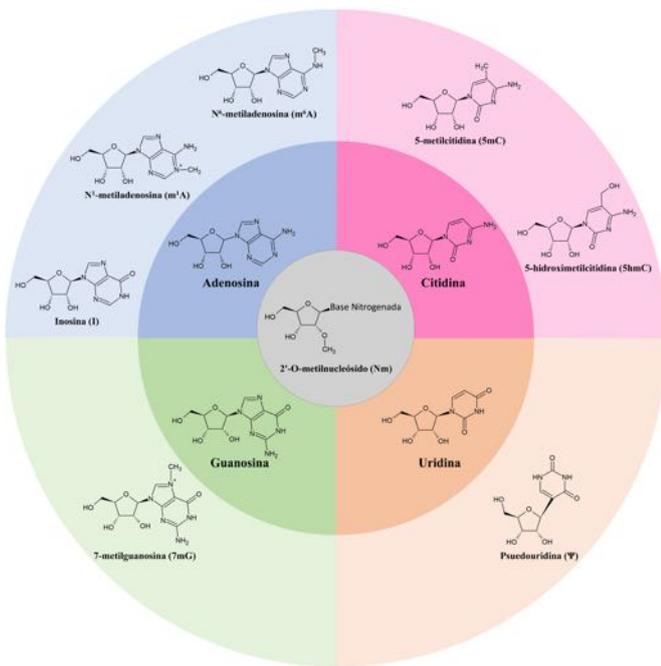


Figura 1. Ejemplos de nucleósidos modificados en el ARN.

También se conocía la existencia de 7-metilguanosinatrifosfato (*m*⁷Gppp) en el extremo 5' del ARNm de los eucariotas, conocido como caperuza (del inglés *cap*), que tiene especial relevancia para el inicio de la traducción. Sin embargo, su estudio no se ha generalizado hasta la aparición de nuevos métodos para la caracterización del perfil de modificaciones de los nucleósidos por todo el transcriptoma (técnicas ómicas como la *m*⁶A-seq y la MeRIP-Seq) durante la última década. El impacto de estos estudios y sus resultados ha sido tal que se ha acuñado el término epitranscriptómica para hablar de la nueva capa de información biológica contenida en el conjunto de las modificaciones de los nucleósidos de las especies de ARN [10]. A este respecto, la epitranscriptómica se está desarrollando principalmente sobre la caracterización de los cambios de nucleósidos en el ARNm y la

relevancia que estos tienen sobre la traducción. Estas modificaciones postranscripcionales del ARN desempeñan una función esencial a la hora de determinar el proteoma celular, puesto que pueden incidir sobre la cantidad de ARNm y sobre la tasa de traducción, factores esenciales para la producción de proteínas. Básicamente, los nucleósidos modificados pueden intervenir directamente en el inicio de la traducción, ralentizar la velocidad de la elongación, alterar la terminación e incluso recodificar el código genético al promover la unión de un ARNt diferente [11]. En experimentos tanto *in vitro* como *in vivo* se ha observado que la introducción de una Ψ en el lugar del uracilo de la primera posición de los codones de parada (UAA, UAG y UGA) impide que se termine la traducción, aunque no se ha logrado determinar aún si esto tiene una relevancia biológica real [12]. Pero también pueden alterar la vida media del ARNm, el proceso de ajuste (*splicing*) y la localización subcelular del ARNm (no sólo la exportación nuclear) (figura 2) [11].

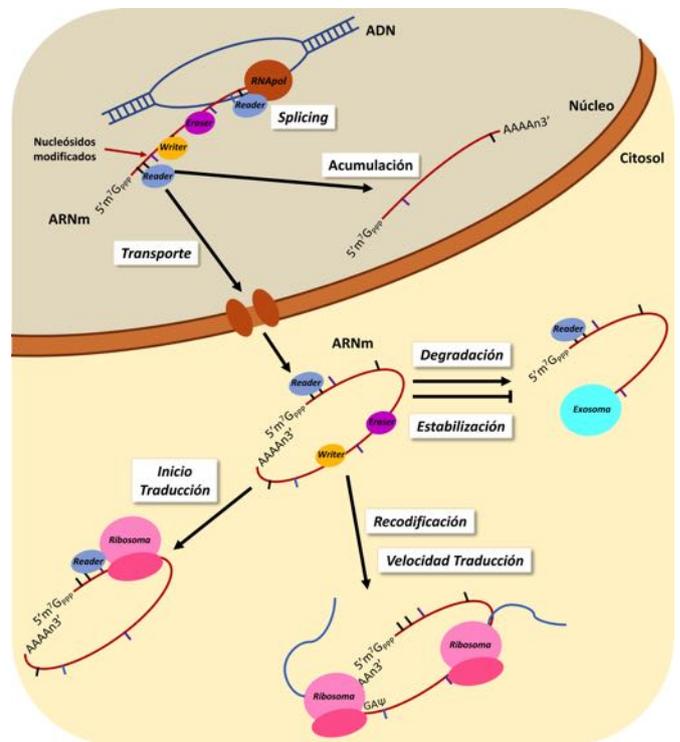


Figura 2. Procesos celulares en los que intervienen los nucleósidos modificados de los ARNm.

Con respecto a la estabilidad, se sabe que los ARNm que contienen *m*⁶A tienen una menor vida media, al favorecerse su degradación. Por el contra-

rio, los ARNm que contienen pseudouridinas son más estables. De hecho, al igual que el ADN metilado no es capaz de inducir la respuesta inmunitaria innata mediada por el receptor del tipo *toll* (TLR) en los mamíferos, el ARN que contiene nucleósidos como 5mC, m⁶A, y Ψ tampoco induce esta respuesta. Estas modificaciones también intervienen en el transporte del ARN del núcleo al citosol; un ARN con poca m⁶A queda retenido en el núcleo y la 5mC es reconocida por la proteína de exportación nuclear ALYREF (*Ally of AML-1 and LEF-1*) [13]. Una de las cosas más importantes para el desarrollo del estudio de la epitranscriptómica fue la caracterización de la maquinaria enzimática necesaria para escribir (introducir la modificación química en el nucleósido), leer (reconocer el nucleósido modificado) y borrar (eliminar la modificación química del nucleósido, lo que no siempre es posible, como con la pseudouridina) esta nueva capa de información contenida en el ARN. Intuitivamente, los componentes de este sistema se han clasificado basándose en su función como proteínas *writers* (escritoras), *readers* (lectoras) y *erasers* (borradoras) [11]. El caso mejor estudiado es el de la m⁶A, una modificación abundante en el ARNm y muy dinámica puesto que se puede introducir y eliminar del conjunto de ARNm según las condiciones de desarrollo o ambientales de la célula. Así, se sabe que la metilación se introduce gracias a un complejo metiltransferasa multiproteico del que se han identificado diferentes miembros, como las proteínas de tipo metiltransferasa 3 (METTL3) y 14 (METTL14), o la proteína asociada al tumor de Wilms 1 (WTAP). En las plantas, donde el estudio de la epitranscriptómica está menos desarrollado, se ha observado específicamente que el complejo de escritura de m⁶A contiene una ubiquitina ligasa (HAKAI), lo que relaciona la modificación del ARNm con la degradación de proteínas [14]. Las proteínas lectoras son las que median las funciones de la m⁶A. Se ha identificado un buen número de ellas como FMR1 o la familia de proteínas que contiene el dominio YTH cuya función es la unión al ARN que contiene m⁶A. Incluso el factor de inicio de la traducción eIF3 puede ser, en determinadas circunstancias, una proteína lectora de las m⁶A existentes en el 5'UTR, por lo que promueve la iniciación de la traducción con independencia de la caperuza de 7-metilguanosina (m⁷G) del ARNm. Finalmente, también se conocen diferentes desmetilasas, como la proteína asociada a la obesidad (FTO) y el homólogo 5 de AlkB (ALKBH5), que eliminan esta modificación y permiten que exista un equilibrio de m⁶A en el ARNm, lo que a su vez modula su función en función de las condiciones ambientales o de desarrollo [11]. Evidentemente, todas

estas funciones celulares intervienen y se regulan por procesos fisiológicos y de desarrollo complejos. Por ejemplo, las mutaciones que eliminan la actividad del lector ALKBH5 provocan infertilidad masculina en los mamíferos [15]. En las plantas se ha visto que las modificaciones de los nucleósidos del ARNm pueden ayudar a controlar el desarrollo, por ejemplo, de las hojas, pero sobre todo a mantener el meristemo apical para evitar una proliferación excesiva. Esto sucede gracias a que la m⁶A reduce la vida media de los reguladores del meristemo apical WUS y STM [14].

Conclusiones

A pesar de la gran cantidad de modificaciones de nucleósidos tanto en el ADN como en el ARN y la importancia que presentan en el control de los procesos biológicos celulares, principalmente implicados en el dogma central de la biología molecular, su papel actual está minusvalorado en la docencia de las ciencias biológicas. La expansión del conocimiento de la epitranscriptómica de los seres vivos está cambiando nuestra visión de las funciones celulares básicas relacionadas con la expresión génica. La complejidad es mucho mayor de la esperada, ya no estamos ante sistemas simples que dan lugar a funciones complejas, sino ante sistemas ultracomplejos que dan lugar a resultados simplemente complejos.

Referencias

- ¹Grosjean H. Modification and editing of RNA: historical overview and important facts to remember. In: Grosjean H. (eds) *Fine-Tuning of RNA Functions by Modification and Editing. Topics in Current Genetics*, vol 12. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.
- ²Sood AJ y otros. DNAmdb: the DNA modification database. *bioRxiv*. 071712, 2018.
- ³Boccaletto P y otros. MODOMICS: a database of RNA modification pathways. 2017 update. *Nucleic Acids Res.* 46: D303–D307, 2018.
- ⁴Nicoglou A y Merlin F. Epigenetics: A way to bridge the gap between biological fields. *Stud. Hist. Philos. Biol. Biomed. Sci.* 66: 73–82, 2017.
- ⁵Luo C y otros. Dynamic DNA methylation: In the right place at the right time. *Science* 361: 1336–1340, 2018.
- ⁶Sloan K y otros. Tuning the ribosome: The influence of rRNA modification on eukaryotic ribosome biogenesis and function. *RNA Biol.* 14: 1138–1152, 2017.
- ⁷Sokolowski M y otros. Cooperativity between different tRNA modifications and their modification pathways. *Biochim. Biophys. Acta Gene Regul. Mech.* 1861: 409–418, 2018.
- ⁸Dubin DT y Taylor RH. The methylation state of poly A-containing messenger RNA from cultured hamster cells. *Nucleic Acids Res.* 2: 1653–1668, 1975.
- ⁹Perry RP y Kelley DE. Methylated constituents of heterogeneous nuclear RNA: Presence in blocked 50 terminal structures. *Cell* 6: 13–19, 1975.
- ¹⁰Saletore Y y otros. The birth of the Epitranscriptome: deciphering the function of RNA modifications. *Genome Biol.* 13:

175, 2012.

¹¹Peer E y otros. The Epitranscriptome in Translation Regulation. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* pii: a032623, 2018.

¹²Karijolic J y Yu YT. Converting nonsense codons into sense codons by targeted pseudouridylation. *Nature* 474: 395-398, 2011.

¹³Yang X y otros. 5-methylcytosine promotes mRNA export—NSUN2 as the methyltransferase and ALYREF as an

m5C reader. *Cell Res.* 27: 606-625, 2017.

¹⁴Vandivier LE y Gregory BD. New insights into the plant epitranscriptome. *J. Exp. Bot.* 69: 4659-4665, 2018.

¹⁵Tang C y otros. ALKBH5-dependent m6A demethylation controls splicing and stability of long 30-UTR mRNAs in male germ cells. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115: E325-E333, 2017.

Ciencia Sin Límites



Ciencia, Política y Poder:

¿Está manipulada la investigación científica?

Martes, 26 de marzo
Salón de Grados
Facultad de Ciencias
17:30h

Dr. Enrique Martínez: La óptica política
Dr. José María Pérez Pomares: La óptica científica
Dr. Manuel Toscano: La óptica ética

Modera y dirige: Dra. Victoria de Andrés



UMADivulga
Plan Orgánico de Divulgación Científica de la Universidad de Málaga 2015



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Vicerectorado de Investigación y Transferencia
 Publicaciones y Divulgación Científica



Facultad de Ciencias
uma.es

Ámbito y política editorial

La revista *Encuentros en la Biología* (ISSN 1134-8496) es una revista de divulgación científica con carácter interdisciplinar, está editada por la Universidad de Málaga y publica periódicamente (primavera, verano, otoño, invierno) aquellas contribuciones originales que se enmarcan en un ámbito de encuentro entre las ciencias biológicas y las demás fuentes de conocimiento científico; esto es, conocimiento testado experimentalmente y avalado al menos por una fuente primaria de documentación. Aceptará también la edición de biografías de autores relevantes, de reseñas de libros y trabajos especializados, de imágenes para la portada, la sección «La imagen comentada» y otras secciones especializadas, así como noticias, comunicaciones y eventos relacionados con la biología. La editorial valorará positivamente la contribución de los trabajos en un formato ameno y accesible para estudiantes y profesores de todas las áreas de la biología, al igual que la presentación de las últimas novedades científicas en este área.

Encuentros en la Biología es un foro de difusión abierto para todas aquellas personas que estén interesadas en enviar sus aportaciones. Las contribuciones así presentadas deberán ajustarse a la política editorial y a las normas que a continuación aparecen como «Instrucciones para los Autores». La revista se reserva el derecho a realizar cuantas modificaciones en forma y diseño estime oportunas.

Instrucciones para los autores

1. Todas las contribuciones serán inéditas o contarán con la autorización expresa del organismo que posea los derechos para su reproducción, en cuyo caso la edición incluirá la referencia de su autoría. Los manuscritos recibidos podrían revisarse con medios técnicos para detección de plagios.
2. Cada contribución constará de un título, el nombre completo del autor o autores, su afiliación (institucional, académica o profesional) y correo electrónico. Para distinguir la afiliación de diferentes autores utilice símbolos (*, †, ‡, §, ¶, etc.) después del nombre de cada uno.
3. El documento se puede enviar en formato `txt`, `rtf`, `sxw/odt` (OpenOffice/LibreOffice), `doc/docx` (MS-Word) o `tex` (L^AT_EX). Manuscritos largos pueden dividirse en varias partes que aparecerían en números distintos.
4. Los nombres de las proteínas se escribirán en mayúsculas y redondilla (ABC o Abc). Los de genes y especies aparecerán en cursiva (*ABC*, *Homo sapiens*). También se pondrán en cursiva los términos que se citen en un idioma distinto al castellano.
5. Los autores que no sean castellanohablantes pueden remitir sus manuscritos en inglés. Una vez aceptado, el equipo editorial elaborará un resumen en castellano.
6. Las tablas, figuras, dibujos y demás elementos gráficos deberán adjuntarse en ficheros independientes. Cuando sea posible, utilice el formato vectorial no propietario `pdf`, `svg`, `eps` o `ps`. En caso de fotografías o figuras tipo `bitmap` se pueden enviar en formato `jpg`, `tif` o `png` con una resolución mínima de 300 ppp. Existe la posibilidad de incorporar breves animaciones en formato `gif` a baja resolución.
7. Las referencias bibliográficas se citarán dentro del propio texto, numeradas por orden de aparición, entre corchetes en superíndice^[1]. Al final del mismo, se incluirá la sección de *Bibliografía* o *Referencias* de acuerdo con el estilo del siguiente ejemplo:
¹Einstein Z y Zwestein D. Spatial integration in the temporal cortex. *Res Proc Neurophysiol Fanatic Soc* 1: 45-52, 1974.
²Sóbol I. *Método de Montecarlo*. MIR, Moscú. 1976.
 Si hay más de dos autores, se citará el primero seguido de «y otros».
 Si el texto principal no incluye referencias bibliográficas, se ruega a los autores que aporten 3-4 referencias generales «para saber más» o «para más información».
8. Se anima a contribuir a la sección *la imagen comentada* con imágenes originales o de libre distribución (300 ppp de resolución como mínimo) acompañadas en documento aparte con un breve comentario de unas 300 palabras relacionado con la misma (descripción, información, técnica, etc.).
9. Se considerará cualquier contribución para las distintas secciones de la revista.
10. Envío de contribuciones: el original se enviará por correo a los coeditores o a cualquier otro miembro del comité editorial que consideren más afín al tema de la contribución. Como último recurso, se pueden enviar por correo postal acompañados de un CD. No se devolverá ningún original a los autores.
11. La aceptación de todas las contribuciones se hará a petición de los miembros del equipo editorial, manteniendo en todo caso los coeditores la decisión final sobre la misma. También se podrá sugerir al autor mejoras formales o de contenido para adaptar el artículo al perfil de la revista. La notificación se enviará por correo electrónico al autor que figure como corresponsal.