ANTOLOGÍA

ASIGNATURA: COMPRENSIÓN LECTORA

QUINTO SEMESTRE

AGOSTO 2025 – ENERO 2026

Campo disciplinar (Lenguaje y Comunicación)

NOMBRE DEL ALUMNO:_____GRUPO:_____

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 2

LECTURAS

LECTURA 1. SECUELAS DEL COVID: LO QUE (AÚN NO) SABEMOS 5
LECTURA 2. AGUA EN MARTE 9
LECTURA 3.LA MENTE ERRANTE 16
LECTURA 4. AUGURIOS CELESTES Y LA CAPITULACIÓN DE TENOCHTITLAN 22
LECTURA 5. RETRATO DE UN HOYO NEGRO 28
LECTURA 6. LA MIRADA DEL TELESCOPIO ESPACIAL JAMES WEBB. 33
LECTURA 7. FENTANILO: ADICTIVO Y LETAL 39
LECTURA 8. SUSURROS DEL UNIVERSO BAJO TIERRA: EL SNOLAB 45
LECTURA 9. LOS LÍMITES DEL PLANETA 51
LECTURA 10. RELACIONES TÓXICAS. LA VIDA SEXUAL DE LOS INSECTOS 57
LECTURA 11. MÁS CERCA DE LA FUSIÓN NUCLEAR 63
LECTURA 12. NADA PEOR PARA EL HUMOR. 69
LECTURA 13. SANGRE DE COLORES: DESDE HUMANOS HASTA LAGARTIJAS 73
LECTURA 14. AVATARES QUÍMICOS. EN BUSCA DE NUEVOS FÁRMACOS 79
LECTURA 15. "PLANETA" ES UNA PALABRA ERRANTE. 84
LECTURA 16. PLEGANDO PROTEÍNAS 90
LECTURA 17. LOS RETOS DE APOLO Y ARTEMISA 97
LECTURA 18. TERROR A MEDIANOCHE ¿O A MEDIODÍA? 103
LECTURA 19. PALEOGENÓMICA: ¿VOLVERÁN LOS DINOSAURIOS? 109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 115

INTRODUCCIÓN

La comprensión lectora representa la columna vertebral para la adquisición de conocimientos. Es entendida como el resultado de un proceso de construcción de significado, en el que participan dos elementos: lector y texto (literarios, informativos, científicos, etc.), en las que se analiza la dimensión lingüística, informativa, expresiva e intencional del autor.

El potencial formativo de la comprensión lectora va más allá del éxito en los estudios; la lectura proporciona cultura, desarrolla el sentido estético, actúa sobre la formación de la personalidad y es fuente de recreación y gozo. La comprensión lectora constituye un vehículo para el aprendizaje, para el desarrollo de la inteligencia y la imaginación, para la adquisición de cultura y para la educación.

Por tal motivo, la Dirección de la Escuela de Bachilleres Diurna "Antonio María de Rivera" a través del Campo Disciplinar de Lenguaje y Comunicación, desarrolló la presente antología de Comprensión Lectora para quinto semestre, con el propósito de disponer de un complemento didáctico que apoye a sus estudiantes en el manejo de una serie de producciones escritas a los que se enfrentan durante su formación académica y su práctica en distintos ámbitos de la sociedad.

Importancia de la comprensión lectora

La lectura tiene una gran importancia en el proceso de desarrollo y maduración de los niños y en el logro de aprendizajes significativos en los jóvenes y en los adultos. La relación que existe entre comprensión lectora y rendimiento escolar es imperativa.

El potencial formativo de la comprensión lectora va más allá del éxito en los estudios; la lectura proporciona cultura, desarrolla el sentido estético, actúa sobre la formación de la personalidad y es fuente de recreación y gozo. La comprensión lectora constituye un vehículo para el aprendizaje, para el desarrollo de la inteligencia y la imaginación, para la adquisición de cultura y para la educación. Sin duda uno de los problemas que más preocupa a los profesores de cualquier nivel es el de la comprensión lectora; frecuentemente se preguntan cómo enseñar a los alumnos a comprender lo que leen.

¿Por qué realizar una lectura comprensiva?

Leer comprensivamente es indispensable para el estudiante. Esto es algo que él mismo va descubriendo a medida que avanza en sus estudios. En el nivel primario y en menor medida en el nivel medio, a veces alcanza con una comprensión mínima y una buena memoria para lograr altas calificaciones. Pero no debemos engañarnos, a medida que accedemos al estudio de temáticas más complejas, una buena memoria no basta; de ahí la importancia que los estudiantes estén conscientes de estas habilidades, de su desarrollo, así como la implementación de ellas para su vida como educandos y futuros profesionales.

ORIENTACIONES METODOLÓGICAS

Este cuaderno de trabajo ha sido diseñado con la finalidad de que los alumnos procesen la información y desarrollen ejercicios y actividades contenidas en cada uno de los temas, de manera individual y/o grupal, empleando una hora a la semana. Sin embargo, **la antología es una base** para ello, por lo que **será de gran apoyo la información, actividades de enseñanza-aprendizaje y retroalimentación** que puedan obtener del maestro que les imparte este curso. **Se sugiere incorporar actividades o temas** que se crean pertinentes, de acuerdo a las necesidades del grupo.

Se propone a los docentes que atiendan a las siguientes orientaciones metodológicas, para apoyar muy comprometidamente a sus alumnos, de modo que este recurso didáctico les pueda servir como una herramienta de fortalecimiento y mejora, en todas las asignaturas y extenderlo a su diario vivir.

En un primer momento, acompañar a los alumnos en la lectura de la presentación y organización del cuaderno de trabajo. Identificar y comentar con ellos los temas específicos que han sido desarrollados; esto se puede hacer de manera grupal en un espacio de clase.

Previo al estudio de un tema: presentar la situación planteada en la introducción, con la intención de generar una activación cognitiva en los alumnos en relación con la temática a estudiar.

Orientar la atención de los estudiantes sobre los aspectos del tema en los que deberán poner especial cuidado al momento de procesar la información y realizar los ejercicios y actividades planteadas; se recomienda que esto se realice al finalizar una clase.

Posterior al estudio de un tema (al final de la clase): retroalimentar el aprendizaje de los alumnos mediante una actividad grupal en la que hagan una recapitulación breve sobre el desarrollo de los ejercicios y las soluciones de cada uno de ellos, con la finalidad de socializar el aprendizaje individual de los jóvenes y resolver las dudas que se presenten.

Esperamos que estas orientaciones sean de utilidad para lograr el fortalecimiento de los temas que contiene el cuaderno de trabajo y generar la adquisición de los aprendizajes esperado.

LECTURA 1. Secuelas del COVID: lo que (aún no) sabemos

SECUELAS del COVID: lo que (aún no) sabemos

Por **Carol Perelman**
Ilustraciones **Adrián Pérez Acosta**

No ha pasado tiempo suficiente para caracterizar y entender los trastornos que padecen algunas personas después del COVID-19. He aquí el panorama que empieza a perfilarse

En el segundo acto de *Romeo y Julieta*, cuando la joven enamorada argumenta que poco importa que su amado Romeo sea de una familia rival, William Shakespeare pone en su boca una de las frases más famosas de esa obra de teatro: "¿Qué hay en un nombre? Lo que llamamos rosa por cualquier otro nombre olería igual."

Esta célebre frase generalmente se interpreta así: la esencia de una cosa no cambia, independientemente del nombre que elijamos para identificarla. En la metáfora de Julieta, el nombre arbitrario es "rosa", y la esencia —lo verdaderamente importante— es su aroma. Este artículo se trata de un trastorno de la salud que, sorprendentemente, todavía carece de nombre oficial, y cuya esencia es una amplia gama de síntomas que quedan como secuela de una infección. Sin duda es urgente

SÍNTOMAS DE COVID PERSISTENTE POR ÓRGANOS Y SISTEMAS

	Síntomas	Patología
SISTEMA NEUROLÓGICO		
	Deterioro cognitivo Fatiga Trastornos de sueño Pérdida de memoria Tinnitus	Disautonomía Encefalomielitis miálgica/ Síndrome de fatiga crónica (EM/SFC) Neuroinflamación Reducción en el flujo sanguíneo al cerebro Neuropatía de fibras pequeñas
CORAZÓN		
	Dolor de pecho Palpitaciones	Disfunción cardiaca Inflamación del miocardio Síndrome de taquicardia postural ortostática (POTS)
PULMONES		
	Tos Disnea (dificultad para respirar)	Intercambio anormal de gases
SISTEMA INMUNITARIO		
		Enfermedades autoinmunitarias Síndrome de activación mastocitaria
PÁNCREAS		
		Diabetes Lesiones del páncreas
SISTEMA GASTROINTESTINAL		
	Dolor abdominal Náuseas	Disbiosis Persistencia viral y reservorios virales
RIÑONES, BAZO E HÍGADO		
		Lesiones a los órganos
VASOS SANGUÍNEOS		
	Fatiga	Coagulopatía Trombosis venosa profunda Disfunción endotelial Microangiopatía Microcoágulos Embolia pulmonar Infartos
SISTEMA REPRODUCTIVO		
	Disfunción eréctil Aumento en la severidad y la cantidad de síntomas premenstruales Menstruación irregular	Reducción en el conteo de esperma

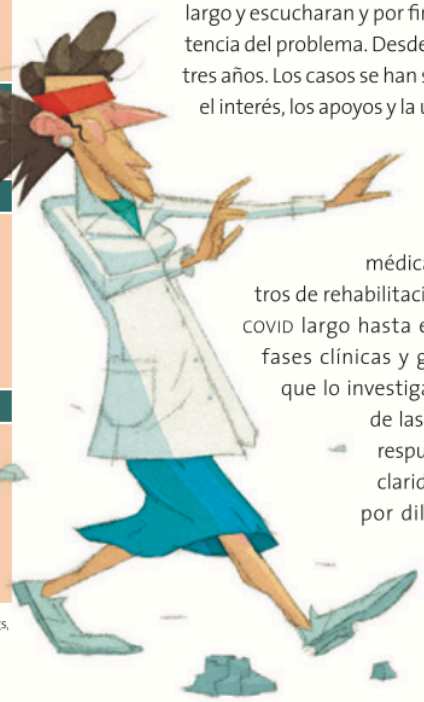
Fuente: Hanna E. Davis, Lisa McCorkell, Julia Moore Vogel y Eric J. Topol, "Long COVID: major findings, mechanisms and recommendations", *Nature Reviews Microbiology*, núm. 21, pp. 133-146, 2023.

asignarle nombre a la condición que aquí llamaré "COVID largo", pero también se la conoce como "COVID persistente", "síndrome postCOVID" y "secuelas agudas postCOVID", entre otros. Igual que la metáfora de Julieta, el COVID largo también aparece en el segundo acto, y la condición que describe, por cualquier otro nombre, *d*olería igual.

#¡aiura!

La primera en alzar la voz y ponerle nombre a lo desconocido fue la arqueóloga inglesa Elisa Perego, quien usó el *hashtag* #LongCOVID para designar esas molestias que no desaparecían luego de la supuesta recuperación. Esto fue el 20 de mayo de 2020, cuando el mundo estaba hipnotizado por las dramáticas escenas de hospitales saturados y de personal de salud preocupado por la escasez de insumos médicos y la incertidumbre en medio del caos. Con una situación tan apremiante, se prestó poca atención a quienes se habían recuperado de la enfermedad. Estas personas trataban de decirnos algo: no estaban bien. Pero no parecía urgente. Aparentemente su vida ya no corría peligro, así que pocos les hacían algo de caso. Estos pacientes empezaron a formar grupos y a compartir experiencias y recomendaciones en redes sociales. A partir del tuit de Perego, que en menos de 280 caracteres expuso el silencioso sufrimiento de tantos, la avalancha de súplicas comenzó a emerger. Ese año sólo en el Reino Unido se contabilizaron 1.4 millones de *posts* que usaron el nuevo *hashtag* en múltiples redes sociales.

Tuvieron que pasar algunos meses para que instancias como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Centro para Control y Prevención de Enfermedades de Estados Unidos (CDC) prestaran atención, abrieran foros de personas con COVID largo y escucharan y por fin reconocieran la existencia del problema. Desde entonces han pasado tres años. Los casos se han sumado, pero también el interés, los apoyos y la urgencia de abordarlos desde distintos ángulos. Ya existen esfuerzos concretos, que van desde guías médicas preliminares y centros de rehabilitación para el manejo del COVID largo hasta estudios en distintas fases clínicas y grupos de científicos que lo investigan. Si bien la mayoría de las preguntas siguen sin respuestas, tenemos mayor claridad sobre lo que falta por dilucidar. Como dijo el filósofo chino Confucio, "el verdadero conocimiento es saber lo que sabemos



Ante esta situación, pacientes y personal de salud a veces se ven reducidos a la frustración.

Enfermedad multisistémica

Uno de los principales malentendidos en torno al COVID-19 fue pensar que era una enfermedad respiratoria. Nada más alejado de la realidad. El virus que causa el COVID-19 se propaga por vía aérea, quizá de ahí la confusión. Pero la enfermedad en sí es multisistémica: es decir, puede afectar cualquier parte del cuerpo, debido a que el virus SARS-CoV-2 infecta nuestras células usando los llamados receptores ACE2, unas proteínas que están presentes en prácticamente todos los tejidos. Por eso en las autopsias a personas que fallecieron por COVID-19 se han hallado restos virales por todo el organismo. En consecuencia, no debería ser sorpresa que las secuelas sigan un patrón similar y se presenten también en muchos órganos, lo que exige la colaboración de equipos multidisciplinarios para tratarlas. Sin embargo, aún no es fácil que una persona con síntomas compatibles con COVID largo acuda a centros especializados que consideren la complejidad del trastorno de manera integral.

Algunos de los síntomas reportados, enumerados de mayor a menor frecuencia, son: cansancio, dolor de cabeza, trastornos de la atención, pérdida de cabello, dificultad para respirar, falta de sentido del gusto y del olfato, dolor en las articulaciones, tos, sudoración, mareo y náuseas. También se reportan pérdida de la memoria, contracturas musculares, pérdida del oído, ansiedad, depresión y trastornos digestivos. La lista sigue. Llama la atención el hecho de que, aunque los niños y adolescentes tienen menos probabilidades de padecer COVID largo, en estas poblaciones predominan los síntomas psiquiátricos y neurológicos: pérdida de memoria, falta de concentración, trastornos del sueño, cambios del estado de ánimo y pérdidas cognitivas. Cada caso de COVID largo es diferente, un rompecabezas conformado por múltiples piezas de distintas formas, gravedades y tamaños, que hoy está lejos de poderse ensamblar.

> Cada caso de COVID largo es diferente, un rompecabezas conformado por múltiples piezas de distintas formas, gravedades y tamaño

Afortunadamente, para resolver estos enigmas no partimos de cero. Algunos de los síntomas de COVID largo se parecen a trastornos como la encefalomielitis miálgica, el síndrome de fatiga crónica, el malestar postesfuerzo y otros que se han descrito como secuelas de infecciones virales como Zika, chikungunya, ébola, SARS, MERS, así como de algunas no virales, tales como giardiasis, coxiella y borelia (Lyme). Quizá estudiando el COVID largo entenderemos mejor otros trastornos que antes de la pandemia pasaban casi inadvertidos, un posible efecto positivo de esta tupida maraña.

Más incógnitas

Uno de los vacíos a entender es la causa de estas secuelas: qué sucede durante la invasión del virus que detona (o no) la kilométrica y heterogénea compilación de síntomas y signos. Los expertos han propuesto varias hipótesis sobre la posible fisiopatología del COVID largo y sugieren que no necesariamente hay una sola causa, sino que quizá se empalman varios mecanismos. Por lo pronto, se sugieren como causas: que el virus SARS-CoV-2, o sus remanentes, permanece en ciertas zonas del organismo, causando inflamación crónica; un desequilibrio inmunitario, que incluye hiperinmunidad (una reacción exagerada del sistema inmunitario) e autoinmunidad (cuando el sistema inmunitario ataca nuestro propio cuerpo); la reactivación de patógenos que ya estaban en el cuerpo, como varios virus de la familia del herpes; cambios metabólicos; desregulación de la microbiota; disrupción de la señal nerviosa, y microcoágulos. Los estudios aún están en fases tempranas, por lo que lo único seguro es que todavía no hay veredicto.

Fco. Canal 1241 altos 3, Col. Centro, C.P. 91700, Veracruz, Ver. Tel. (229) 9.31.28.38
30FOC0003L@mediasuperior.msev.gob.mx

Otro de los elementos a esclarecer son los factores que pueden incrementar el riesgo de desarrollar COVID largo. Hay estudios que sugieren que ciertas condiciones previas podrían predisponerte a desarrollarlo; por ejemplo, la diabetes tipo 2, la obesidad, los trastornos de hiperactividad y déficit de atención y la rinitis alérgica. Sin embargo, estas condiciones no bastan para desarrollar secuelas. Por si fuera poco, un tercio de las personas con COVID largo no tiene ninguna precondición identificada. Así que debe haber algo más.

Cuando hablamos de tiempo, el COVID largo nos demuestra que éste es relativo y que a cada quien le va distinto en esta feria. Los síntomas neurológicos pueden tardar un par de semanas en presentarse y pueden irse agravando con el tiempo, mientras que otros síntomas, como la falta de gusto o de olfato, persisten desde el COVID-19 agudo y luego mejoran. Unos más, como los síntomas gastrointestinales y respiratorios y la caída de cabello, tienden a autolimitarse y a desaparecer a los pocos meses. En cambio, los dolores de articulaciones y musculares, el hormigueo y la visión borrosa son comunes incluso 12 y hasta 18 meses después de la infección. Aún no podemos saber si otros, como la diabetes, la fibrosis pulmonar y la insuficiencia renal, son para toda la vida. Y aunque sería irresponsable especular sobre las consecuencias de las secuelas a largo plazo, cabe señalar que los autores han encontrado daños celulares, y no descartan una futura asociación con cánceres o enfermedades neurodegenerativas. Llama la atención que a fines de 2022 el CDC reportó que se tenían confirmadas al menos 3 500 muertes en Estados Unidos por COVID largo. Los estudios retrospectivos concluyen que cada vez que te enfermas de COVID se va mermando el estado de salud. Así que a cuidarnos.

Anhelos

Uno de los mayores anhelos de la investigación sobre COVID largo y otras enfermedades complejas es encontrar moléculas, quizás en la sangre, llamadas biomarcadores, que pudieran servir como indicadores de COVID largo fácilmente medibles. Se han detectado algunos indicios, como la disminución de una hormona llamada cortisol, la elevación de unas sustancias llamadas anticuerpos antinucleares y de otras conocidas como marcadores de inflamación, así como de moléculas que producen algunas células del sistema inmunitario llamadas citosinas. Pero aún no hay nada concluyente. Curiosamente, se ha reportado de perros que pueden identificar a pacientes con COVID largo al oler su sudor. Los perros estaban entrenados para detectar la presencia del virus SARS-CoV-2, lo que sugiere que el propio virus podría seguir presente en los pacientes de COVID largo.

A pesar de todo esto, "la condición" aún no tiene un nombre reconocido universalmente. Aunque a mí me parece un triunfo que la mayoría de las personas nos refiramos a ella con el nombre propuesto por los propios pacientes: COVID largo.

Finalmente el drama shakespeariano tiene un desenlace que quienes conocen la obra saben que emana de una tremenda falta de información entre los personajes principales: los sujetos confían en suposiciones y toman decisiones que acaban en tragedia. Esperemos que contrastando la turbulencia entre Capuletos y Montescos con la condición de COVID largo que afecta a niños, jóvenes y adultos obtengamos oportunamente información útil y resolvamos pronto los vacíos aún pendientes para ayudar a las muchas personas que viven todos los días con las secuelas.

- Chávez, Perla, "El *long* COVID sigue siendo un misterio", *Gaceta* UNAM, 27 de febrero de 2023, en: www.gaceta.unam.mx/el-long-COVID-sigue-siendo-un-misterio/.
- Doddoli, Consuelo, "Si ya no tengo la infección del coronavirus ¿por qué me siento mal? Podría ser COVID largo", Ciencia UNAM, 25 de marzo de 2022, en: https://ciencia.unam.mx/leer/1244/coronavirus-si-ya-no-tengo-la-infeccion-por-que-me-siento-mal-podria-ser-COVID-largo-.

Carol Perelman es química farmacéutica bióloga por la UNAM, directora del jardín Weizmann de Ciencias, promotora de los jardines de ciencia, investigadora, conferencista y divulgadora y colaboradora de distintos medios de comunicación. Es miembro de la Red Mexicana de Periodistas de Ciencia y de la Sociedad Mexicana para la Divulgación de la Ciencia y la Técnica.

LECTURA 2. Agua en marte

| Alberto Flandes |

su búsqueda, en especial en forma líquida, es lo que ha alentado las recientes misiones espaciales. Y no solo por su relación con la vida, sino con vistas a una potencial colonización y explotación del planeta rojo.

Marinero, Vikingo, Fénix, Observador, Odisea, Oportunidad y Perseverancia son algunos de los nombres en español de las más de 60 misiones espaciales que se han dedicado al estudio del planeta Marte. Y tan solo en 2020 partieron cuatro nuevas misiones. Desde los inicios de la exploración espacial el interés en Marte se ha enfocado en descubrir si hay o hubo vida ahí. Hoy el interés se concentra cada vez más en la búsqueda de agua, sobre todo agua líquida. Y no solo por su relación con la vida, sino con vistas a una potencial colonización y explotación, para lo que también serían importantes otros recursos minerales de Marte.

¡Agua a la vista!

Sabemos que hay agua en los polos, en la atmósfera y en el suelo de Marte. Sus dos polos están cubiertos por capas de hielo de agua de entre dos y tres kilómetros de profundidad. El casquete polar norte tiene unos 1 000 kilómetros de diámetro en su parte más extensa y el casquete sur unos 400. Como la atmósfera de Marte es de dióxido de carbono (CO_2) en más de 95 %, el hielo de los polos se cubre también de una capa de pocos metros de hielo seco (CO_2 sólido) cuando el dióxido de carbono se cristaliza y se precipita sobre la superficie en invierno para sublimarse y volver a la atmósfera en verano. En el polo sur esta capa extra mantiene un grosor de al menos ocho metros todo el año, pero en el polo norte es solo estacional.

Si comparamos todo el hielo de agua de los casquetes polares de Marte con el de los polos de la Tierra, veríamos que es apenas 10 % del volumen de hielo de nuestro polo sur. Sin embargo, no solo hay hielo en los polos

marcianos: al menos una buena parte del suelo parece estar impregnada de agua en una mezcla congelada que se conoce como *permafrost* (véase *¿Cómo ves?* Núm. 179).

Lluvia de neutrones

A finales de los años 70, con los datos recolectados por la misión *Viking*, se estimó que el grosor de la capa de permafrost en Marte era de entre tres y cinco kilómetros en el ecuador y de más de ocho en los polos, lo cual es casi el triple del grosor de la capa de permafrost de los polos de la Tierra. Algunos estudios recientes apoyan parte de las estimaciones de esa misión. Este es el caso de las mediciones de neutrones de baja energía del monitor MONS del orbitador *Mars Odyssey* de la NASA, hechas a lo largo de 18 años. Estos neutrones provienen de la lluvia de rayos cósmicos que inciden continuamente en la superficie de Marte, que es un planeta que no tiene campo magnético que lo proteja y cuya atmósfera es muy tenue. En contraste, la Tierra sí tiene un campo magnético que desvía parte de estos rayos y su atmósfera es suficientemente densa para evitar que lleguen directamente hasta la superficie.

Los rayos cósmicos son partículas de altas energías que se originan en las profundidades de la galaxia en fenómenos violentos como el colapso o la explosión de una estrella. Estos rayos viajan por toda la galaxia, de modo que están presentes continuamente en el Sistema Solar. Cuando los rayos cósmicos entran en contacto con las moléculas y los átomos de la superficie de Marte, les transfieren tanta energía que los rompen y generan muchas partículas secundarias, entre ellas estos neutrones. Inicialmente se producen neutrones rápidos que penetran la superficie.

Estos neutrones van chocando con otros átomos y produciendo más neutrones, así como rayos gamma. Los neutrones perderán más o menos energía en este proceso dependiendo del tipo de átomos con los que tengan contacto. Si chocan con átomos pesados perderán poca energía, como si fueran pelotas rebotando en una pared. Pero si chocan con átomos de hidrógeno o con protones, que tienen masas similares a ellos, pueden perder cerca de la mitad de su energía.

Parte de estos neutrones terminarán siendo absorbidos por la superficie y el resto escapará al exterior. Los neutrones que se fugan de la superficie (llamados *neutrones térmicos*) son los que detecta el monitor MONS. Las zonas de la superficie marciana que producen más neutrones térmicos son aquellas donde hay más átomos de hidrógeno, o sea, donde hay agua, porque cada molécula de agua contiene dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. La importancia del análisis de los datos del detector MONS, realizado por investigadores del Instituto de Ciencias Planetarias de Arizona y del Observatorio de Tolosa, Francia, es que muestra que hay agua en extensas zonas no polares de Marte, como se infería de las mediciones de la misión *Viking*. Además podemos afirmar que esta agua es parte del permafrost debido a que es muy superficial, pues la producción de neutrones solo sucede en los dos primeros metros de profundidad.

Lagos subterráneos

Todo el hielo superficial de Marte podría ser apenas una pequeña fracción de la cantidad total. Debajo de la superficie no solo podríamos encontrar mucho más hielo, sino también agua líquida. Parece haber evidencias de agua líquida de acuerdo con las observaciones del radar MARSIS del orbitador europeo *Mars Express*, así como con observaciones aportadas por instrumentos de varias naves a lo largo de 12 años. El equipo que analizó estos datos pudo obtener 29 imágenes de radar tomadas entre 2012 y 2015 de zonas a 1.5 kilómetros por debajo del polo sur marciano en las que se distingue un lago de agua salada de unos 20 kilómetros de extensión. Las imágenes de radar pueden compararse con las imágenes que se obtienen en los estudios médicos de ultrasonido.

Aunque el radar no utiliza sonido sino ondas electromagnéticas, el principio es el mismo, pues se evalúa cómo se reflejan las ondas en diferentes materiales. Por ejemplo, se miden los tiempos de reflexión y con estos se construyen gráficas llamadas *radargramas* similares a una ecografía. En los radargramas del polo sur se ven zonas muy reflejantes, que coinciden con

cuerpos de agua que actúan casi como espejos de las ondas del radar. Estas zonas de reflexión intensa están bien delimitadas por áreas mucho menos reflejantes que perfilan con claridad los límites de este aparente lago subterráneo. Una hipótesis es que esta agua líquida no se debe a la fusión de las capas profundas de hielo del polo, sino que tiene un origen distinto. Si esta hipótesis es correcta, implicaría que podrían existir más depósitos de este tipo en otras latitudes de Marte.

Campos de moras

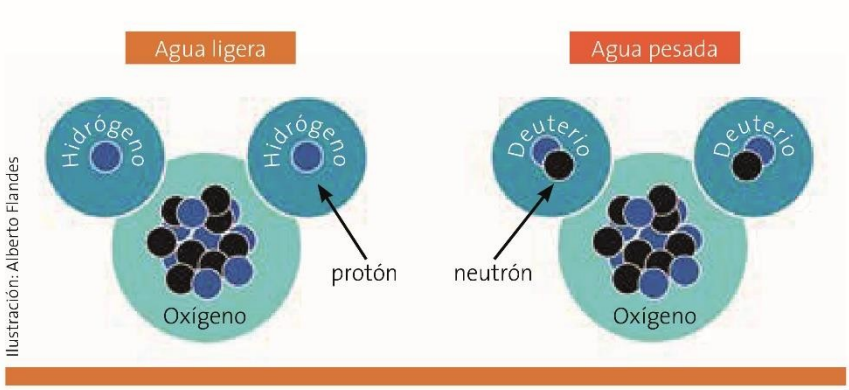
Es difícil que el agua se mantenga en estado líquido en la superficie de Marte, primero porque la presión atmosférica superficial ahí es 100 veces más baja que en la Tierra y segundo, porque la temperatura promedio es de menos de 60° C bajo cero (únicamente en el ecuador y en verano la temperatura puede llegar a los 35° C). En este ambiente podría parecer sorprendente que el terreno marciano muestre huellas de agua líquida. Un ejemplo muy particular de esto son los “campos de moras”, descubiertos en 2004 por el vehículo *Opportunity* poco después de su llegada a Marte en una región cercana al ecuador marciano llamada Meridiani Planum. Lo que se pudo ver en las imágenes del *Opportunity* es que esta planicie está parcialmente cubierta de esferitas de entre uno y tres centímetros de diámetro (y algunas de fracciones de milímetro) compuestas básicamente de un tipo de óxido de hierro llamado *hematita*, muy común en la superficie de Marte. Aunque estas esferas son realmente cafés, en las fotografías de color falso que inicialmente se distribuyeron se veían azuladas, por lo que se les llamó moras azules (o *blueberries* en inglés). En la Tierra se pueden encontrar esferas parecidas en Mongolia y en Utah, Estados Unidos, aunque de composición algo distinta y mucho más grandes.

Las moras terrestres tienen núcleos de calcita, que es un tipo de carbonato de calcio, y se asocian a antiguos procesos hidrológicos. A pesar de las diferencias, se cree que las moras marcianas tienen un origen similar a las terrestres y pudieron haber sido producidas por agua líquida ligeramente ácida que erosionó el suelo con alto contenido de fierro por donde corría en alguna etapa de la historia de Marte. Las moras no son la única evidencia del agua líquida que alguna vez fluyó en Marte. Algunos geólogos afirman que en el paisaje marciano también pueden distinguirse huellas de lagos y costas de playa, deltas de ríos e incluso evidencias de tsunamis.

¿Adónde se fue el agua?

Aunque pueda parecer extraño, el estado actual de la atmósfera marciana también parece apoyar las evidencias geológicas que indican quealguna vez fluyó agua en la superficie de Marte,porque en las pequeñas cantidades de vapor de agua que contiene se mide proporcionalmente mucho más deuterio que en el agua de los océanos de la Tierra. Un núcleo de deuterio es launión de un protón y un neutrón. Dos átomos dedeuterio (que es como un hidrógeno pesado) forman una variedad pesada de agua cuando se unen a un átomo de oxígeno.

Cada molécula de agua pesada es 11 % más pesada y también más densa que una molécula de agua ligera por sus dos neutrones extras, que además fortalecen los enlaces de la molécula. Toda el agua contiene proporciones variables de agua pesada. En los océanos de la Tierra hay un átomo de deuterio por cada 5 000 de hidrógeno. Esta proporción ha variado a lo largo de la historia del planeta, en particular porque algunas moléculas de agua



han sido destruidas, por ejemplo, por la radiación ultravioleta, y sistemáticamente se han perdido átomos de hidrógeno. La proporción entre el agua pesada y el agua ligera se representa como el cociente D/H (o deuterio-hidrógeno), que es una medida muy usada para evaluar los cambios que ha sufrido el agua a través del tiempo en los cuerpos planetarios. La idea de fondo es que todos los cuerpos del Sistema Solar primitivo se formaron a partir de la misma nube de material y por lo tanto el agua; en todos tenía inicialmente el mismo cociente D/H, equivalente a un átomo de deuterio por cada 50 000 átomos de hidrógeno. El cociente D/H actual de los océanos de la Tierra es 10 veces mayor y el del vapor de agua de la atmósfera de Marte es 80 veces mayor de acuerdo con las observaciones de los telescopios del Observatorio Mauna Kea, en Hawái. Estas diferencias, tanto en la Tierra como en Marte, nos llevan a deducir que ambos planetas han perdido cantidades importantes de agua, aunque Marte mucho más.

El grupo del Centro Espacial Goddard de la NASA que hizo este descubrimiento calcula que el volumen de agua que se perdió en Marte es equivalente a un océano de 137 metros de profundidad, con una extensión equivalente a casi 19 % de la superficie marciana. Este océano probablemente habría existido hace más de 4 000 millones de años en una etapa de la historia de Marte que se denomina el Noeico y se habría ubicado en el hemisferio norte marciano, donde el terreno es más bajo. Es difícil no preguntarse adónde se fue toda esa agua. Lo que haya sucedido debe haber sido un acontecimiento catastrófico que también eliminó gran parte de la atmósfera.

Torres de polvo

Como primera idea se planteaba la posibilidad de que el agua de los océanos marcianos se hubiera evaporado. Ya en la atmósfera, la intensa radiación ultravioleta habría roto las moléculas de agua y permitido que los átomos de hidrógeno escaparan del planeta ayudados por el viento solar, que al mismo tiempo pudo haber barrido con gran parte de la atmósfera marciana. El viento solar es la corriente continua de protones (o núcleos de hidrógeno) y electrones expulsados por el Sol que se mueven a cientos y hasta a miles de kilómetros por segundo entre los planetas. Es probable que solo parte del agua se haya perdido de esta forma, y quizá no todo un océano.

Pequeñas esferas de hematita en la superficie de Marte vistas por *Opportunity* en abril de 2004.
Imagen: NASA/JPL-Caltech/Cornell/USGS

Las nuevas observaciones plantean otros mecanismos similares de pérdida de agua que resultan espectaculares. Por ejemplo, recientemente unos investigadores de la Universidad de Hampton, del Instituto de Ciencias Espaciales de Boulder y del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA propusieron que actualmente Marte pierde agua por torres de polvo, que se generan a partir de nubes y tormentas. Estas últimas son muy comunes en Marte, ocurren como consecuencia de la aridez de la superficie y se alimentan del calor del Sol, que ayudaba que se formen celdas de convección similares a las corrientes que se forman en una olla de agua hirviendo. Las tormentas levantan y distribuyen el polvo por todo el planeta y forman torbellinos de diferentes tamaños acompañados de relámpagos debidos a la acumulación de carga eléctrica producida por la fricción entre los granos de polvo. Al parecer las tormentas aumentan de intensidad en periodos de unos 10 años y se convierten en torres de polvo de hasta cientos de kilómetros y visibles desde la Tierra con telescopio. Las torres no solo succionan el polvo de la superficie, también succionan la humedad del suelo y pueden llevarla por encima de los 80 kilómetros de altura donde la radiación ultravioleta rompe las moléculas de agua y permite que los átomos de hidrógeno que las componían escapen del planeta. Sin embargo, la pérdida de agua por este mecanismo es muy pequeña en el árido Marte actual.

Agua secuestrada

Pero los estudios apoyan cada vez más la idea de que muy poco del agua que tuvo Marte se perdió y que en realidad la mayor parte fue absorbida por las rocas de la corteza y sigue ahí atrapada. Esta agua se incorporó a la roca de modo que para extraerla sería necesario calentar enormes volúmenes de roca de la corteza para extraer cantidades apreciables de agua, lo que sería muy impráctico para los futuros exploradores de Marte. Las nuevas misiones robóticas como *Mars 2020* de la NASA o *Tianwen-1* de la Agencia Espacial China contribuirán aún más a nuestra comprensión de Marte y ayudarán a confirmar algunas de las hipótesis que aquí he presentado. Pero para muchas investigaciones sería mejor mandar gente que lleve a cabo mediciones directas del terreno y de la atmósfera de Marte.

Las misiones tripuladas son un objetivo fundamental de agencias espaciales gubernamentales y compañías privadas. Sin embargo, un viaje a Marte requiere la construcción de una infraestructura compleja (véanse *¿Cómo ves?* Núms. 227 y 265). En 2020 la NASA anunció que las compañías privadas Blue Origin, Space X, Dynetics y Northrop Grumman proveerán la tecnología, el desarrollo y la construcción de las diferentes etapas de la próxima misión lunar Artemisa, que se espera ponga a la primera mujer en la Luna y sea también el preámbulo de una misión tripulada a Marte. Eso sí: llevar humanos a Marte no será una tarea fácil.

In memoriam

El pasado 5 de abril, el vehículo explorador *Curiosity* tomó en Marte esta imagen de la "Montaña Rafael Navarro" llamada así en honor al astrobiólogo mexicano Rafael Navarro González (1959-2021), quien trabajaba en esta misión de la NASA y ayudó a desarrollar un laboratorio portátil para analizar la química de las rocas, suelos y aire del espacio. Rafael era biólogo por la UNAM, con doctorado en química y trabajaba en el Laboratorio de Plasmas y Estudios Planetarios del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM. Entre sus mayores contribuciones está la detección de compuestos orgánicos en ambientes terrestres semejantes a Marte (véase *¿Cómo ves?* Núm. 121).

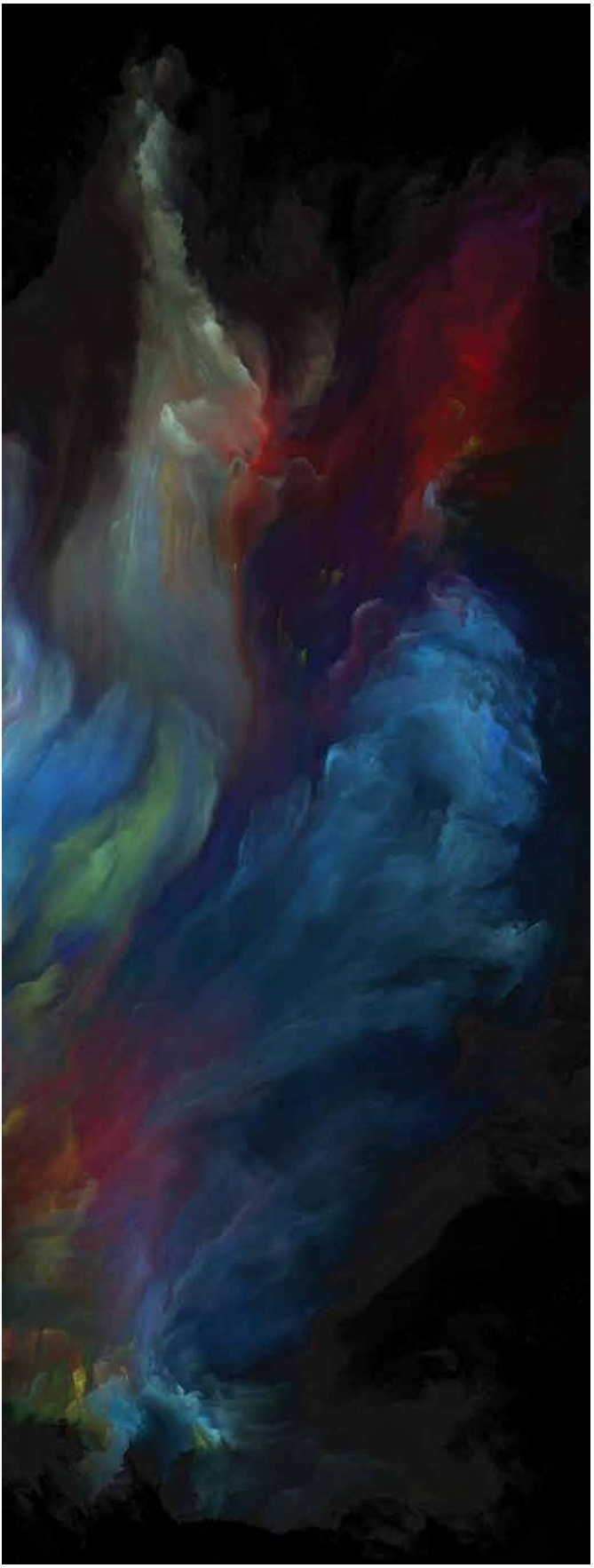
o NASA Ciencia, Space Place, *¿Por qué nos importa si Marte tiene agua?*: https://spaceplace.nasa.gov/water-on-mars/sp/
o O'Callaghan, Jonathan, "El agua de Marte podría estar atrapada en su corteza", Investigación y Ciencia: www.investigacionyciencia.es
o UNAM Global, Dr. Rafael Navarro, "Agua líquida en Marte abre posibilidad de vida microbiana": www.youtube.com/watch?v=DmxlEB0a-Mw

Alberto Flandes, frecuente colaborador de *¿Cómo ves?*, es investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México y ha participado en las misiones *Rosetta* y *Cassini*. Este artículo fue posible gracias al apoyo de PAPIIT

IN104721.

LECTURA 3.La mente errante

| Giovanni Benigno y Roberto Oropeza Tena |

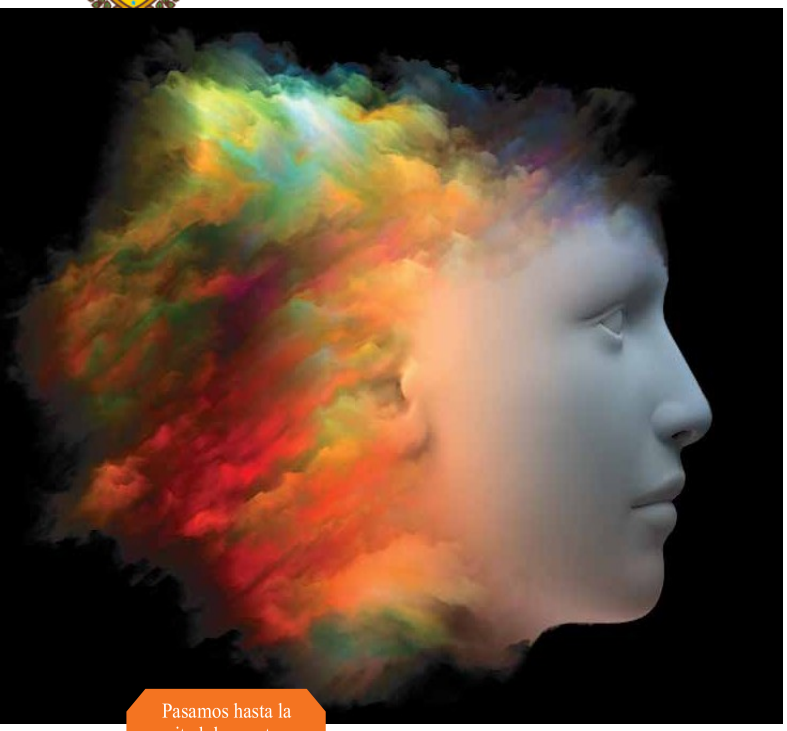


Nuestra mente es capaz de remontarse al pasado y anticiparseal futuro. Esto es una ventaja que la evolución le ha dadoal ser humano, pero excederse en estos viajes mentales tieneun costo emocional.

Vas conduciendo por una de las avenidas más concurridas de tu ciudad y de pronto te das cuenta de que no sabes en qué momento avanzaste tanto en tu trayecto y que te embotellastemás en tus pensamientos que en el tráfico. ¿Te suena conocido?

Allá por el año 2010 un par de investigadores llamados Matthew Killingsworth y Daniel Gilbert, de la Universidad de Harvard, llegaron a la conclusión de que pasamos entre un 25 y 50 % de nuestras horas de vigilia anclados en pensamientos que nada tienen que ver con el aquí y el ahora. Essorprendente que entre un cuarto y la mitad de nuestra vida diaria la experiencia del mundo no esté relacionada con el momento presente. Constantemente estamos fluyendo entre pensamientos que proceden de nuestro mundo interno y del mundo exterior.

Killingsworth y Gilbert llegaron a esta conclusión en 2010 empleando un método experimentalen la neurociencia cognitiva llamado muestreo deexperiencias, que consiste en pedirles a los participantes que informen en tiempo real sobre sus experiencias internas (pensamientos, emociones, percepciones) durante un tiempo determinado. Para ponerlo en práctica, los investigadores tenían que monitorear varias veces al día los pensamientos de más de 2 000 personas. Killingsworth yGilbert desarrollaron una aplicación para teléfonos inteligentes especialmente para el proyecto. La



Pasamos hasta la mitad de nuestras horas de vigilia anclados en pensamientos que nada tienen que ver con el aquíy el ahora; estudios han mostrado que una menteque divaga mucho no es una

aplicación enviaba aleatoriamente recordatorios durante el día a los participantes para animarlos a registrar sus pensamientos, emociones y comportamientos referentes a sus actividades diarias. Los investigadores obtuvieron así una base de datos decerca de 250 000 registros de experiencias.

Killingsworth y Gilbert emprendieron este proyecto con la intención de estudiar la felicidad (véase ¿Cómo ves?, Núm. 279). Como señalan en un artículo publicado en la revista Science en 2010, muchas tradiciones filosóficas y religiosas enseñan que la felicidad se puede encontrar viviendo en el momento, por lo que los adeptos de esas tradiciones aprenden a combatir la divagación mental y situarse en el aquíy ahora. Aunque, sin duda, la capacidad de abstraersey pensar en otras cosas se puede considerar unaventaja evolutiva que nos permite a los humanos aprender, razonar y planear, podría tener, además,un costo emocional que no puede pasarse por alto.

Máquina del tiempo mental

Los viajes a través del tiempo y del espacio han fascinado por décadas a la humanidad. Múltiples películas y series de ciencia ficción han inspiradoeste tema aún desconocido para nuestras capacidades intelectuales y tecnológicas. Uno de los ejemplos más conocidos de ficciones sobre viajes en el tiempo lo podemos encontrar en Doctor Who, una serie de culto británica estrenada en 1963.

En la década de 1960 la BBC, principal cadena de radio y televisión pública en el Reino Unido, emitió el primer capítulo de una serie cuyo protagonista, un alienígena con dos corazones y formahumana llamado "El Doctor", viaja constantementeal pasado y al futuro a bordo de su máquina del tiempo, una cabina telefónica mejor conocida como Tardis.

Las máquinas del tiempo no existen y posiblemente nunca existirán. Sin embargo, todos llevamos en la cabeza nuestra Tardis personal que nospermite desplazarnos por el tiempo. Suena extraño,pero recorrer el tiempo es una de las funciones favoritas de la mente.

Sin entrar en detalles sobre lo que es una mente,pues seguramente nos llevaría varias páginas y llegaríamos a muy pocas conclusiones, adentrémonos en un concepto que ha sido explorado por neurocientíficos cognitivos como el canadiense de origenestonio Endel Tulving: la cronestesia.

La cronestesia puede entenderse como la capacidad de reconstruir mentalmente acontecimientospersonales que ocurrieron en el pasado, así como imaginar qué nos depara el futuro. En palabras llanas, se trata de un viaje mental por el tiempo.

¿Qué tienen que ver los viajes en el tiempo de nuestra mente con la divagación y la felicidad? Pues bien, se ha encontrado que las divagaciones mentales con una tendencia muy fuerte a regresar al pasado se asocian con estados de ánimo depresivos y que, por el contrario, cuando divagamos sobre el futuro nuestro estado de ánimo puede mejorar notablemente. De modo que el viaje mentalen el tiempo trae una buena carga emocional queinfluirá en tu percepción del mundo y en tus actividades cotidianas.

Estación: Pandemia

Hablar de cambios súbitos en el estado de ánimo yestar constantemente repasando cosas del pasadoy planeando algunas otras del futuro inevitablemente nos lleva al tema de salud pública, que ha estado presente en nuestras vidas por más tiempo del que nos gustaría debido a la pandemia de COVID-19. Como civilización, hemos tenido que recurrir a la memoria y a los registros históricos para conocery mejorar las estrategias que en el pasado nos sirvieron para enfrentar otras pandemias. Asimismo, hemos tenido que echar mano de la creatividad y el ingenio científico para concebir nuevas formas de enfrentar el virus y sus cepas futuras.

Con la aparición de una nueva enfermedad a nuestras vidas, llegaron las crisis sanitarias, económicas y sociales que seguimos padeciendo. Los problemas psicológicos derivados de la pandemia no se hicieron esperar (véase ¿Cómo ves?, Núm. 259): una de cada cinco personas que enfermaron tuvieron que enfrentarse por primera vez a la ansiedad, la depresión y el insomnio. Además, los pensamientos suicidas se incrementaron entre 8 % y 10 %, especialmente en jóvenes. En consecuencia, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomendó a las naciones asignar recursos para la atención de la salud mental como parte de los planes de respuesta y recuperación ante la COVID-19.

En vista de que la divagación mental afecta cómo nos sentimos, revisemos algunos de los problemas emocionales que pueden derivarse de estados de divagación frecuentes, así como una de las principales estrategias para hacerles frente.

Depresión

Decimos coloquialmente "tengo depresión" como si esta fuera un estado fisiológico. Pero está claroque ni una tomografía ni unos rayos X encontrarán por ninguna parte del organismo el lugar dondese aloja esa experiencia que nos pone tan tristesy desalentados. Por mucho tiempo, tanto los modelos médicos como los psicológicos le han dadoel estatus de enfermedad a un conjunto de comportamientos que se presentan cuando estamosen situaciones adversas.

Con frecuencia la depresión acompaña a la ansiedad. Se les puede ver haciéndose compañía y alternándose el protagonismo. Para comprenderlo que es una depresión, hay que poner especialatención en lo que la gente hace, e incluso en loque deja de hacer cuando está experimentando unestado de ánimo bajo. En psicología hay distintas tradiciones terapéuticas que van desde la cognitiva conductual, el enfoque psicodinámico y las posturas humanistas hasta los llamados modelosconductuales de tercera generación.

Para las terapias de tercera generación, también conocidas como contextuales, la depresión surgecomo consecuencia de un suceso en la vida de lapersona que súbitamente la aparta de las fuentesde reforzamiento positivo, es decir, de las actividades que le son significativas e importantes en la vida. ¿Recuerdas algún suceso vital que ocurrióde forma inesperada en nuestras vidas y que lascambió para siempre?

La cronestesia es la capacidad de reconstruir mentalmente eventos personales que ocurrieron en el pasado, así como de imaginar losposibles escenarios que nos depara el futuro; es decir, un viaje mental porel tiempo.

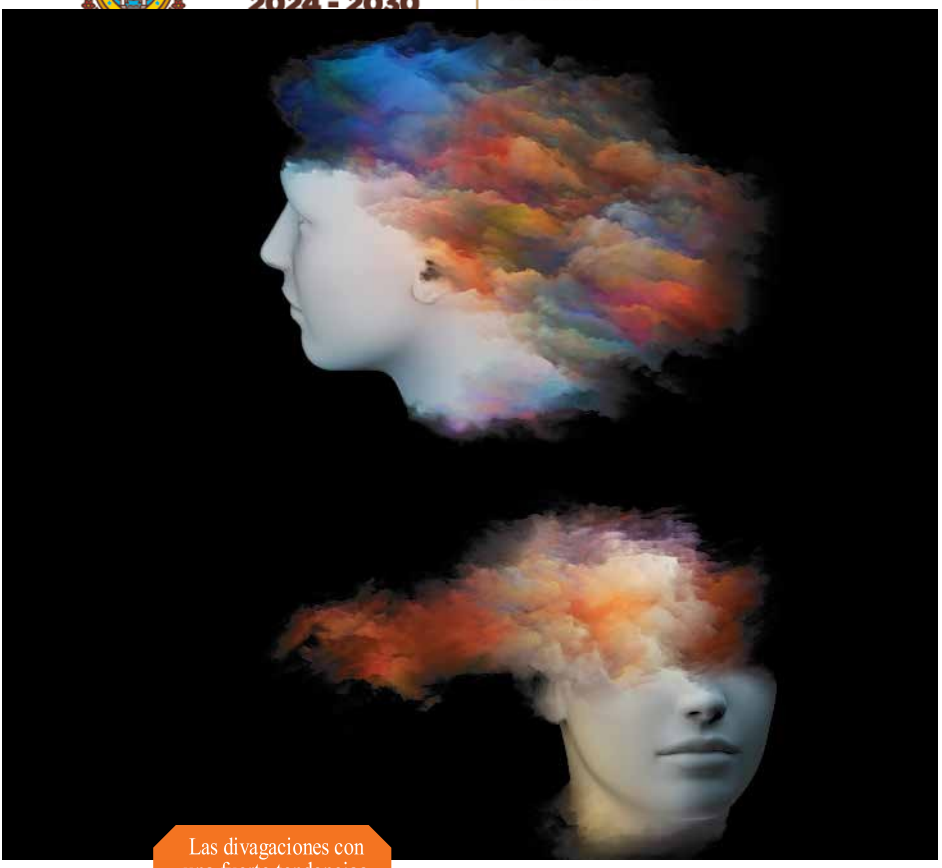
La pandemia de COVID-19 nos puso en una circunstancia en la cual muchas de las actividadesque conocíamos o disfrutábamos fueron suspendidas e incluso prohibidas y penadas legalmente. Elcontacto e intercambio social se volvieron escasos y un sinnúmero de personas tuvieron que enfrentarse al desempleo o a la reducción de su salario.

¿Cómo no deprimirse en una situación como esta? Una depresión, en todo caso, es un proceso adaptativo mediante el cual la persona asimila e integra la pérdida y los cambios resultantes de esta.

La depresión es tan común, que hasta personajes políticos famosos como Winston Churchill dedicaron algo de tiempo a hablar del tema. Churchillno solo dirigió como primer ministro al Reino Unido en medio de la Segunda Guerra Mundial, también libró batallas que solo podían ocurrir en su intimidad. Hacia el final de su vida, el político británicoenfrentó momentos difíciles de depresión y una de sus frases más emblemáticas al respecto fue: "Yotenía un perro negro y se llamaba depresión", fraseque luego inspiraría un cortometraje animado realizado por la OMS en 2012. Puedes encontrarlo enYouTube bajo el título Iniciativa Perro Negro OMS y OPS contra la depresión.

De ansiedades y arañas

Imagínate que eres un superhéroe adolescente lidiando con la vida y además con los problemas



Las divagaciones con una fuerte tendenciaa volver al pasado se asocian con estados de ánimo depresivo; cuando las divagaciones son unaanticipación aprensiva deuna desgracia futura se asocian con estados de ansiedad.

de toda una ciudad, una especie de Hombre Araña. Entre los superpoderes que desarrolló Peter Parker para enfrentarse a sus enemigos se encuentra el llamado "sentido arácnido". Por medio de este, Spiderman puede advertir de forma anticipada la inminencia de un peligro, lo que se manifiesta comouna sensación en su cuerpo centésimas de segundos antes de que ocurra la amenaza.

Las personas comunes y corrientes, que tenemos trabajos ordinarios y ocupaciones que para nada envidiaría un superhéroe, no podemos aspirar a superpoderes tan avanzados y elaborados como losde Peter Parker; sin embargo, la ansiedad que mu- chas personas pueden experimentar en sus vidas nodista mucho del sentido arácnido que acompaña alHombre Araña en sus aventuras. ¿Se parece más laansiedad a un superpoder o a una debilidad?

Los psicólogos entienden la ansiedad como una anticipación aprensiva de un daño o una desgraciafutura. Las personas que experimentan ansiedadtienen dificultades para lidiar con los pensamientos que giran en torno a la preocupación por situaciones de su vida cotidiana, como el trabajo, la familia y la salud. Cuando esas preocupaciones por el futuro se desbocan, pueden afectar el funciona-

miento de la persona negándole el bienestar y la tranquilidad. Toda ansiedad se acompaña además de diversos malestares físicos, como tensión muscular, fatiga y dificultad para concentrarse y para conciliar el sueño.

Más allá de decidir si la ansiedad es una maldición o una herramienta poderosa en nuestras vidas,es necesario tener clara la función primordial quepuede tener en nuestro día a día. Al margen de las etiquetas diagnósticas, la ansiedad es un mecanismo adaptativo natural adquirido en la evolucióny que durante mucho tiempo les sirvió a nuestros antepasados para mantenerse alertas a futuros muy inciertos y depredadores al acecho (véase

La pandemia de COVID-19 ha representado para la humanidad una permanente exposición ala preocupación por enfermar y también por morir. Cuando existen brotes virales, una persona con ansiedad grave puede incluso malinterpretar malestares físicos comunes como signos de infección, así como presentar comportamientos desadaptativos, como lavarse compulsivamente las manos yaislarse de la sociedad.

Durante el primer trimestre de 2020, un equipo de investigadores de institutos universitarios y dela salud en México y en Estados Unidos hicieron una encuesta distribuida en línea entre estudiantes universitarios tanto mexicanos como extranjeros. Entre sus resultados encontraron que, de los 1 508 participantes, un 20.8 % presentó síntomas de ansiedad grave y que, como es bastante comprensible, uno de los factores más significativos para experimentar ansiedad durante la crisis sanitaria fue la disminución del ingreso familiar.

El acceso a servicios de salud mental sigue siendo limitado en México, tanto por razones económicas como por el prejuicio aún existente en torno a la asistencia a terapia psicológica. En la encuesta anterior, se encontró, además, que el72 % de los participantes no contaba con atenciónpsicológica ni presencial ni a distancia. Ir a psicoterapia se ha vuelto más la excepción que la regla.

De antídotos y superpoderesmentales

Este viaje empezó con la experiencia de la divagación y las consecuencias de la mente errante en la vida de las personas. Pudimos reconocer que durante la divagación el contenido de los pensamientos es fundamental: si hay demasiados

Divagación
Desvío de la atención del tren de pensamiento a contenidos mentales con poca o nula relación con lo que se está haciendo o con el entorno.

Cronestesia
Viaje mental en el tiempo. Capacidad de reconstruir mentalmente acontecimientos personales del pasado e imaginar situaciones futuras.

Mindfulness
Estado mental en el que se presta atención al momento presente de manera intencional, sin juzgar lo que está ocurriendo.

pensamientos cargados al pasado, tendremos estados de ánimo depresivos. De la misma manera, si nuestras divagaciones se dirigen a situacionesen las que la preocupación por el futuro es la regla y nuestros pensamientos constantemente nos advierten sobre peligros reales o imaginarios, nos encontramos entonces ante la ansiedad.

Habiendo reconocido que buena parte de nuestros malestares psicológicos encuentran su fuenteen nuestros pensamientos y en el lenguaje del que hacemos uso en todo momento, ¿existen formas de afrontar dichos pensamientos invasivos?

La modalidad más evidente para hacer frente a nuestros problemas psicológicos es la psicoterapia. Sin embargo, aunque no la sustituye de ninguna manera, existe una forma accesible para cualquierpersona y solo requiere de tu disposición, por lomenos cinco minutos de tu tiempo cada día y unlugar libre de distractores: se trata de la meditación, que existe desde tiempos ancestrales.

Para realizar una meditación en atención plena o mindfulness (una de las técnicas terapéuticas más socorridas en las terapias contextuales), Jon Kabat-Zinn, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, sugiere que hay que tener una actitud de apertura y disposición a poner atención al momento presente, sin juicios ni expectativas. Realizar algo tan sencillo como tomarte un momento del día para poner atención a los estímulos que ocurren dentro de ti (como pensamientos, emociones, impulsos, sensaciones, respiración) puede traer múltiples beneficios a tu calidad de vida.

- Salud mental UNAM: https://saludmental.unam.mx/
- "Salud mental y COVID-19", Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud: https://www.paho.org
- "¿Qué dice la ciencia sobre la meditación?", *National Geographic*, 1 enero de 2019: www.ngenespanol.com/ciencia/que-dice-la-ciencia-sobre-la-meditacion/

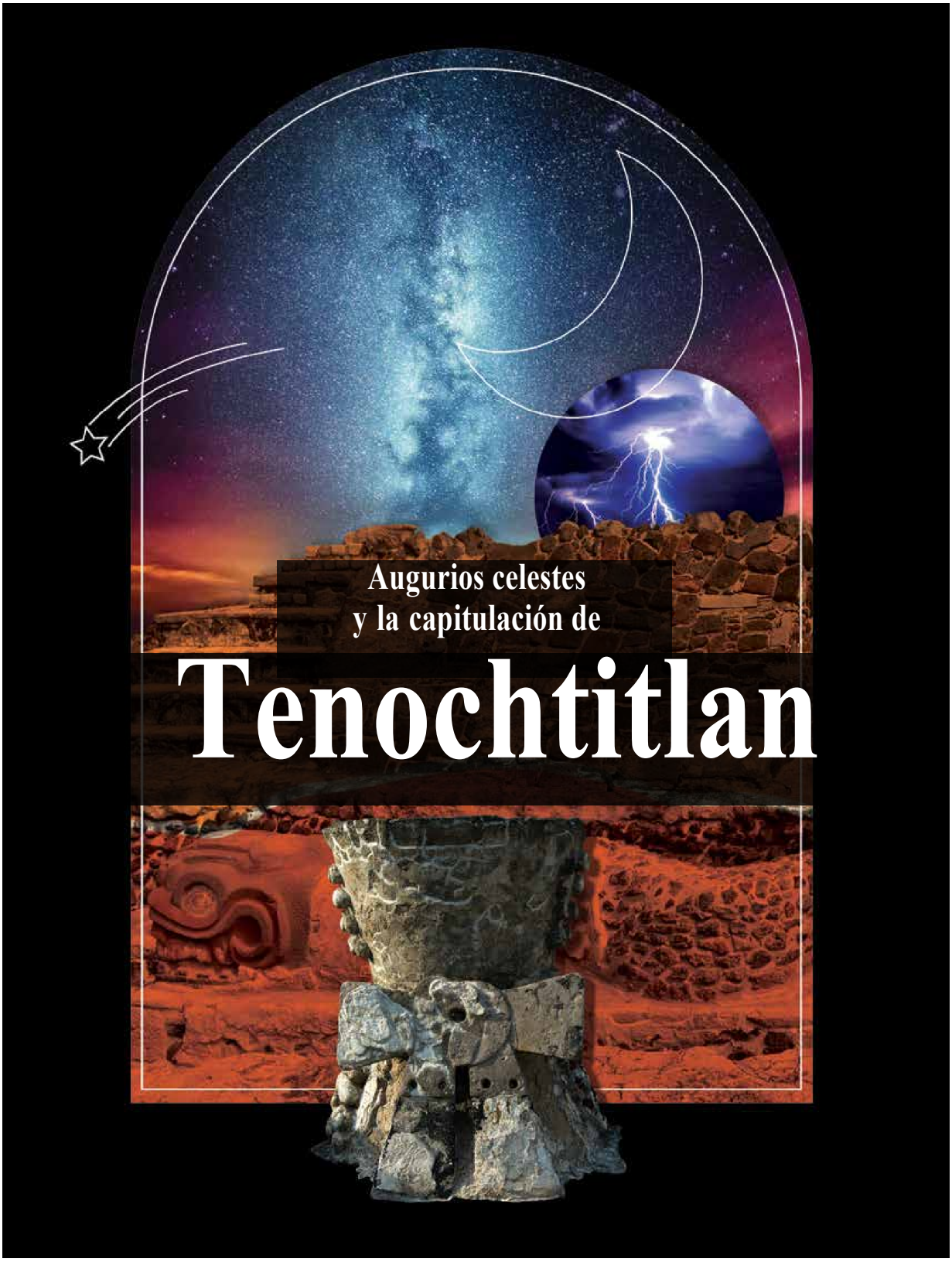
Giovanni Benigno Razo Ramírez es estudiante de un posgrado en psicología, con línea de investigación en conductas adictivas, terapias conductuales de tercera generación y *mindfulness*.

Roberto Oropeza Tena es profesor investigador de la Facultad de Psicología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y editor general de *Uaricha, revista de psicología*.

Se recomienda tomarte un momento del día para poner atencióna los estímulos que ocurren dentro de ti —pensamientos, emociones, impulsos, sensaciones, respiración, etc.— con lo cual puede aumentar tu calidad de vida.

Si bien no hay un antídoto o solución definitiva para detener el vagabundeo mental, ya que es una de las actividades favoritas de nuestro cerebro, siempre viene bien identificar los momentos en quenuestros pensamientos comienzan su despegue y,sobre todo, nunca olvidar que la persona a cargode esa incansable máquina del tiempo mentaleres tú. Asegúrate de llevarla siempre a un buen aterrizaje.

LECTURA 4. Augurios celestes y la capitulación de Tenochtitlan



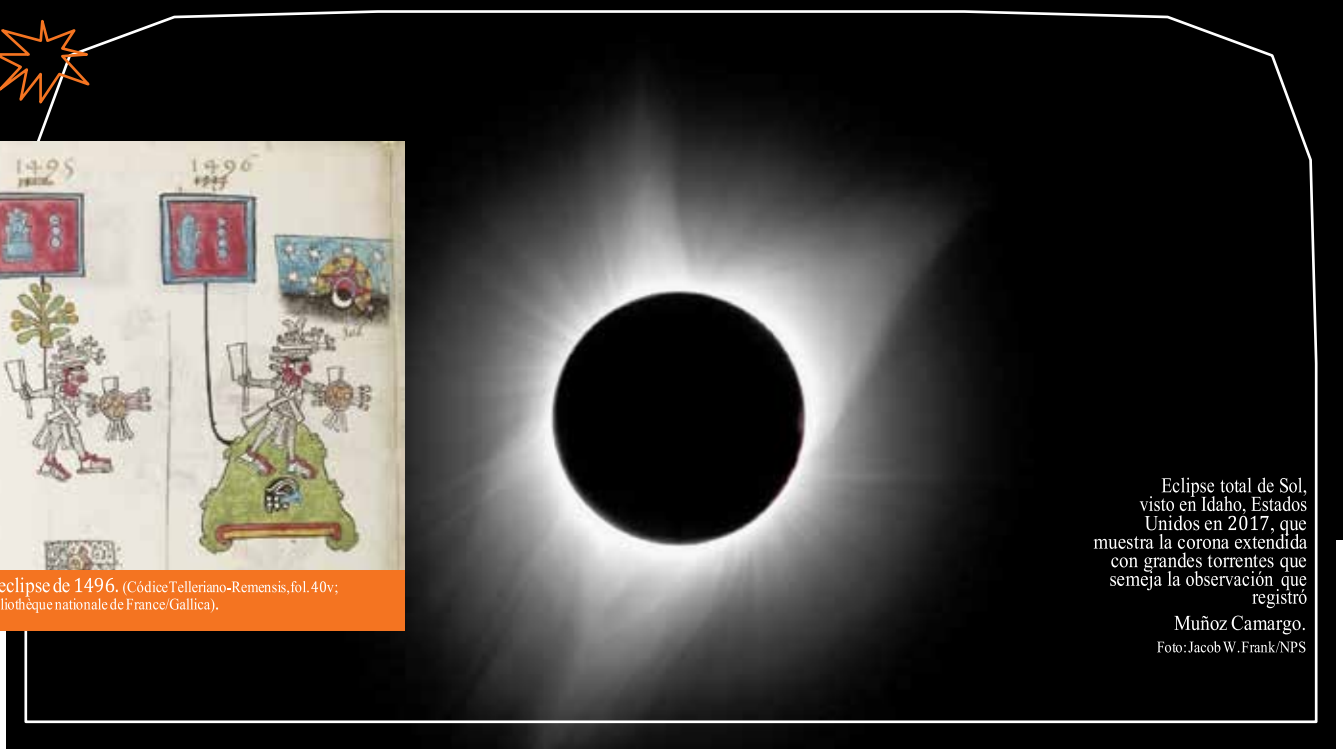
Un prodigio luminoso (luz zodiacal) apareció en el cielo aproximadamente 10 años antes de la llegada de los españoles. (Fray Bernardino de Sahagún, CódiceFlorentino, lib. XII, fol. 408r; iluminado por J. Galindo Trejo).

En el mes de agosto se cumplen 500 años de la caída de la capital del Imperio Azteca. Las observaciones astronómicas de los mexicas en los años previos a la caída, e incluso apenas unas horas antes de la rendición de Cuauhtemoc ante Hernán Cortés, se interpretaron como presagios de la conquista.

Alrededor de 10 años antes de la llegada de los españoles un fenómeno celeste muy visto captó la atención de los observadores mexicas. Ocurrió por una coincidencia con una etapa particularmente débil de la actividad solar.El cronista Fray Bernardino de Sahagún dejó el siguiente relato, obtenido de sus informantes indígenas, sobre ese evento: “Diez años ante que viniesen los españoles desta tierra apareció en el cielo, una cosa maravillosa y espantosa, y es que aparecióuna llama de fuego, muy grande y muy resplandeciente, parecía que estaba tendida en el mismocielo, era ancha de la parte de abaxo y de la partede arriba aguda, como quando el fuego arde parecíaque la punta de ella llegaba hasta el medio del cielo, levantábase por la parte del oriente, luego después de la media noche y salía con tanto resplandor que parecía el día; llegaba hasta la mañana entonces seperdía de vista quando salía el Sol, estaba la llamaen el lugar que está el Sol a medio día. Esto duró porespacio de un año cada noche: comenzó en las docecasas y quando aparecía a la media noche toda lagente gritaba y se espantaba todos sospechabanque era señal de algún gran mal”.

En su obra Sahagún acompaña el relato con un dibujo que presenta el fuego celeste en forma piramidal, en un fondo de estrellas, rodeado de personajes señalando hacia el prodigio. El Códice Telleriano-Remensis, manuscrito colonial temprano, reporta también este fenómeno con el dibujo de una especie de larga voluta del color del fuego que une la Tierra con la bóveda celeste que con-tiene estrellas. Además añade: “ésta fue una de las maravillas que ellos vieron antes que viniesenlos cristianos y pensaban que era Quetzalcoatle al cual esperaban”. Recuérdese que

El eclipse de 1496. (Códice Telleriano-Remensis, fol. 40v; Bibliothèque nationale de France/Gallica).


Eclipse total de Sol, visto en Idaho, Estados Unidos en 2017, que muestra la corona extendida con grandes torrentes que semeja la observación que registró Muñoz Camargo.
Foto: Jacob W. Frank/NPS

mexicas creyeron reconocer en Hernán Cortés al dios Quetzalcoatl.

Manchas solares

A partir de la descripción anterior parecería que tal portento luminoso correspondió a la llamada luzzodiacal. Esta es una luminiscencia blanquecina difusa que se produce por la dispersión de la luzdel Sol en partículas de polvo provenientes mayor-mente de los cometas y asteroides que se muevenen torno a él y aproximadamente en el mismo planode la órbita de la Tierra. Recientemente se ha identificado al planeta Marte como una importante fuente de polvo que contribuye a la luz zodiacal. Por lo general, esta se puede observar antes del amanecer y después de la puesta del Sol en formade un triángulo brillante cuya base es aproximadamente paralela al horizonte.

La intensidad de la luz zodiacal depende del nivel de actividad solar dentro del ciclo, de once años. La mayor intensidad se alcanza alrededor delmínimo de actividad, la cual se manifiesta por unnúmero disminuido o la ausencia total de manchassolares. Por otra parte, el máximo de intensidad dela luz zodiacal precede cercanamente en dos años al mínimo de actividad solar.

De acuerdo con la reconstrucción de los ciclos deactividad solar para el siglo XVI, obtenida analizando los anillos que se forman anualmente en los troncos de árboles centenarios, con una acumulación de anillos cada 11 años, así como estudiando el entre los años 1460 y 1550 hubo un excepcional periodo de muy baja actividad, conocido como el Mínimo de Spörer. De esta manera se ubicó el mínimode manchas solares en 1513. Por lo anterior, es probable que el evento observado por los mexicas en1510 haya sido un episodio extraordinario e intenso de luz zodiacal que aconteció en circunstancias excepcionales de un mínimo histórico de actividad solar.

Eclipse de Sol

En una obra que escribió entre 1580 y 1585 por encargo del Rey Felipe II, el cronista tlaxcalteca DiegoMuñoz Camargo narra: “que más de siete años continuos antes de esta venida (de los españoles)habían visto dentro del Sol una espada de fuegoque lo atravesaba de parte a parte, una asta que deél salía y una bandera de fuego resplandecientes,que estas cosas no podían pronosticar sino la totaldestrucción y acabamiento del Mundo”.

Esta descripción corresponde fielmente al aspecto que presenta la corona, la región más externa y caliente de la atmósfera solar, durante un eclipse total de Sol. Lamentablemente, es incierta la fecha en la que sucedió el fenómeno que describeMuñoz Camargo.

Estrella humeante

Durante el reinado de Motecuhzoma Xocoyotzin, también conocido como Moctezuma II, apareció en el cielo un cometa

El cometa Hale Bopp observado el 14 de marzo de 1997. Se distingue claramentela cola de polvo y la de plasma que surgen del núcleo.
Foto: ESO/E. Slawik.

Motecuhzoma observando desde Tenochtitlan un cometa. (Códice Durán *Historia de las Indias de la Nueva España e Islas de Tierra F irme*, 1579; Biblioteca Nacional de España).

Huitzilopochtli en una noche, hacia la parte oriente del cielo, vio un gran cometa (citlalin popoca, "estrella humeante" en nahuatl) que echaba de sí un largo resplandor; junto con la guardia siguieron observando hasta el amanecer cuando elcometa alcanzó el cenit.

A la mañana siguiente, el mancebo comunicó a Motecuhzoma lo que había visto. Este le preguntó si no había soñado eso, pero la guardia lo confirmó. Esa noche el soberano subió a un mirador que tenía en una azotea y muy atento observó el cometa con aquella cauda tan linda y resplandeciente. Motecuhzoma se llenó de estupor y de gran tristeza.

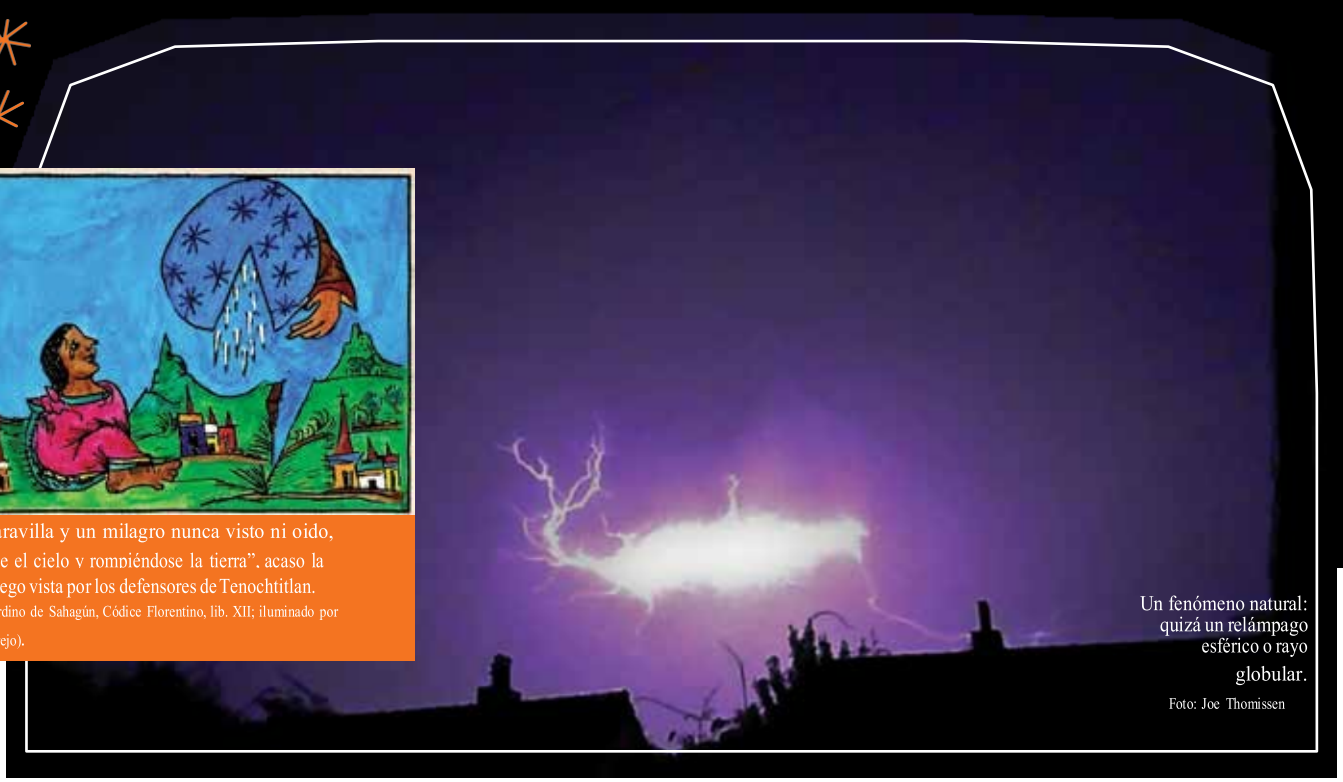
Al otro día preguntó al mancebo el significado del cometa, pero él se declaró ignorante de las cosas del cielo y sugirió al soberano que mandase llamar a los astrólogos. Sin embargo, ellos declararon no haber visto la nueva señal en el cielo. Esto provocóla cólera de Motecuhzoma, quien les reprochó el poco cuidado que tenían en observar el firmamento y los mandó encerrar en una jaula. Entonces el soberano mandó llamar a Nezahualpilli, rey de Texcoco, famoso por ser un esmerado astrólogo, quien leadvirtió la inminente llegada de numerosas calamidades y la pérdida del reino, además le anunciósu propia muerte.

Motecuhzoma lloró amargamente, lamentándose de haber tenido la suerte de ser él quien fuera desposeído de descuidaron lavigilancia y ordenó su ejecución.

Después mandó buscar a nuevos astrólogosque tomasen el oficio exhortándolos para que tuvieran el cuidado de observar las estrellas de la noche y pronosticar sobre el cometa. Varias crónicas indígenas del siglo XVI señalan el año 10 Acatl, es decir, 1515, como el de la muerte de Nezahualpilli. Fray Juan de Torquemada afirma que el soberano texcocano falleció en el año 11 Tecpatl, o 1516. El astrónomo francés Alexander Pingré y el estadounidense Increase Mather reportan en sus catálogos la observación en Europa de un cometa en 1516 que brilló durante muchos días y que se consideró como un presagio de la muerte del rey Fernando el Católico, quien falleció el 23 de enero de 1516. Como se sabe, el año prehispánico no corría en sincronía con el año occidental y dependía de la tradición local cuándo iniciaba el año nuevo. Sin embargo, en la mayoría de los casos, para el 23 de enero aún regía el año 10 Acatl, por lo tanto, el llamado cometa Motecuhzoma correspondió al observado en 1516. Este viajero celeste fue identificado como el portador de un mensaje apocalíptico para el pueblo mexica que pareció convertirse en realidad con la llegada de los invasores españoles.

Motecuhzoma falleció en 1520, apenas un año antes de la caída de Tenochtitlan. Lo sucedió su hermano menor

"Una maravilla y un milagro nunca visto ni oido, abriéndose el cielo y rompiéndose la tierra", acaso la bola de fuego vista por los defensores de Tenochtitlan. (Fray Bernardino de Sahagún, Códice Florentino, lib. XII; iluminado por J. Galindo Trejo).



Un fenómeno natural: quizá un relámpago esférico o rayo globular.

Foto: Joe Thomissen

Bola de fuego

En agosto de 1521 los mexicas estaban ya sitiadospor las tropas españolas y sus aliados indígenas, la defensa heroica de la ciudad estaba llegando a sufin. El padre Sahagún relata un suceso asombroso einesperado del que fueron testigos los defensores de Tenochtitlan: "Y se vino a aparecer una como grandellama. Cuando anochecía llovía, era cual rocío la lluvia. En este tiempo se mostró aquel fuego (de color desangre). Se dejó ver, apareció cual si viniera del cielo. Era como un remolino, se movía haciendo espirales. Iba como echando chispas, cual si restallaran brasas. Unas grandes, otras chicas, otras como leve chispa. Como si un tubo de metal estuviera al fuego, muchos ruidos hacía, retumbaba, chisporroteaba. Rodeó la muralla cercana al agua y en Coyonacazco fue a parar. Desde allí fue luego a medio lago, allí fue a terminar. Nadie hizo alarde de miedo, nadie chistó una palabra". Al día siguiente el último soberano mexica, Cuauhtemoc, se rindió a Hernán Cortés.

De acuerdo con esta narración, probablementese trató de un fenómeno de electromagnetismo atmosférico conocido como relámpago esférico, rayoglobular, centella o simplemente bola de fuego. Sonobjetos esféricos u ovalados luminiscentes que seasocian generalmente con tormentas eléctricas. La mayoría surge casi simultáneamente con la descargade un rayo entre una nube y la tierra; sus coloresvarían entre rojo, amarillo y azul; su duración es deapenas algunos minutos; se mueven horizontalmente a pocos metros por segundo, y suelen alcanzar un tamaño del orden de decenas de centímetros.

Estas esferas rotan sobre sí mismas y puedenatravesar paredes y ventanas sin provocar daños,pero en ocasiones causan gran devastación; al- gunas al girar producen sonidos y suelen desaparecer en silencio o en forma explosiva. Se ha reportado que a veces rebotan sobre objetos sólidos como el suelo. Dado su comportamiento esun gran reto explicar su naturaleza exacta.

Debido a que los relámpagos esféricos ocurren espontáneamente, ha sido muy complicado su estudio bajo condiciones experimentales controladas. Una hipótesis plantea que es un plasma altamente ionizado contenido por campos magnéticos autogenerados. Sin embargo, esto no explica todas las características observadas por los miles de testigos que a lo largo de varios siglos han descritoeste fenómeno atmosférico. Otra hipótesis sugiereque partículas radiactivas provenientes de rayos cósmicos son guiadas por el campo eléctrico de la tormenta provocando descargas gaseosas. Hasta hoy no existe una explicación de este fenómenoque se acepte en forma unánime.

Cabe reconocer la notable precisión con la que los informantes de Sahagún describieron la boladefuego que se convirtió en el preámbulo de la capitulación de Tenochtitlan. Lo anterior plantea lapregunta de si los mexicas, después de 80 días de intensos y heroicos combates por romper el cruelsitio de sus enemigos, decidieron el momento de la rendición al percibir alguna señal divina. A esterespecto, resulta muy sugerente el planteamiento expresado por la historiadora Eva Uchmany según

el cual Cuauhtemoc se habría rendido en el momento en que el planeta Venus se vio por primeravez en la madrugada ese año.

Se sabe que Venus como Estrella de la Mañana era identificado con el dios Quetzalcoatl. Precisamente en 1521, Venus alcanzó su conjunción inferior el 3 de agosto. Sin embargo, al encontrarsejustamente entre el Sol y la Tierra no fue visible. Fuenecesario que transcurrieran unos días más para queel planeta se alejara suficientemente del Sol y rea-pareciera al amanecer.

De acuerdo con la astronomía de posición serequiere que Venus se encuentre a una distanciade 8º del Sol, cuando este se encuentra bajo el horizonte. Así se obtiene que el 9 de agosto se pudo observar el surgimiento de Venus como Estrella dela Mañana. La extinción atmosférica provoca quese retrase el momento de la observación de uno a cinco días respecto a las fechas ideales de aparición del planeta. Por lo tanto, parece plausible la propuesta de que Cuauhtemoc, al contemplar a Venus, hubiese considerado el 13 de agosto como propicio para la capitulación de Tenochtitlan.

A través de este breve recorrido por algunas fuentes etnohistóricas en torno al momento del contacto de Mesoamérica con los europeos, hemos podido reconocer la notable capacidad de los observadores prehispánicos para registrar diversos fenómenos celestes. Asimismo, identificamos la influencia de estos en el marco de la idiosincrasiareligiosa de los pueblos del centro de México. Para muchos se cumplieron los presagios apocalípticos que condujeron a profundas transformaciones enlas sociedades prehispánicas. A partir del siglo XVI el destino de Mesoamérica quedó sellado y habría de surgir una nueva realidad social.

- Galindo Trejo, Jesús, "La astronomía prehispánica en México", *Ciencia*, enero-marzo 2009: www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/60_1/PDF/05-AstronomiaPrehispanica.pdf
- Instituto Nacional de Antropología e Historia, "Astronomía prehispánica": https://inah.gob.mx/en/boletines/2482-astronomia-prehispanica
- Aveni, Anthony, *Observadores del cielo en el México antiguo*, Fondo de Cultura Económica, Cd. de México, 2013.

Jesús Galindo Trejo es físico y matemático con doctorado en astrofísica. Trabajó en el Instituto de Astronomía; actualmente es investigador en el Instituto de Investigaciones Estéticas de la UNAM. Su labor de investigación se centra principalmente en la arqueoastronomía del México Prehispánico.

LECTURA 5. Retrato de un Hoyo negro

Nubes de estrellas en la constelación de Sagitario en dirección al centro de la Vía Láctea.

Imagen: ESO y Digitized Sky Survey 2 (Davide De Martin and S. Guisard, www.eso.org/~sguisard)

El 12 de mayo de 2022 se realizaron seis conferencias de prensa paralelas con investigadores del proyecto Telescopio del Horizonte de Eventos (THE) en varios países, México entre ellos. La Fundación Nacional para la Ciencia de Estados Unidos (NSF) había prometido, escueta y misteriosamente, dar a conocer ese día "un importante descubrimiento acerca de la Vía Láctea", pero para quien estuviera al tanto del trabajo de este equipo no era ningún misterio el motivo exacto de dichas conferencias.

En abril de 2017 el THE había apuntado su batería de radiotelescopios distribuidos por todo el mundo hacia el centro de la galaxia M87 y el centro de nuestra propia galaxia. El objetivo era escudriñar ambas regiones con un grado de detalle inusitado hasta entonces. En la conferencia mexicana, Laurent Loinard, de la UNAM, dijo: "Hay un consenso en la comunidad internacional de que todas las galaxias, o por lo menos la gran mayoría, albergan en su centro un agujero negro supermasivo". Añadió que se trata de objetos "con masas entre millones y miles de millones de veces la masa del Sol". Los hoyos negros de M87 y de nuestra galaxia incluso tienen nombre: M87* y Sagitario A*. El THE presentó la imagen del hoyo negro central de M87 en 2019 (véase *¿Cómo ves?* Núm. 247), pero nos quedaron a deber la de Sagitario A*. Así pues, cuando se anunciaron las conferencias paralelas en mayo, todo el mundo sabía de qué se trataba.

Sí, la relatividad general funciona

Tras las presentaciones en la conferencia de la NSF en el Club de Prensa de Washington, D.C., tomó la palabra la astrofísica turca Feryal Özel, de la Universidad de Arizona. "Hasta ahora no contábamos con una imagen directa que confirmara que Sagitario A* es, en efecto, un hoyo negro", dijo. Pero no es que hubiera muchas dudas. Décadas de observaciones de esa región con todo tipo de telescopios dejaban poco margen para la incertidumbre; en particular, el trabajo de dos equipos internacionales (y rivales) —dirigidos uno por Andrea Ghez y el otro por Reinhard Genzel—, que culminó con una brevísima película que resumía 10 años del movimiento de las estrellas más cercanas al centro de la galaxia. El video muestra un enjambre de estrellas moviéndose como moscas alrededor de un punto invisible. A esa escala, entre 1 000 y 100 000 veces más grande que el hipotético hoyo negro, no había esperanzas de atisbar el entorno inmediato de este, pero un análisis del movimiento de esas estrellas no dejaba duda de que ahí había un objeto muy compacto y de una masa igual a 4 000 000 de veces la masa del Sol. No podía ser más que un hoyo negro, si nuestras ideas acerca de la gravedad son correctas. Ghez y Genzel ganaron el Premio Nobel de Física 2020 por esos trabajos.

Prosigue Özel: "Eso nos permitió predecir de qué tamaño tendría que ser la sombra del hoyo negro". Un hoyo negro es un objeto tan compacto, que ni la luz puede escapar de su intensa atracción gravitacional, lo que entre otras cosas significa que no podemos ver el hoyo negro propiamente dicho. Lo que sí se ve —lo que emite radiación de todo tipo que podemos captar con nuestros telescopios— es el gas y polvo que giran alrededor del hoyo negro en órbitas mucho más apretadas que las estrellas de Ghez y Genzel, en la región inmediata al llamado "horizonte de eventos" del hoyo negro: el límite más allá del cual ni la luz puede escapar. Esa región es muy brillante porque la materia de ese torbellino está sometida a condiciones extremas de presión y temperatura, pero en el centro de este maremágnum debería verse la sombra del hoyo negro. Si nuestra teoría de la gravedad (la teoría general de la relatividad de Einstein) es correcta a esa escala y esa intensidad del campo gravitacional, la sombra debería tener una forma y un tamaño precisos. "Un anillo de luz alrededor de la oscuridad: esa es la señal de la sombra del hoyo negro", dijo Feryal Özel.

Eso es justamente lo que se vio en 2019 en la imagen de M87*, que es un hoyo negro 1 500 veces más masivo, pero 2 000 veces más lejano, que Sagitario A* (razón por la cual se ve casi del mismo tamaño en el cielo). "Las dos imágenes se parecen porque ambas son consecuencia de la fuerza de

gravedad. El espacio-tiempo se deforma exactamente de la misma manera alrededor de un hoyo negro, sin importar su masa ni su entorno", añade Özel. La forma y tamaño de la sombra en ambos casos coincidió perfectamente con las predicciones de la teoría general de la relatividad: "La única manera de cambiar el tamaño de la sombra es cambiando la teoría. Estas observaciones dejan muy poco margen para alterar la teoría de la gravedad de Einstein". Lo cual es un poco decepcionante, como veremos.

A través de un cristal empañado

El THE es un telescopio virtual (o interferómetro) formado por radiotelescopios independientes —entre ellos el Gran Telescopio Milimétrico, situado en la cima del volcán Sierra Negra en Puebla—, cuyas señales se combinan para que actúen como un solo telescopio (véase *¿Cómo ves?* Núm. 221). En la conferencia de prensa con investigadores de instituciones mexicanas (shorturl.at/bixGO), Gisela Ortiz León, de la sede Ensenada del Instituto de Astronomía de la UNAM, explica: "Este interferómetro tiene la resolución angular que nos daría un telescopio del diámetro de la Tierra", lo que equivale a decir que tiene la agudeza visual necesaria para ver una manzana en la superficie de la Luna. "Pero solo tenemos pequeñas partes del telescopio completo": las ocho antenas que se usaron para construir la imagen de Sagitario A*. En otras palabras, es como ver solamente pedacitos de una imagen completa. "Cada par de antenas nos da cierta información de la imagen", prosigue Ortiz León. "Los pares más separados nos dan información de las partes más pequeñas y los pares más juntos nos dan información de las estructuras más extendidas de la imagen. Los científicos de la colaboración han invertido muchos años en desarrollar nuevos algoritmos computacionales que permiten combinar todos los pares de antenas de tal manera que produzcan una imagen razonable de la fuente".

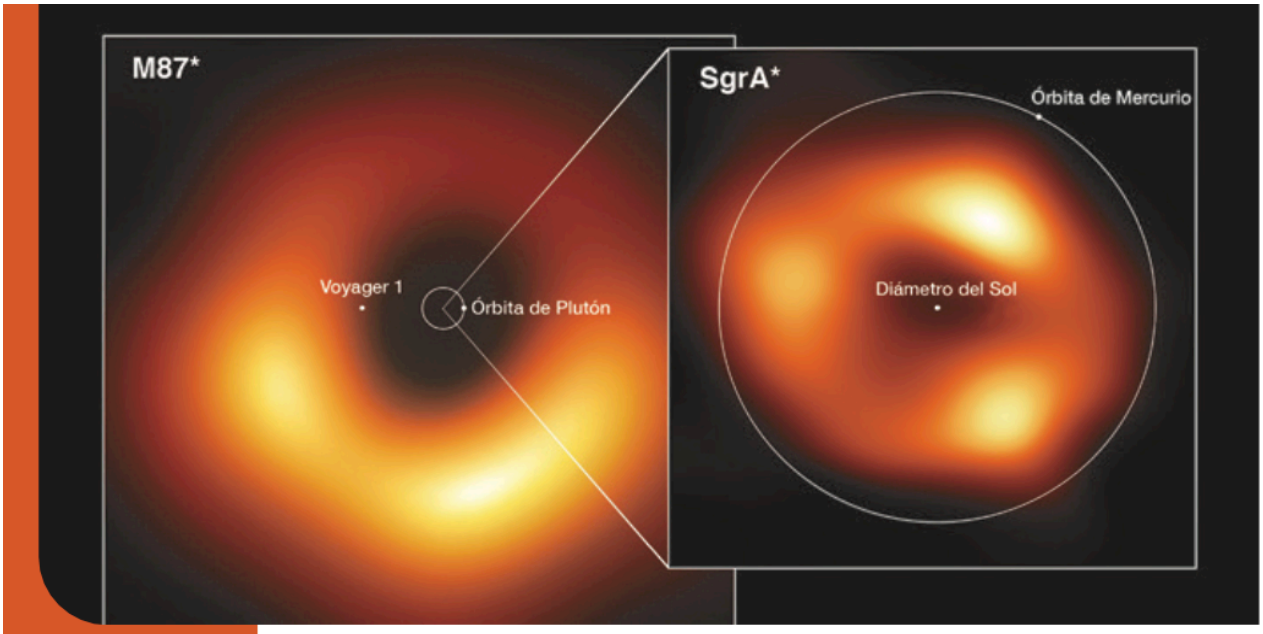
En la conferencia de la NSF, Vincent Fish, del Observatorio Haystack, explica que construir la imagen de Sagitario A* fue considerablemente más difícil que la de M87* (de ahí la demora). Para empezar, los radiotelescopios del proyecto recogieron en total 3.5 petabytes de datos. "Es el equivalente a 100 millones de videos de Tik Tok", precisa Fish.

THE, un conjunto de telescopios a escala planetaria. Imagen: ESO/ L. Calçada

Esa información se envió a los dos centros de procesamiento de datos en discos duros físicos transportados por avión: era imposible enviar tal cantidad de información por internet. Para calibrar, combinar y transformar esos datos en imagen se requirió un equipo de 300 personas. "Por medio de supercomputadoras se combinan las señales y se obtienen datos crudos", explica Fish. "El equipo de calibración combina los datos crudos con información sobre la sensibilidad de cada telescopio para integrar los datos que usará el equipo de imagen", el cual los utiliza para reconstruir la mejor imagen del plasma caliente que rodea al horizonte de eventos del hoyo negro.

> Para calibrar, combinar y transformar 3.5 petabytes de datos en la imagen del hoyo negro se requirió un equipo de 300 personas.

Esto deja claro que la "foto" de Sagitario A* no es una foto normal, que en un *clic* capta toda la información que se necesita para identificar el objeto fotografiado: es una reconstrucción a partir de datos incompletos. Como dijo en la conferencia Katie Bouman, experta en ciencias de la computación del proyecto, obtener la imagen a partir únicamente de los datos del telescopio es como tratar de reconocer una melodía tocada en un piano al que le faltan muchas teclas. "Como no sabes dónde ni cuándo van las notas que faltan, hay innumerables tonadas posibles". Hay que complementar con suposiciones acerca de las notas ausentes. En el caso del THE, las suposiciones son simulaciones numéricas por computadora, de lo que se encarga el equipo de Bouman. Las simulaciones permiten modelar todas las posibilidades: partiendo de la masa de Sagitario A* (bien conocida), se hacen modelos para todas las velocidades



Comparación de dos agujeros negros: M87* se localiza en el centro de la galaxia Messier 87 a 55 millones de años luz, y Sagitario A* en el corazón de la Vía Láctea a 27 000 años luz. Si bien M87* es más de 1 000 veces más grande dada su distancia de la Tierra, ambos hoyos negros se ven similares en el cielo.

Imagen: EHT collaboration (Lia Medeiros, xkcd)

de rotación del hoyo negro y para todas las orientaciones respecto a nosotros (de frente, de lado e intermedias), datos que no conocemos.

Hasta aquí se ha descrito un proceso idéntico al que operó para M87*. "Pero luego llegó la pandemia, que nos retrasó pero no nos detuvo", añade Vincent Fish. Primera complicación, mas no la única: Sagitario A* es más de 1000 veces más pequeño que M87*, lo que quiere decir que todo lo hace más rápido. El plasma que gira a su alrededor es como un caldero hirviente y turbulento que cambia de brillo y emite destellos en una escala de tiempo mucho menor. Lo que M87* hace en días, Sagitario A* lo hace en un segundo. Es como tratar de retratar a un niño inquieto en una foto de larga exposición. Añádase a esta complicación que a Sagitario A* lo vemos a través de la espesura de nuestra galaxia: 27 000 años luz de estrellas y nubes de gas y polvo interestelar que dispersan y bloquean la radiación, lo que equivale a tomar una foto a través de un vidrio translúcido.

> No se puede escudriñar el centro de la galaxia con un telescopio de luz visible.

Añade Fish: "Nuestros resultados se elaboran sobre décadas de estudios de otros equipos que han establecido que Sagitario A* contiene un objeto oscuro y masivo". Se refiere a los estudios del movimiento de aquellas estrellas que mencioné más arriba, pero también a estudios muy anteriores que establecieron dónde está el corazón de la galaxia y qué podía estar ocurriendo ahí.

El corazón de la galaxia

Era 1918 y faltaban más de 40 años para que se acuñara el término "hoyo negro". La palabra "galaxia" se reservaba para el conjunto de estrellas y gases al que pertenece el Sol. Se debatía si había otros conjuntos parecidos en el Universo. Hacía poco Henrietta Swan-Leavitt, del Observatorio Harvard College, había inventado una técnica para medir las distancias más grandes en el espacio (véase *¿Cómo ves?* Núm. 111). Con esa técnica Harlow Shapley descubrió casi por casualidad que el centro de la Vía Láctea está en la dirección de la constelación de Sagitario. Y en efecto, en esa dirección se ven más estrellas y más nubes de gas y polvo.

En 1933 un empleado de la compañía Bell Telephone recibió el encargo de identificar fuentes de interferencia que dificultaban las llamadas telefónicas intercontinentales, que se transmitían en ondas de radio. Karl Jansky construyó una antena giratoria y detectó tres tipos de emisiones naturales de ondas de radio: dos que provenían de tormentas eléctricas y una venía del espacio. Jansky ubicó la fuente espacial de ondas de radio en la constelación de Sagitario, muy cerca del centro de la galaxia (y de paso inauguró la radioastronomía). Lo malo es que las cosas ahí son tan tupidas, que no se puede escudriñar el centro de la galaxia con un telescopio de luz visible. La luz simplemente no puede salir y es como tratar de ver el centro del bosque a través de los árboles. Pero las ondas de radio sí pueden atravesar el material interestelar, como constató Jansky. La fuente de ondas de radio del centro de la galaxia más tarde se llamó Sagitario A.

En una carta a la revista *Nature* en 1954 dos astrónomos australianos observaron una región

de intensas emisiones de radio en Sagitario A y propusieron que esa fuente era el núcleo mismo de la galaxia. Veinte años después Bruce Balick y Robert Brown identificaron una región aún más compacta e intensa, a la que en 1982 se llamó Sagitario A*. La sospecha de que era un hoyo negro data de poco después, y desde entonces otras observaciones en distintas longitudes de onda han ido precisando la imagen. La culminación de esa etapa de la exploración de Sagitario A* fueron los trabajos de los equipos de Ghez y Genzel.

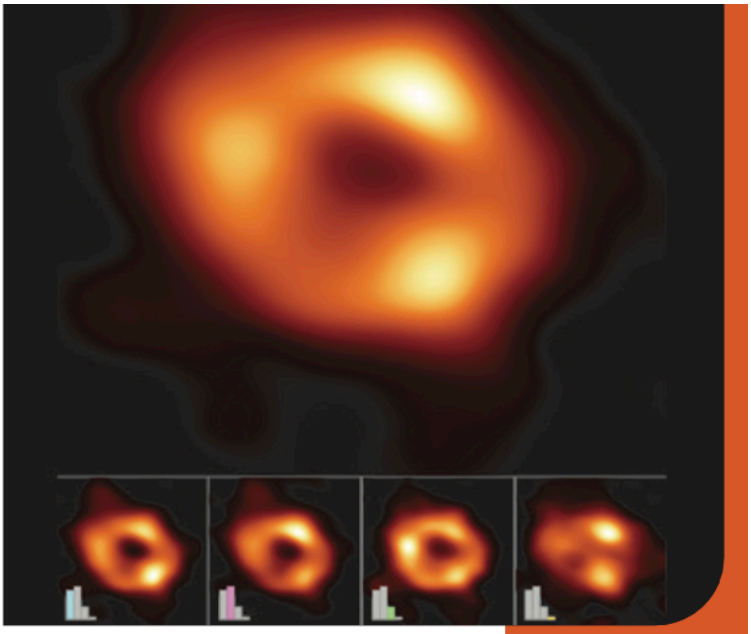
Un viejo amigo

"Para fotografiar Sagitario A* se produjeron miles de imágenes a partir de los datos que obtuvimos con el telescopio", dice Gisela Ortiz León y luego explica que esa enorme biblioteca de imágenes simuladas —cada una un caso posible de hoyo negro consistente con los datos del THE— se podía separar en cuatro categorías. De cada categoría se hizo un promedio. La imagen oficial que se presentó el 12 de mayo es a su vez el promedio de estas cuatro categorías. El 95 % de las imágenes obtenidas por simulación mostraban la estructura esperada. Dice Katie Bouman: "Tras años de pruebas con datos y simulaciones, hoy estamos seguros de que la estructura subyacente es un anillo". Y un anillo del tamaño exacto que predice la teoría general de la relatividad, lo cual, como mencioné, puede ser un poco decepcionante.

"¿Qué aporta la imagen a lo que sabemos de los hoyos negros? ¿O solo confirma lo que ya sabíamos?", pregunta un enviado de *Buzzfeed* en la conferencia de prensa de la NSF. Feryal Özel da una respuesta muy bonita, y quizá inesperada para quien se imagine que los científicos se alegran cuando se confirman sus teorías:

"Pues hay buenas noticias y malas noticias. La buena noticia es que seguimos extendiendo los límites de las pruebas a las que podemos someter nuestra teoría de la gravedad —la cual debería fallar en algún momento, pues sabemos que no es compatible con la microfísica; sabemos que en cualquier momento debería darnos alguna pista de cómo modificarla—. Y sin embargo la hemos puesto a prueba a distintas escalas de masa, desde masas estelares con la detección de ondas gravitacionales, pasando por Sagitario A* hasta M87*, con 6 000 millones de veces la masa del Sol. Nos hemos acercado al horizonte de eventos tanto como ha permitido nuestro telescopio, y aún no hemos visto ni una falla en la teoría. Tenemos la esperanza de que las fallas aparezcan pronto". En resumen: cuando te has pasado 20 años hurgando un rincón de la naturaleza, lo que quieres no es confirmar lo que ya sabías, sino encontrar algo nuevo.

Feryal Özel resume el sentimiento del equipo: "Desde hace 22 años, cuando me interesé en Sagitario A* en el posgrado, es como si hubiera estado chateando en línea con un amigo lejano. Tenía una vaga idea de cómo debía ser, pero ahora es como si por fin nos conociéramos en persona".



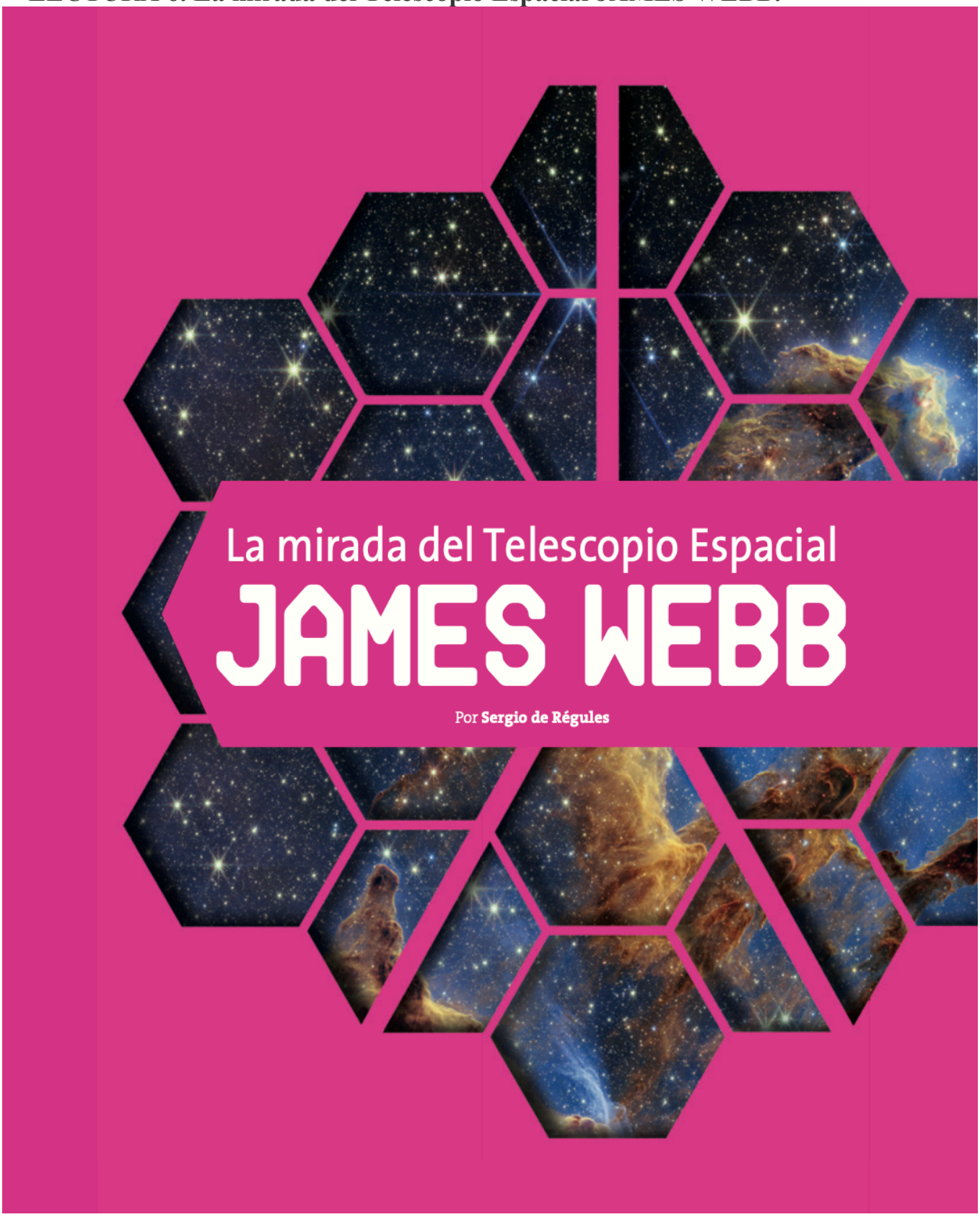
Para crear la imagen del agujero negro del centro de nuestra galaxia el THE tuvo que promediar miles de imágenes; estas se clasificaron en cuatro grupos con base en características similares como estructura o brillo. En la fila inferior se muestra una imagen representativa de cada grupo, así como la cantidad de imágenes pertenecientes a cada uno (barras).

Imagen: EHT Collaboration

- De Régules, Sergio y Miguel Alcubierre, *Surfear el espacio-tiempo*, Debate, Cd. de México, 2022.
- Bartusiak, Marcia, *Agujero negro. La evolución de una idea*, Crítica, Cd. de México, 2016.
- Fierro, Julieta, "La importancia de Sagitario A": www.youtube.com/watch?v=IDgTSMGUPuE

Sergio de Régules es coordinador científico de *¿Cómo ves?* En 2019 ganó el Premio Nacional de Divulgación de la Ciencia y la Técnica y en 2021 el Premio Latinoamericano a la Popularización de la Ciencia y la Tecnología. Su libro más reciente es *Surfear el espacio-tiempo* (en coautoría con Miguel Alcubierre).

LECTURA 6. La mirada del Telescopio Espacial JAMES WEBB.



La mirada infrarroja del Telescopio Espacial James Webb puede atisbar el interior de las nubes de gas y polvo en las que se forman las estrellas, así como remontarse en el tiempo para ver cómo eran las galaxias más antiguas.

Entender el Universo nunca estuvo entre los problemas más urgentes de la humanidad. Durante cientos de miles de años lo único importante fue sobrevivir al hambre y a las fieras el tiempo suficiente para tener descendientes, así como velar por que esos descendientes tampoco fueran víctimas del hambre y los depredadores. No había tiempo ni energía para nada más.

Tampoco había aptitudes. El equipo de fábrica que nos dio la evolución no es óptimo para otra cosa que no sea la simple supervivencia. Aún hoy oímos, vemos y olemos solo lo que tenemos que oír, ver y oler para sobrevivir en las condiciones prehistóricas en las que vivieron miles de generaciones de nuestros antepasados. Los 10 000 o 15 000 años de civilización no han sido suficientes para que nuestra especie se haya modificado para adaptarse

Los Pilares de la Creación, en la nebulosa del Águila, cámara NIRCam. Aquí destacan las estrellas jóvenes cuya radiación ultravioleta y viento estelar ya han dispersado el manto de gas y polvo en el que nacieron. Las estrellas emiten sobre todo ultravioleta, luz visible e infrarrojo cercano (por eso no se ven en la imagen siguiente). Los destellos rojos que se aprecian en los pilares son lugares en los que las estrellas en formación expulsan chorros de hidrógeno que se calientan hasta la incandescencia al chocar con el gas y polvo que las rodea. Imagen: NASA, ESA, CSA, STScI.

Los Pilares de la Creación, en la nebulosa del Águila, cámara MIRI. La cámara MIRI se especializa en revelar capas de gas y polvo. Las partes más oscuras de esta región de la nebulosa del Águila (a unos 6 500 años luz) corresponden a regiones en las que el polvo está más concentrado. Los picos que sobresalen de los pilares son lugares donde se están formando estrellas con sus planetas. Cada una de las bolitas que se ven en los extremos de los picos es más grande que el Sistema Solar. El pilar superior mide cinco años luz de largo. Imagen: NASA, ESA, CSA, STScI.

a la vida sedentaria que permite la civilización. Así, en la vida moderna seguimos operando con capacidades adaptadas a la época de las cavernas. Podemos, por ejemplo, ver un oso a lo lejos en la planicie, pero no podemos ver las lunas de Júpiter ni la luz de las primeras galaxias. Para eso hemos tenido que inventar extensiones de nuestros sentidos: instrumentos científicos que nos dejan ver fenómenos y rincones de la naturaleza que ni siquiera sabíamos que existían.

El telescopio que construyó Galileo en 1609 servía para ver más lejos y nada más. Lo mismo puede decirse de los que le siguieron durante varios cientos de años, hasta llegar a los de las primeras décadas del siglo XX. Luego se inventaron telescopios que nos dan otra ventaja muy distinta: nos permiten ver cosas que no emiten luz, sino radiaciones del mismo tipo, pero invisibles al ojo humano. La luz a la que son sensibles nuestros ojos —los colores del arcoíris del rojo al violeta— cabe en una franja estrecha de una gama infinita conocida como espectro electromagnético. Más allá del violeta está la región de la radiación ultravioleta, y todavía más lejos se encuentran los rayos X y los rayos gamma. Más allá del rojo, por el otro lado del arcoíris empieza la región de la radiación infrarroja y después las de las microondas y las ondas de radio. El parámetro que distingue estas variedades de radiación electromagnética se llama longitud de onda, el tamaño de un ciclo de vibración completo de la onda. Las ondas electromagnéticas tienen longitudes que van desde miles de kilómetros hasta mucho más pequeñas que un átomo. La luz visible ocupa una franja que va de 0.4 a 0.7 micras (una micra es una milésima de milímetro). Las ondas que se usan para transmitir señales por Bluetooth (un tipo de ondas de radio) son mucho más grandes: unos ocho metros.

Si quieres sentir los efectos de la radiación infrarroja, ponte al sol. El calorcito solar no es efecto de la luz visible, sino de la radiación infrarroja que nuestra estrella emite también en grandes cantidades.

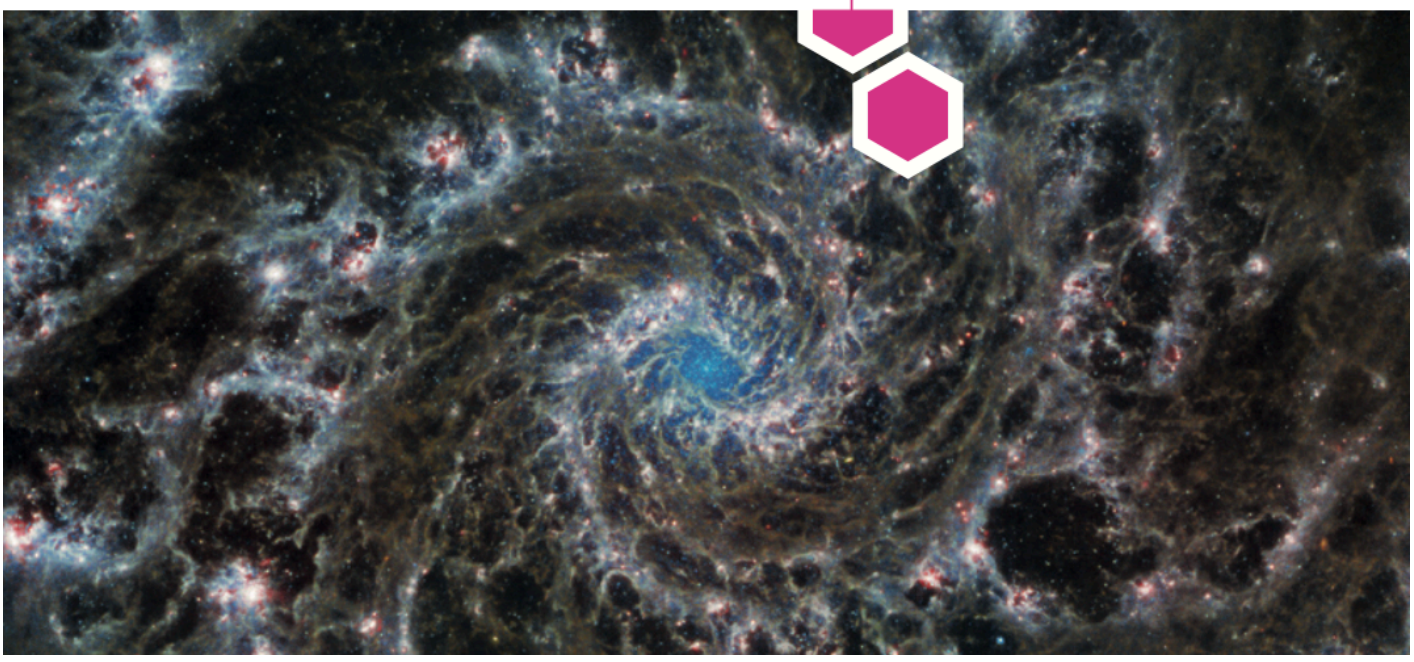
En 1800 el astrónomo William Herschel (descubridor del planeta Urano) se puso a medir con un termómetro los efectos térmicos de la luz de distintos colores. Separó luz solar en un bonito arcoíris por medio de un prisma y fue colocando el termómetro en las distintas franjas de color. El violeta tenía un efecto mínimo. El efecto aumentaba a medida que se avanzaba hacia el azul, el verde, el amarillo. Y era máximo al llegar al extremo rojo del arcoíris.

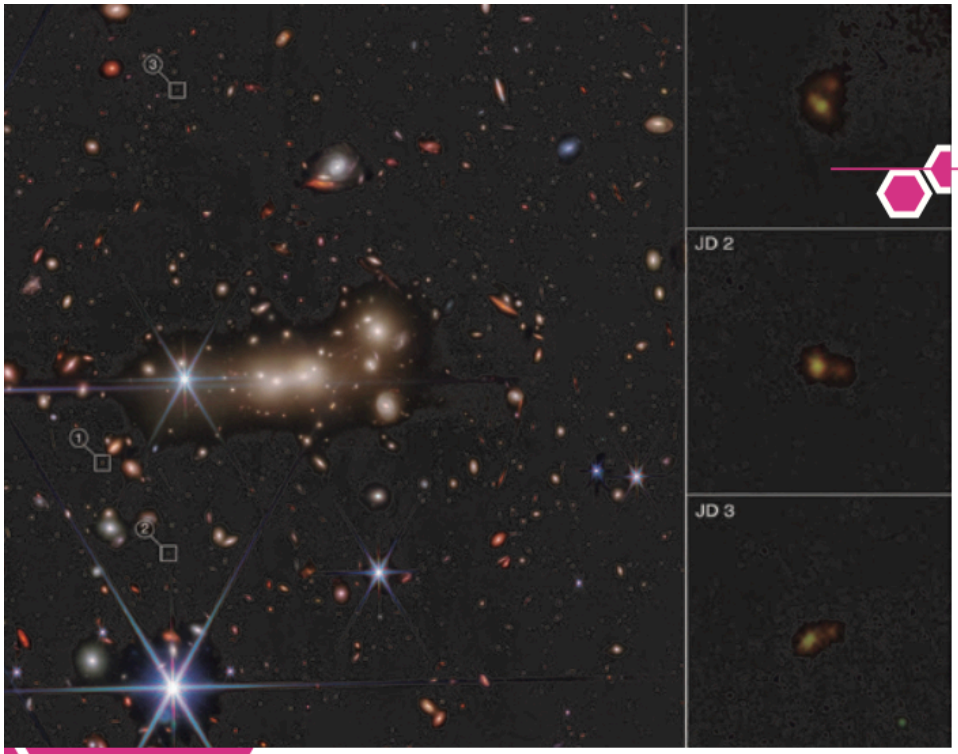
Ya encarrerado, Herschel fue y puso el termómetro más allá del rojo, donde sus ojos no veían nada. Se sorprendió de ver que el termómetro reaccionaba aún más: junto al rojo había una radiación que, pese a ser invisible, tenía efectos muy reales. Se le llamó "infrarroja" porque estaba por debajo del rojo en frecuencia (parámetro equivalente a la longitud de onda para caracterizar fenómenos ondulatorios).

Todas las cosas emiten algo de infrarrojo, dependiendo de su temperatura. Incluso las personas, por eso se pueden hacer esas fotografías térmicas

Montañas cósmicas, en la nebulosa de Carina, cámara NIRCam. Otra región de formación estelar, a 7 600 años luz en la nebulosa de Carina. Las estrellas del área azul de la imagen emiten intensa radiación ultravioleta y vientos estelares que dispersan el gas y el polvo y van erosionando las partes de gas más denso, dándoles la apariencia de montañas. Dentro de esas montañas hay estrellas más jóvenes que aún no se despojan del manto nebuloso. El proceso de formación estelar dura entre 50 000 y 100 000 años —un parpadeo en la escala de tiempo cósmico—. Los ocho picos que salen de las estrellas son un efecto óptico del telescopio. Imagen: NASA, ESA, CSA, STScI.

Galaxia M74 (la Galaxia Fantasma), cámara MIRI. La cámara MIRI revela aspectos ocultos de la galaxia M74, también conocida como la Galaxia Fantasma, situada a unos 32 millones de años luz. Los brazos espirales que estamos acostumbrados a ver en las fotografías en luz visible aquí se ven interconectados por filamentos de gas y polvo, que forman una especie de esqueleto de la estructura espiral. Los destellos rojos son regiones en las que se están formando estrellas. En el centro de la galaxia, la ausencia de polvo deja ver un cúmulo de estrellas jóvenes, en azul en la imagen. Estas imágenes servirán para entender mejor el proceso de formación estelar en galaxias relativamente cercanas y recientes. Imagen: NASA _ CSA, J. Lee and the PHANGS-JWST Team. Acknowledgement_ J. Schmidt.





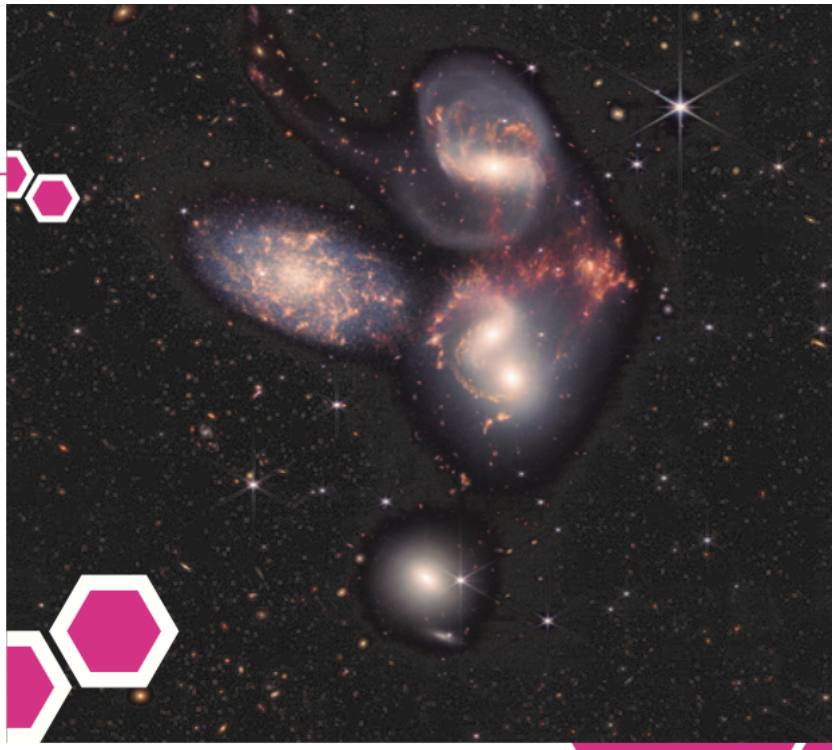
Lente gravitacional MACS0647 con triple imagen de una galaxia. La fuerza de gravedad desvía la luz, de modo similar a lo que hacen las lentes. Como si fuera un telescopio natural en el espacio, la gravedad del cúmulo de galaxias MACS0647 (centro de la imagen) permite ver galaxias aún más lejanas por el efecto de lente gravitacional. Los recuadros señalan tres imágenes distintas de una misma galaxia mucho más distante, que al aumentarse en esta imagen de la cámara NIRCam revelan dos objetos donde el Telescopio Hubble solo veía uno. Aún no sabemos qué son: ¿dos galaxias en interacción o dos cúmulos de estrellas en una galaxia? Imagen: SCIENCE- NASA, ESA, CSA, Dan Coe (STScI), Rebecca Larson (UT), Yu-Yang Hsiao (JHU) IMAGE PROCESSING- Alyssa Pagan (STScI).

que muestran un aura de colores alrededor de un cuerpo humano: es simplemente radiación infrarroja de distintas longitudes de onda. Muchas cosas interesantes en el espacio se ven mejor en infrarrojo que en luz visible. Las estrellas y planetas en formación están envueltos en nubes de gas y polvo. La luz visible, con sus ondas de escala nanométrica, rebota y es absorbida fácilmente por partículas de polvo y moléculas de gas, por lo que no puede escapar del interior de las nebulosa en las que nacen las estrellas, pero las ondas infrarrojas son mucho más grandes en comparación y esquivan sin dificultad estos obstáculos. Esto quiere decir que podemos atisbar en infrarrojo lo que ocurre detrás del velo de gas y polvo.

Lo que es todavía más interesante es que las primeras estrellas y galaxias que se formaron después del Big Bang (hace más de 13 000 millones de años) se pueden ver hoy en infrarrojo. La cosa funciona así: como la luz tarda cierto tiempo en ir de un lado a otro porque no se propaga a velocidad infinita, mientras más lejos echemos la mirada en el espacio, más antiguos serán los objetos que veamos (su luz ha tardado más en llegar hasta aquí). Y como el Universo se expande, la longitud de onda de la luz que originalmente emitieron esos objetos lejanos se ha ido estirando con el tiempo: lo que originalmente era ultravioleta o visible nos llega como infrarrojo.

El Telescopio Espacial James Webb no capta luz visible, sino infrarroja. De hecho, capta una gama de radiación 100 veces más amplia que la de la luz visible: ondas cuya longitud va de 0.6 micras a 28.3 micras. El James Webb tiene cuatro instrumentos para detectar radiación de distintas partes de esta banda de longitudes de onda (y muchos filtros que dividen la gama en franjas aún más angostas). En general, solo dos de estos instrumentos se usan para producir imágenes: las cámaras NIRCam (cámara de infrarrojo cercano, para longitudes de onda no muy alejadas del rojo, de 0.6 a 5 micras) y MIRI (instrumento para infrarrojo intermedio, de longitudes de onda de 5 a 28.3 micras).

Las imágenes que captan estos instrumentos no se pueden visualizar directamente por la misma razón que no podemos oír sonidos infrasónicos. Convertir en imágenes visibles los datos del telescopio requiere bastante manipulación. Volvamos a la foto térmica de una persona. La foto se toma con aparatos sensibles a la radiación infrarroja. En la foto, empero, vemos un aura de colores. Eso quiere decir que la imagen infrarroja original se ha modificado artificialmente para volver visible lo invisible. En concreto, la gama de infrarrojos que captó la cámara se transforma artificialmente en una gama de colores visibles. Es un poco como transportar una canción a un tono más alto para poderla cantar, o subirle la frecuencia a los sonidos infrasónicos que hacen los elefantes para poder oírlos. La foto térmica es una imagen intervenida, pero no por eso deja de representar una realidad física.



Quinteto de Stephan. Mosaico de más de 1 000 exposiciones de las cámaras MIRI y NIRCam. Este conjunto de galaxias en colisión se conoce como Quinteto de Stephan, aunque solo cuatro de las galaxias forman parte de esta danza cósmica, a 290 millones de años luz de nosotros. La galaxia de la izquierda está a solo 40 millones de años luz y no forma parte del grupo. La gravedad mutua de las galaxias les arranca filamentos de gas, polvo y estrellas en formación. Los especialistas en preparar imágenes asignaron tonos rojos y naranjas a las longitudes de onda de la cámara MIRI y azul y blanco a las de la NIRCam, lo que permite distinguir procesos distintos. Imagen: NASA, ESA, CSA, STScI.

Las fotos astronómicas que publican las agencias espaciales —y en particular las del Telescopio Espacial James Webb— son una cosa parecida. Los instrumentos de las sondas y telescopios espaciales están hechos para captar distintos tipos de radiación, según lo que le interese a los diseñadores de la misión. La información así capturada se puede representar de muchas maneras útiles para la ciencia: gráficas, espectros, imágenes en blanco y negro para ver contrastes, imágenes en una sola longitud de onda para aislar fenómenos específicos. Pero las fotos que ve el público son imágenes preparadas por un equipo especial, no para mostrar información científicamente útil sino para dar una idea general del panorama cósmico en cuestión y atendiendo a consideraciones estéticas. A veces se intenta representar lo que veríamos si estuviéramos ahí. Este es el caso de las fotos de la superficie de Marte que envía el vehículo explorador *Curiosity*, que se preparan tratando de darle al paisaje marciano los colores que vería el ojo humano. En el caso de las imágenes del James Webb esto es imposible, porque la radiación que captan sus cuatro instrumentos no está en el rango de la luz visible. Así pues, hay que asignar colores visibles a cada filtro de los instrumentos del telescopio. Pero tampoco se aplica simplemente el método que consiste en aumentarle la frecuencia a todo para llevarlo al rango visible. Las fotografías del espacio, además, suelen ser mosaicos, es decir, imágenes compuestas de muchas exposiciones individuales, incluso tomadas en días distintos. Así se prepararon estas imágenes que demuestran las capacidades del Telescopio Espacial James Webb.

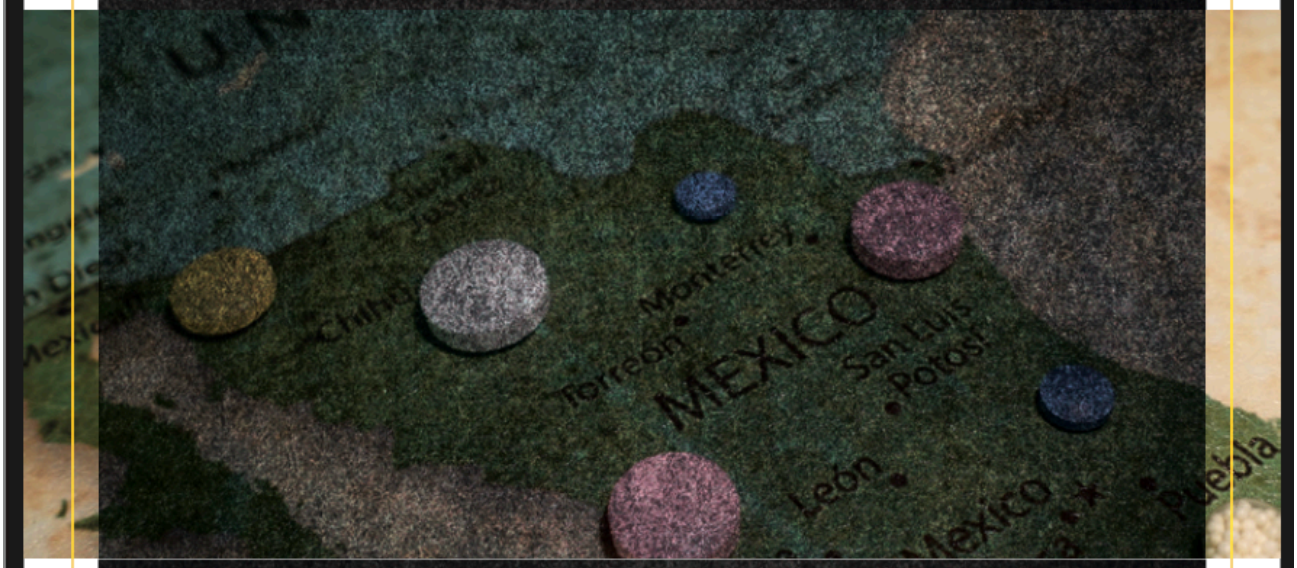
- "Los descubrimientos de nuestros telescopios espaciales", *NASANET*, NASA: www.lanasa.net/universo/telescopios-espaciales.
- Bachiller, Rafael, *Astronomía: de Galileo a los telescopios espaciales*, Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España, 2009.
- Golombek, Daniel, *El telescopio de las estrellas. El Hubble, los enormes observatorios y la astronomía del siglo XXI*, Editorial Siglo XXI, Argentina, 2015.

Sergio de Régules es divulgador de la ciencia y coordinador científico de *¿Cómo ves?* En 2019 ganó el Premio Nacional de Divulgación de la Ciencia y la Técnica otorgado por la Somedicyt y en 2021 el Premio Latinoamericano a la Popularización de la Ciencia y la Tecnología, otorgado por la RedPOP.

LECTURA 7. FENTANILO: adictivo y letal

FENTANILO: adictivo y letal

Por **Guillermo Cárdenas Guzmán**



8 ¿cómoves? | enero 2023

Utilizado ilegalmente como aditivo de otras sustancias como cocaína, heroína o cristal para potenciar sus efectos psicoactivos, este opiáceo sintético constituye una grave amenaza para la salud y la vida de los consumidores. Conoce los riesgos de esta droga cada vez más presente en nuestro país.

El 21 de abril de 2016 el famoso músico y cantante Prince Rogers Nelson, mejor conocido como Prince, fue hallado inconsciente en un elevador del edificio donde se alojaba su casa y estudio de grabación en Paisley Park, Chanhassen, Minnesota. Pese a los esfuerzos de los paramédicos, que le aplicaron maniobras de emergencia para reanimarlo, el artista estadounidense de 57 años falleció a los pocos minutos.

Dos años después del incidente, Mark Metz, un fiscal del estado de Minnesota encargado de investigar penalmente el caso, reveló que el también compositor y productor murió tras ingerir una sobredosis de una sustancia que él creyó que era Vicodin —un medicamento que contiene un opiáceo llamado hidrocodona, que le habían recetado como tratamiento contra el dolor— pero que en realidad era otra cosa: un analgésico falsificado mezclado con fentanilo. Lo mismo le ocurrió hace apenas cuatro meses a Melanie Ramos, de 15 años y estudiante de secundaria en California, al ingerir en un baño de su escuela parte de una pastilla que ella y una amiga creían que era Percocet, medicamento que contiene el opiáceo oxicodona y también se vende ilegalmente como droga. La pastilla que compartieron Melanie y su amiga, quien sobrevivió, estaba falsificada y mezclada con fentanilo.

En Estados Unidos estos casos de sobredosis letal con fentanilo y otros opiáceos sintéticos van en aumento: los Centros de Prevención y Control de Enfermedades (CDC) estiman que más de 105 000 personas murieron así entre 2020 y 2021. Esta epidemia

Flickr/Ted McGrath CC BY 2.0.

Shutterstock/Darwin Brandis

Laboratorio clandestino de drogas.

de consumo ha propiciado que la Agencia Antidrogas (DEA) considere estas sustancias una seria amenaza a la salud y la seguridad pública en ese país.

Con el tráfico legal e ilegal de personas y mercancías entre Estados Unidos y México no resulta extraño que en varias zonas de la línea fronteriza y también en nuestro país haya comenzado a registrarse una tendencia similar en el uso y abuso de esta droga "de moda", situación que pone en gran riesgo a poblaciones de por sí vulnerables y que ha llevado a numerosos expertos en salud pública y adicciones a lanzar un llamado de alerta.

En la frontera de la ilegalidad

A diferencia de sustancias como la morfina, la codeína y la heroína, que se obtienen a partir del opio extraído de la cápsula de la amapola o adormidera, el fentanilo puede fabricarse en un laboratorio sin necesidad de la planta, mediante procedimientos químicos relativamente simples. Por esta razón está clasificado —con otros fármacos análogos— como un opiáceo sintético. Un fármaco o una droga análogos son aquellos que tienen una estructura o forma de acción muy semejante a los originales, aunque su origen es diferente.

Al igual que la morfina o la heroína, el fentanilo tiene efectos analgésicos. La industria farmacéutica lo produce legalmente con distintas denominaciones comerciales, y se utiliza en la práctica clínica para anestesiar y tratar el dolor agudo, sobre todo después de una cirugía, aunque llega a usarse también contra el dolor crónico.

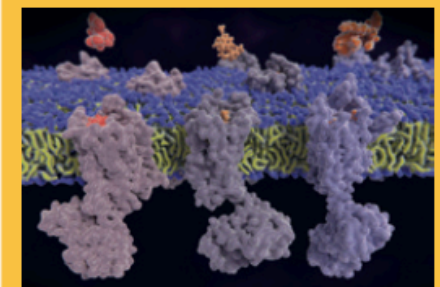
Sin embargo, aun en cantidades ínfimas esta sustancia puede tener efectos adversos graves. Apenas 2 miligramos (algo así como la vigésima parte de un grano de sal) pueden resultar letales. Este riesgo viene por partida doble: ya sea debido al abuso de este y otros opiáceos cuando son administrados con fines médicos (véase *¿Cómo ves?*, núm. 125) o bien por su consumo ilegal con fines recreativos.

El panorama se complica porque los productores y traficantes de drogas ilegales están utilizando el fentanilo como aditivo de otras sustancias, entre ellas heroína, cocaína y metanfetaminas. Añadir fen-

Opioides

Los opiáceos naturales y sintéticos en conjunto se denominan "opioides". Estas sustancias actúan sobre el sistema nervioso central y el cerebro. Sus efectos son variados: analgesia, anestesia, sedación, euforia, disminución de la tos y de la movilidad del tracto gastrointestinal. A dosis altas causan insuficiencia respiratoria.

Los opioides tienen efectos similares a unas sustancias presentes en nuestro cerebro denominadas endorfinas, que intervienen en los procesos de señalización en nuestras neuronas y mitigan el dolor y desencadenan las sensaciones de euforia, felicidad y tranquilidad asociadas con actividades como el ejercicio físico intenso, la meditación, la risa o el masaje (véase *¿Cómo ves?*, núm. 29). El uso de drogas opiodes va disminuyendo la producción de endorfinas en el cerebro, con lo cual quien las consume queda desprotegido frente al dolor y necesita cada vez más cantidad de droga, ya no para sentir euforia sino para dejar de sufrir.



Receptores de opioides en el cerebro y opioides endógenos, es decir producidos naturalmente por nuestro cuerpo. Hay al menos tres grupos de opioides endógenos: endorfinas, encefalinas y dinorfinas.
Shutterstock/Juan Gaertner.

tanilo a otras drogas potencia sus efectos eufóricos y adictivos, al tiempo que disminuye costos a los productores, que requieren menores cantidades para preparar las dosis.

"Los opiáceos se han utilizado desde hace muchos años, sobre todo en cirugía, en el tratamiento de traumatismos, en los cuidados paliativos y en la atención del cáncer. Por lo general son medicamentos seguros cuando se toman por cortos periodos y siguiendo las indicaciones del médico", comenta Alfredo Camhaji Samra, integrante del Seminario de Estudios sobre Globalidad de la UNAM.

Como además de su efecto analgésico generan euforia, muchas veces los opiáceos se usan en forma inapropiada, a dosis mayores que las indicadas por el médico o sin receta, dice Camhaji. Y en el caso del fentanilo, cuando se mezcla con otras drogas las vuelve más potentes, más eficaces y de acción más rápida, "por eso es tan popular y de ahí la gran demanda que se ha observado en los últimos años".

Al no existir control sobre las cantidades de fentanilo añadidas a las drogas base —y con frecuencia sin que el propio consumidor sepa que está ingiriendo este aditivo— los casos de muertes repentinas por sobredosis son cada vez más comunes.

Buena parte de los fallecimientos por sobredosis que se registran cada año en Estados Unidos ocurre debido a esta sustancia, según el Instituto Nacional para el Abuso de Drogas.

En México hay poca información sobre la prevalencia del uso del fentanilo. Tampoco existen datos epidemiológicos sobre muertes relacionadas con este, a pesar de que en los últimos años el país —junto con China, de donde provienen los precursores químicos— se ha convertido en una de las principales fuentes de abastecimiento de esa droga para Estados Unidos. No obstante, diversas organizaciones civiles, investigadores y autoridades sanitarias han encontrado, mediante distintos estudios, que en varias ciudades de las zonas fronterizas del norte se concentran los mayores niveles de demanda y consumo abusivo.

Daño exponencial

Silvia Lorenia Cruz Martín del Campo, especialista en neurobiología de las adicciones del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav), explica que el mayor riesgo asociado con el consumo de fentanilo no estriba tanto en que su pureza sea alterada en los procesos de fabricación clandestina sino en su potencia: una dosis de fentanilo tiene los efectos de una cantidad diez veces mayor de heroína y 100 veces mayor de morfina.

A esto se suma el hecho de que el consumo regular de opiáceos puede generar tolerancia y dependencia y conducir a la adicción, ya que estas sustancias actúan sobre los centros cerebrales que regulan el dolor y las emociones, razón por la cual los usuarios buscan ingerirlos una y otra vez para experimentar nuevamente sensaciones placenteras.

Derivados fentanílicos

De acuerdo con la Agencia Antidrogas de Estados Unidos (DEA) el carfentanilo es una sustancia 10 000 veces más potente que la morfina y 100 veces más que el fentanilo. Es un opiáceo sintético que se utiliza en veterinaria para sedar elefantes y se ha llegado a mezclar ilegalmente con cocaína y heroína.

En 2002 en un teatro de Moscú, Rusia, terroristas chechenos tomaron como rehenes a 850 personas. Las fuerzas especiales que acudieron al teatro introdujeron en el sistema de ventilación un aerosol que contenía carfentanilo y remifentanilo, otro derivado del fentanilo que se emplea como anestésico. Como resultado más de 600 personas tuvieron que ser hospitalizadas y 127 fallecieron. En febrero de 2022 en Argentina murieron 24 personas por consumir cocaína adulterada con carfentanilo.

Shutterstock/Badon Hill Studio

Uso clínico del fentanilo.

Si necesitas ayuda ponte en contacto con
Línea de la vida

Brinda atención personalizada a la población sobre los problemas asociados al consumo de sustancias psicoactivas y de salud mental.

Llama al 01800 911 2000

De acuerdo con Cruz Martín del Campo, además de ocasionar la muerte con dosis ínfimas, el fentanilo puede matar en forma inmediata; en algunos casos los usuarios fallecen con la jeringa en la mano al momento de inyectarse el coctel explosivo que contiene mezclada esta sustancia.

Es complicado saber si una sobredosis fue provocada por fentanilo u otras drogas mezcladas, pero sabemos que con el fentanilo la respiración puede ralentizarse o detenerse, lo que disminuye la cantidad de oxígeno que llega al cerebro. Esta condición, conocida como hipoxia, a su vez puede producir un estado de coma, daño cerebral permanente y la muerte.

Una vez introducido al torrente sanguíneo, el fentanilo atraviesa la barrera hematoencefálica —la red de vasos sanguíneos que permite o impide que ciertas sustancias pasen de la sangre al cerebro— y alcanza el tallo cerebral, una región que regula entre otras cosas la respiración. "Las neuronas que detectan la presencia de dióxido de carbono dejan de funcionar, se quedan 'adormecidas', la gente deja de respirar y muere al instante", subraya la especialista en farmacología conductual.

En el Hospital General de Massachusetts, de la Escuela Médica de la Universidad Harvard, se hizo un estudio sobre los efectos del fentanilo en el cerebro con 25 pacientes anestesiados que estaban en cirugía. Durante el procedimiento se registró la actividad eléctrica del cerebro de los pacientes y se encontró que el fentanilo deja en el electroencefalograma una huella distinta a la de cualquier otro anestésico. Además se halló que esta droga actúa a concentraciones cerca de 2 000 veces menores que las de otros anestésicos y empieza a afectar la respiración minutos antes de que haya alguna señal de alarma. "Detiene la respiración antes de que la gente se dé cuenta de que algo está pasando... por eso es tan mortal", dijo Patrick L. Purdon, uno de los autores del estudio, realizado este año y publicado en la revista científica *PNAS Nexus*.

Shutterstock/Thomas Andre Fure

La punta del iceberg

Aunque muchos países —incluido México— han establecido controles locales para prohibir el fentanilo y sus derivados, en la práctica se siguen fabricando nuevos análogos. La producción a bajo costo también favorece la introducción de distintas variedades de fentanilo, como explicó Gady Zabicky, titular de la Comisión Nacional contra las Adicciones durante un foro celebrado en 2022 en la Cámara de Senadores: "no es nada más uno, es una familia de sustancias (psicoactivas) afines que son muy adictivas, capaces de generar sobredosis, que son muy baratas y que están altamente disponibles".

Los productores y traficantes ilegales introducen fentanilo y sus derivados con estrategias de promoción que los hacen parecer inocuos y atractivos, por ejemplo al fabricarlos con formas de caramelo o pastillas de colores, como hacen ahora con el llamado fentanilo "arcoíris".

Otra gran preocupación acerca de estos opiáceos sintéticos es que se comercializan no solo a través de los canales que regularmente utilizan los traficantes de drogas, sino también mediante empresas de paquetería o sistemas de comercio electrónico en la red oscura (*dark web*).

Contener la amenaza

Clara Fleiz Bautista, investigadora del Instituto Nacional de Psiquiatría Juan Ramón de la Fuente, es coautora del libro *Cuqueando la chiva, contextos del consumo de heroína en la frontera norte de México* (2019). Esta investigación, que analizó muestras y entrevistó a mil usuarios de drogas en las ciudades de Tijuana, San Luis Río Colorado y Ciudad Juárez, documenta cómo se combinan con el fentanilo sustancias como la heroína y el cristal, principalmente.

"En el último estudio que hicimos en la frontera encontramos que en México ya no solo se vende

la droga conocida como *China white* (fentanilo y heroína en polvo), sino que están circulando unas pastillas llamadas M30 que igualmente contienen fentanilo." Ya se han reportado sobredosis en niños y jóvenes por el consumo de estas pastillas M30 en Tijuana, dice Fleiz. "Y me preocupa mucho el poco eco que está teniendo entre las autoridades de salud la forma en que se va expandiendo este problema, que denunciamos desde 2019 y no ha pasado nada."

Ante este peligro, muchos expertos en salud mental han propuesto medidas como aplicar sistemas de vigilancia epidemiológica temprana para detectar nuevas drogas psicoactivas, además de regularizar el uso de la naloxona —un medicamento no disponible en México— que contrarresta los efectos de la sobredosis por opiáceos, incluidos la heroína, el fentanilo y otros análogos.

En forma paralela, es necesario erradicar la estigmatización que sufren los consumidores de estas drogas, no solo la social sino muchas veces también la médica en los centros de atención y los hospitales, que llegan a darle prioridad a otros pacientes sobre las personas que, alegan, son adictas "por su propia voluntad", denuncia la investigadora Claudia Rafful Loera, de la Facultad de Psicología de la UNAM.

En esas condiciones, "buscar ayuda puede ser muy complejo, porque la persona se siente devaluada y generalmente ha tenido experiencias complicadas en los servicios de salud".

Rafful señala que para atajar este problema resulta vital no sólo considerar la mortalidad asociada con dichas sustancias opiáceas sino todos los daños que se derivan de su consumo: alta prevalencia de enfermedades como hepatitis C o infección con VIH —virus causante del sida— por el uso de jeringas compartidas, conflictos sociales, desintegración familiar y baja o nula productividad laboral.

Flickr/DEA, dominio público

En la parte económica, comenta Alfredo Camhaji, "quizá es momento de aplicar un cambio de estrategia que ya no se centre tanto en el combate a la producción de drogas y la estigmatización de los usuarios, sino en el control de las redes de lavado de dinero que permiten florecer a este negocio ilícito".

Fleiz, por su parte, advierte que con este tipo de drogas no hay margen para experimentar en la búsqueda de nuevas sensaciones placenteras, como hacen muchos jóvenes al acudir a un festival de música, a un antro o una reunión: "Mi mensaje para ellos sería rotundo: con el fentanilo no pueden buscar estas sensaciones, porque se pueden encontrar con la muerte."

- Medina-Mora María Elena, "Consumo de opioides en la frontera norte de México y retos actuales para la construcción de políticas pública en salud", *El Colegio Nacional*: https://colnal.mx/agenda/consumo-de-opioides-en-la-frontera-norte-de-mexico-y-retos-actuales-para-la-construccion-de-politicas-publicas-en-salud/
- Volkow, Nora, "Efectos de las drogas en el cerebro humano y relevancia en los estados de comorbilidad", International Society of Substance Use Professionals, en: https://www.issup.net/node/4597.

Guillermo Cárdenas Guzmán es periodista especializado en temas de ciencia, tecnología y salud. Ha laborado en diversos medios de comunicación electrónicos e impresos, como los diarios *Reforma* y *El Universal*. Recibió el Premio Jorge Flores Valdés al mejor artículo o reportaje de ciencia publicado en 2021. Actualmente es colaborador de *¿Cómo ves?*

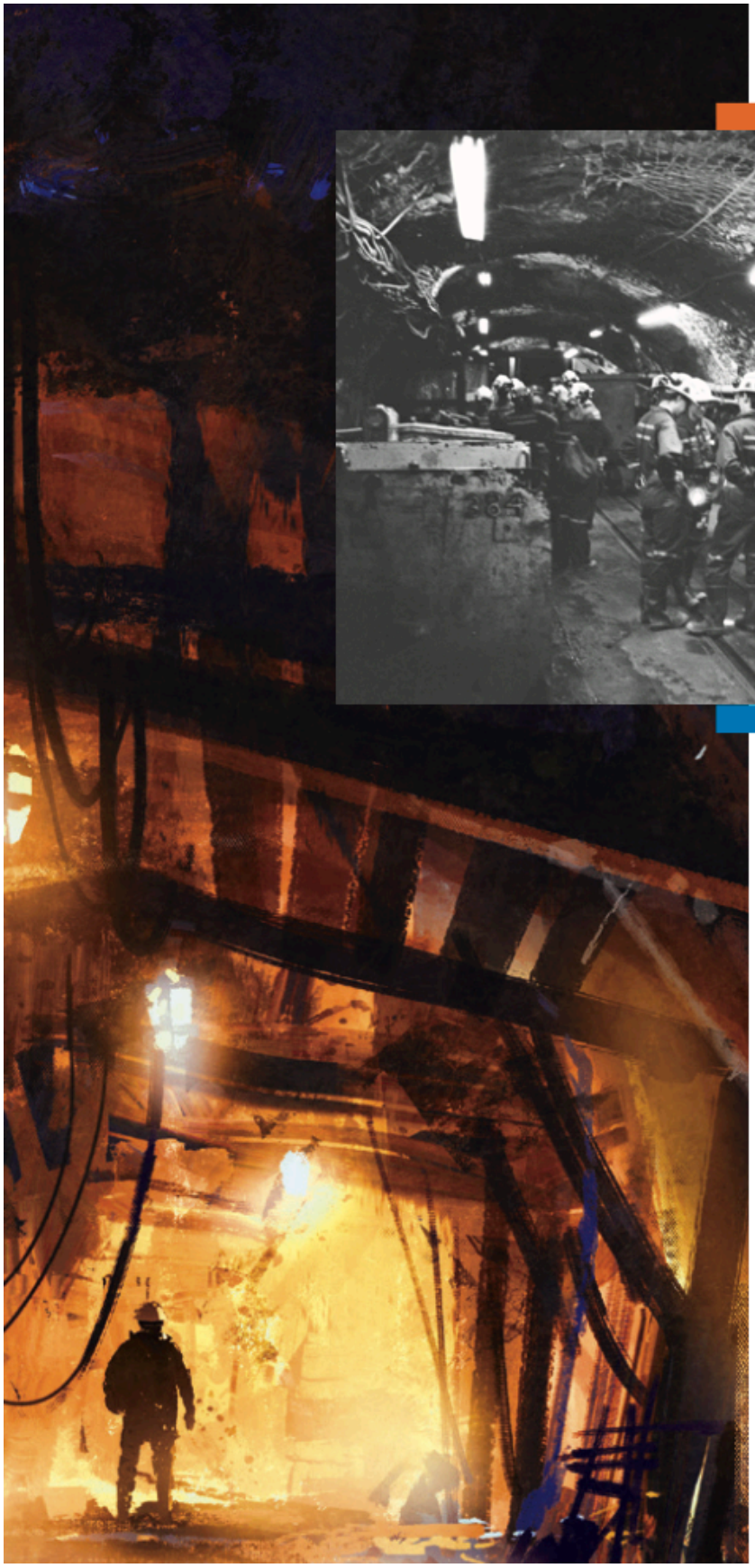
LECTURA 8. Susurros del Universo bajo tierra: el SNOLAB

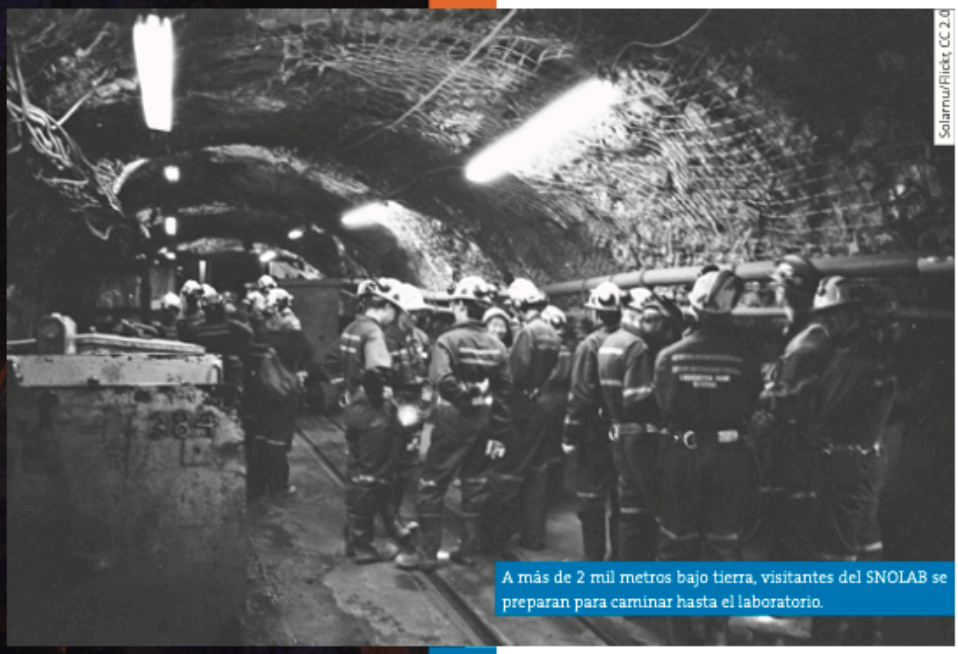
Susurros del Universo bajo tierra: el SNOLAB

Por **Adiv González Muñoz**

Algunos fenómenos cósmicos solo se pueden estudiar en instalaciones subterráneas construidas dentro de minas o bajo las montañas

Tithi Luadthong/Shutterstock





Solarmu/Flickr, CC 2.0

A más de 2 mil metros bajo tierra, visitantes del SNOLAB se preparan para caminar hasta el laboratorio.

Las instrucciones eran claras y directas: "Una vez en el elevador, deben quedarse en su lugar, no encender lámparas, no tomar fotos ni videos y mantener las manos pegadas al cuerpo." No sé si era por el overol de lona que nos dieron para bajar a la mina o los nervios, pero ya en ese punto estaba sudando, aunque seguía sentado en la sala de espera. Iba con un grupo de físicos como parte de las actividades de un congreso sobre astropartículas y física en laboratorios subterráneos. A algunos se les notaba que no era la primera vez que hacían este viaje porque parecían relajados, al contrario de los que íbamos por primera vez. De un pasillo salió un grupo de mineros, y nos avisaron que era nuestro turno.

Estudios profundos

El elevador parecía una jaula con espacios horizontales entre placas metálicas: por eso lo de mantener las manos pegadas al cuerpo. Nos fuimos acomodando hasta quedar apiñados, porque junto con mi grupo de físicos venía otro de mineros. Se cerró una reja y empezó el descenso. El elevador no tenía iluminación y de inmediato nos sumergimos en la oscuridad. Al principio parecía que no íbamos muy rápido, pero la corriente de aire que entraba y el ruido del roce del elevador con las guías empezaron

Departamento de Energía de Estados Unidos/Flickr

Instrumento del experimento SuperCMDS (Búsqueda Criogénica de Materia Oscura, por sus siglas en inglés).

a subir de intensidad. Estábamos acelerando. En medio de esa oscuridad y ruido apenas pude distinguir las voces de algunos mineros mientras trataba de no pensar que colgábamos dentro de un agujero de dos kilómetros de profundidad. Me hallaba en camino al SNOLAB, el laboratorio más profundo del mundo, un ambiente aislado del ruido de la superficie en el que se estudian los neutrinos y la materia oscura para entender la estructura del Universo.

El SNOLAB toma su nombre del primer experimento que se instaló ahí, llamado SNO, siglas en inglés de Observatorio de Neutrinos de Sudbury (el laboratorio está cerca de esa ciudad, en Canadá). Los neutrinos son partículas subatómicas sin carga eléctrica y con una masa extremadamente pequeña que se crean en reacciones nucleares dentro de las estrellas, incluido el Sol, así como en reactores nucleares y en la interacción de radiación proveniente del espacio con la atmósfera. Los neutrinos interactúan con la materia tan débilmente que una de estas partículas podría atravesar un bloque de plomo de más de un año luz (9.5 billones de kilómetros) de espesor sin interactuar con el material.

Detectar neutrinos es como grabar el canto de un ave que rara vez se deja ver en el bosque. Podemos tener mucha paciencia y esperar a que un ejemplar se acerque a nuestro micrófono, o podemos distribuir muchos micrófonos por el bosque. El problema es que esos micrófonos grabarán todo lo que suceda en el entorno y será difícil distinguir el canto del ave que nos interesa en medio de todo el ruido. La cosa cambia si hay un lugar al que solo pueda llegar esa ave y nadie más. Ese lugar es el SNOLAB.

Tras el descenso todavía tuve que recorrer a pie un túnel de varios cientos de metros para llegar al laboratorio. En ese túnel se sentía algo de calor, como cuando estás en una habitación que ha estado expuesta al sol todo el día. Al caminar observaba las paredes de roca desnuda tratando de dimensionar lo inusual de ese ambiente. Estábamos rodeados de kilómetros de roca, bajo una presión atmosférica 20% mayor de la que hay al nivel del mar y en un ambiente prácticamente libre de rayos cósmicos, que son uno de esos "ruidos" que dificultan detectar neutrinos en la superficie.

Los rayos cósmicos son un tipo de radiación que tiene su origen en fenómenos muy energéticos en el Universo: llamaradas solares, muerte de estrellas en forma de supernovas, las inmediaciones de agujeros negros. Cuando esta radiación llega a nuestra atmósfera choca con los átomos del aire y produce partículas secundarias, que a su vez pueden producir más partículas en un efecto en cascada que puede alcanzar la superficie de la Tierra. Prácticamente cualquier detector de radiación en la superficie terrestre es sensible a los rayos cósmicos, y cualquier medición de radiación tiene que tomar en cuenta ese ruido de fondo. Pero a dos kilómetros bajo tierra el flujo de rayos cósmicos se reduce 50 millones de veces, mientras que el flujo de neutrinos se mantiene prácticamente inalterado.

Los detectores de neutrinos actuales son enormes depósitos de agua o algún líquido especial. Si un neutrino acierta a interactuar con el líquido se produce un destello que se capta por medio de una extensa red de detectores distribuidos en las paredes del tanque. El problema es que ese destello también lo pueden producir los rayos cósmicos y los elementos radiactivos. Lo primero se resuelve instalando esos detectores bajo miles de metros de roca. Lo segundo requiere otro tipo de medidas.

Plomo antiguo

Antes de visitar el SNOLAB le pregunté a un amigo sobre su experiencia trabajando ahí. Lo primero que me dijo fue: "para entrar te van a quitar hasta los calzones". Yo creí que era broma, pero no: en estos laboratorios la limpieza es esencial, porque hay ex-

perimentos que no solo necesitan estar protegidos de los rayos cósmicos, sino también del polvo del aire y el que una persona pudiera traer encima. Así pues, para ingresar hay que dejar toda la ropa en un casillero, incluyendo los calzones, darse una ducha completa y luego ponerse ropa y calzado provistos por el laboratorio. El problema no es el polvo en sí, sino las trazas de elementos radiactivos que contiene, como todo lo que nos rodea y hasta nuestro propio cuerpo.

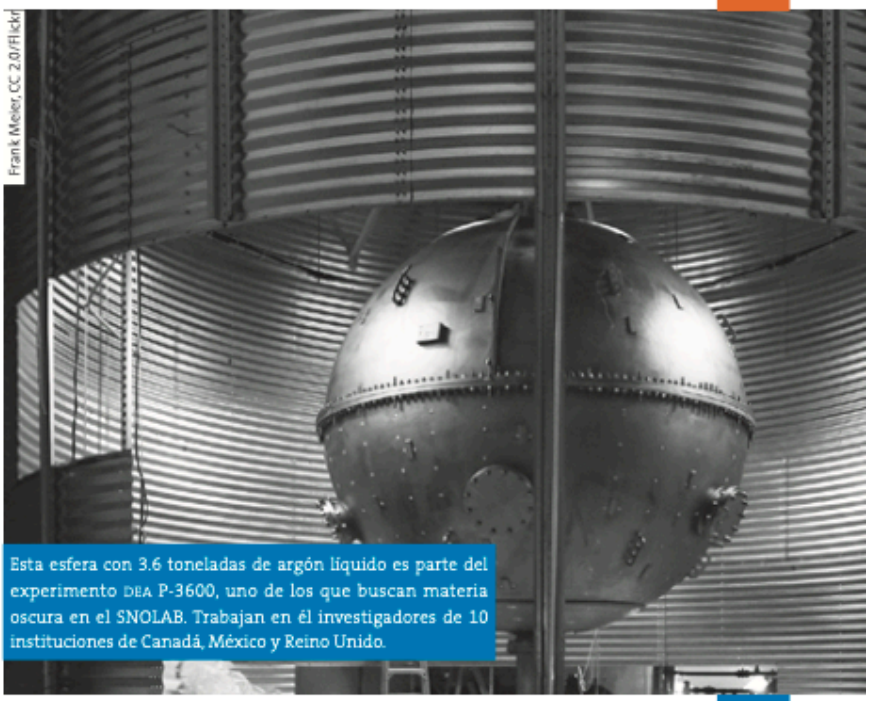
Medir la presencia de elementos radiactivos en una muestra puede ser complicado precisamente porque estamos inmersos en un flujo continuo de radiación. Sería como oír un susurro en un concierto de rock. Para hacer esas mediciones, la muestra y el detector se tienen que rodear de algún tipo de blindaje, por ejemplo de plomo. Pero el plomo también tiene un isótopo radiactivo, y hay experimentos que no toleran ni siquiera ese nivel de radiación.

El isótopo radiactivo del plomo tiene una vida media (tiempo que tarda su radiactividad en reducirse a la mitad) de 22 años. Una muestra de plomo extraída de la Tierra y que no haya estado expuesta a la atmósfera desde hace miles de años ya habrá perdido gran parte de su radiactividad. Para fortuna de los físicos, los antiguos romanos ya usaban el plomo de forma industrial y lo llevaban de un lado a otro entre sus colonias por mar. En el fondo del Mediterráneo hay barcos hundidos con plomo que ha estado bajo el mar cerca de 2 000 años. Por supuesto, usar ese plomo causa conflictos con los arqueólogos, ya que todo lo encontrado en un naufragio tiene un valor histórico. Pero se han alcanzado acuerdos para que el plomo pueda utilizarse y al mismo tiempo estudiarse con el fin de extraer información útil para los arqueólogos, por ejemplo, cuándo se extrajo y de dónde.

La búsqueda de lo invisible

El experimento que yo quería ver era el SNO+: una esfera de 17 metros de diámetro con 9 600 sensores de luz apuntando hacia una esfera interna de acrílico. La esfera interna contenía un líquido que brillaba cuando lo atravesaba un neutrino. Pero solo nos dejaron ver el centro del control: una sala con varias pantallas desde donde se vigila lo que pasa en el aparato.

El SNOLAB alberga también varios experimentos dedicados a buscar la materia oscura. Sabemos que la materia oscura existe gracias a


Frank Meier, CC 2.0/Flickr

Esta esfera con 3.6 toneladas de argón líquido es parte del experimento DEA P-3600, uno de los que buscan materia oscura en el SNOLAB. Trabajan en él investigadores de 10 instituciones de Canadá, México y Reino Unido.

que ejerce una influencia gravitacional en estrellas y galaxias enteras (véase *¿Cómo ves?* núm. 290). Al principio los astrónomos creían que era un tipo de materia que no emitía ni reflejaba luz, y por eso la llamaron "oscura". Pero en realidad es totalmente invisible. No se sabe qué tipo de partículas la componen ni si estas interactúan con la materia ordinaria más allá de la gravedad. No es un problema menor: 84 % de la materia que ejerce fuerza gravitacional en el Universo es materia oscura. Se ha propuesto que podría estar constituida por partículas muy pesadas (hasta miles de veces la masa del protón); así, dominarían gravitacionalmente el Universo, pero interactuarían con la materia tan débilmente como los neutrinos. Por eso el SNOLAB es un lugar ideal para intentar la detección de materia oscura.

Cuando un experimento está en operación no es mucho lo que se puede ver, precisamente porque los aparatos están rodeados de blindaje. Solo se aprecia una maraña de cables conectados a computadoras. Pero en aquella visita tuve la fortuna de que estaban desmontando un experimento de detección de materia oscura llamado PICO-60, por lo que pude ver sus componentes. Lo primero que resaltaba era un tanque cilíndrico de acero de un par de metros de diámetro y tres metros de altura. A un costado, colgado de un soporte de metal, había un recipiente de cuarzo de un poco

SNO/Lawrence Berkeley National Laboratory/Roy Kaltschmidt/Flickr, CC 2.0

Miles de detectores del experimento SNO+ captan neutrinos cuando chocan contra una molécula del líquido especial que contiene.

más de un metro de largo y unos 30 centímetros de ancho. Nuestros anfitriones nos explicaron que el recipiente se llena de un líquido transparente y se coloca dentro de un cilindro de acero equipado con cuatro cámaras de video y sensores de audio, el cual se rellena de un aceite especial. Esto se sella a presión y el montaje completo se mete en el tanque, el cual contiene agua que se utiliza como escudo contra la radiación. Lo que se espera detectar no es un pulso de luz ni una señal eléctrica, sino una burbuja. El líquido del recipiente de cuarzo se somete a una presión y temperatura tales que cualquier perturbación lo puede poner a "hervir", esto es, hacer que se formen burbujas. Así, en teoría, cuando una partícula de materia oscura choque contra un núcleo atómico del líquido, este saldrá disparado, provocando una burbuja. Pero aún más interesante es que, además de ver la burbuja, se podrá escuchar cómo se forma: distintos tipos de radiación hacen que en ese proceso la burbuja haga un ruido diferente. Así se podría seleccionar el tipo de eventos que se quiera por el sonido.

Otros laboratorios subterráneos

Además del SNOLAB hay otros laboratorios en el mundo donde se ha aprovechado la infraestructura de una mina. Uno de los primeros, en 1968, fue el experimento Homestake, llamado así por el nombre de una mina en Dakota del Sur. Ahí, a 1 500 metros bajo tierra, se instaló un enorme tanque con 400 000 litros de un compuesto de cloro para detectar neutrinos provenientes del Sol. La técnica de detección se basaba en que los neutrinos propician la conversión de átomos de cloro en átomos de argón. Midiendo la proporción de argón a cloro se podía estimar la cantidad de neutrinos que habían interactuado en el tanque.

En otra mina, en Kamioka, Japón, a 1 000 metros de profundidad, se instaló un experimento llamado Kamiokande. Originalmente era para estudiar la estabilidad del protón, es decir, lo que tardaba esta partícula en desintegrarse, pero luego se adaptó para estudiar neutrinos solares. En 1987 una supernova hizo explosión en la Gran Nube de Magallanes, a 160 000 años luz de la Tierra. Cuando los científicos del Kamiokande analizaron sus datos vieron que la cuenta de neutrinos había dado un salto abrupto casi al mismo tiempo que se observó la luz de la supernova; es decir, habían detectado neutrinos que venían de ese cataclismo. Hoy en día se está construyendo en el mismo sitio el que será el detector de neutrinos más grande del mundo, el Hyper-Kamiokande.

Pero no solo en minas se construyen laboratorios subterráneos. A 120 kilómetros de Roma, Italia, hay una autopista que pasa por debajo de una montaña. A la mitad de este túnel, bajo 1 400 metros de roca, está la entrada al que actualmente es el laboratorio subterráneo más grande del mundo, el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, con 180 000 metros cúbicos de espacio para experimentos que detectan neutrinos y buscan materia oscura. Hay otros laboratorios subterráneos en Inglaterra, en la frontera de España y Francia, en India y en China. En nuestro continente solo Estados Unidos y Canadá tienen laboratorios subterráneos, pero para Latinoamérica ya hay un par de propuestas.

El proyecto ANDES

En la frontera entre Chile y Argentina se ha proyectado la construcción de un túnel que pasaría por debajo de una montaña de la cordillera de los

Andes, facilitando el tránsito vehicular entre estas naciones. Aprovechando este proyecto se ha propuesto que en la parte más profunda del túnel se construya un laboratorio: el Agua Negra Deep Experiment Site (ANDES). Estaría bajo 1 750 metros de roca y tendría un espacio de 33 000 metros cúbicos para experimentos. De construirse, sería el primero de este tipo en Latinoamérica.

Se ha propuesto que el ANDES sea un laboratorio internacional en el que, además de Argentina y Chile, participen otras naciones. Científicos e instituciones de Brasil y México ya han manifestado su interés. Pero una instalación así de grande y costosa no escapa de los vaivenes de la política, y actualmente la construcción del túnel está en pausa, con riesgo de que se cancele definitivamente.

Investigación y turismo científico en Hidalgo

En México ya está en marcha el proyecto para construir un primer laboratorio de este tipo: el Laboratorio Subterráneo de Mineral del Chico (LABChico), en Hidalgo. Comparado con el ANDES es un proyecto mucho más modesto: contará con 125 metros cúbicos de espacio al final de un túnel horizontal de 150 metros, con una cobertura de tierra y roca de 100 metros. Ahí se podrán hacer mediciones de muestras de agua o de materiales de uso común que se sospeche que tengan elementos radiactivos. También se podrán caracterizar las trazas de elementos radiactivos en componentes que se utilicen en experimentos de neutrinos y búsqueda de materia oscura.

La mina en la que se construirá el LABChico es uno de los puntos turísticos de Mineral del Chico, un antiguo pueblo minero. La comunidad local se ha interesado en el proyecto porque el laboratorio podría ser un atractivo más de la región. Por ello su diseño contempla que los visitantes lo puedan

Super-Kamiokande/Flickr, CC 2.0

Interior del Super-Kamiokande.

ver a través de una ventana desde el interior del túnel. Con esto se espera despertar la curiosidad y fomentar el interés en la ciencia.

Cuando volví al hotel me sentía muy cansado, como si hubiera hecho senderismo en una montaña. Este es uno de los efectos de estar bajo más de un kilómetro y medio adicional de atmósfera. Recostado en un sillón, seguía pensando en lo inusual de aquel ambiente, debajo de tanta roca, tan aislado y avanzado tecnológicamente, protegido de radiación con la que convivimos todos los días, con aire tan limpio como el de pocos lugares y con experimentos que podrían verse amenazados por ropa interior no autorizada. Pero solo así es posible oír los susurros del Universo que nos pueden contar más sobre su composición y su estructura.

- Agencia Sinc, "El detector Super-Kamiokande espera la llegada de neutrinos de una supernova": www.agenciasinc.es/Noticias/El-detector-Super-Kamiokande-espera-la-llegada-de-neutrinos-de-una-supernova
- De la Fuente, Luciana, "LABChico: el primer laboratorio subterráneo en México", UNAMGlobal: https://unamglobal.unam.mx/labchico-el-primer-laboratorio-subterraneo-en-mexico/

Adiv González Muñoz es físico por la Universidad Veracruzana, maestro en ciencias por la UNAM y doctor en física por la Universidad Autónoma de Barcelona. Fue investigador postdoctoral en el Instituto de Física de la UNAM, trabajando en el observatorio de rayos cósmicos HAWC y en proyectos de detección de radiación y materia oscura.

LECTURA 9. Los límites del Planeta

Fotos: Shutterstock

El impacto de las actividades humanas en la Tierra ha puesto en riesgo la existencia de numerosas especies, entre ellas la nuestra. Si queremos un espacio seguro para nosotros y las generaciones venideras no hay tiempo que perder.

No creo que tengas la menor duda de que los seres humanos estamos afectando el funcionamiento de la Tierra como ninguna otra especie. Construimos espacios inorgánicos gigantescos a los que llamamos ciudades, generamos toda clase de sustancias químicas antes inexistentes (por ejemplo, los clorofluorocarbonos), movemos materia y energía de un continente a otro: la lista de nuestros impactos es extensa. Nos hemos convertido en el principal motor global, rebasando con mucho la influencia de factores naturales de cambio como las erupciones volcánicas.

No todos nuestros impactos sobre el planeta son igual de graves. Algunos tienen implicaciones más locales, otros causan daños que pueden remediarse. Un buen ejemplo es el agujero de la capa

de ozono que tanto preocupó a la humanidad en los años 80 y 90. La capa de ozono lleva casi 20 años en recuperación continua gracias a que, desde la adopción del Protocolo de Montreal en 1987, se han ido dejando de usar paulatinamente las sustancias que destruían el ozono. Otros efectos adversos de las actividades humanas, en cambio, llegan a todos los rincones del globo y son irreversibles. ¿Cómo podemos ponderar todos estos efectos para determinar cuáles son los más perjudiciales y por lo tanto más urgentes de atender?

Esa pregunta se hicieron Johan Rockström y un numeroso grupo internacional de científicos de la llamada Alianza de la Resiliencia. En un esfuerzo monumental, recopilaron la información científica existente de todos los impactos que los seres humanos tenemos en el planeta para determinar hasta qué grado hemos rebasado los límites en cada caso y cuál es el espacio seguro en que podemos vivir sin consecuencias irreversibles para nuestra generación ni las siguientes. El artículo del grupo, publicado en la revista *Nature* en 2009, es uno de los más citados en la historia y ha sido fundamental para guiar la política global sobre el desarrollo de la humanidad. A casi 15 años de su publicación, su importancia sigue siendo extraordinaria. Veamos cuáles son los límites que propusieron estos científicos, cómo los establecieron y hacia dónde nos estamos moviendo.

Los diez grandes límites

En el artículo de la Alianza de la Resiliencia se proponen valores límite para 10 variables relacionadas con el buen funcionamiento del planeta: la biodiversidad, el clima, el ciclo del nitrógeno, el ciclo del fósforo, el uso de agua dulce, el cambio de uso de suelo, las emisiones de aerosoles atmosféricos, la contaminación química, la acidificación oceánica y el grosor de la capa de ozono. Ya hemos rebasado el umbral seguro de al menos tres: la biodiversidad, el cambio climático y el uso de fertilizantes nitrogenados. Por si fuera poco, estamos por rebasar la extracción de fósforo y la acidificación del mar. Finalmente, si nuestras acciones siguen como van, también rebasaremos los límites del uso de agua dulce y la disponibilidad de tierra con el cambio de uso de suelo.

Para otros límites, como la contaminación química y la emisión de aerosoles atmosféricos, no hay un umbral claro, porque muchos de estos compuestos no existían antes de los seres humanos, así que la vida jamás tuvo que lidiar con ellos. En estos casos, la recomendación es simplemente dejar de usarlos. Esto nos deja con nueve límites, con una sola historia positiva de recuperación global: el grosor de la capa de ozono, que, por suerte, sigue incrementándose año con año. Veamos de qué se trata cada uno en orden del más al menos grave.

Pérdida de biodiversidad

La diversidad biológica es una cosa maravillosa. Existe toda clase de seres vivos: animales, plantas, bacterias; chiquitos, grandes; que "comen" sol y que se comen unos a otros. Están los que descomponen la materia orgánica y los que facilitan la adquisición de nutrientes de las rocas, por mencionar algunos de los millones de seres que habitan nuestro planeta. Para llegar a esta diversidad de formas y tamaños se han requerido miles de millones de años, y la biodiversidad actual es el resultado de la evolución de toda la vida. Por eso en ninguna otra era geológica existieron las formas de vida que tenemos hoy; por ejemplo, solo en este momento (geológico) podemos disfrutar del rinoceronte blanco. Así también si una especie se extingue, es para siempre.

Por supuesto que la extinción es natural en el planeta. No obstante, los seres humanos hemos acelerado el ritmo de extinción global de especies. Ya sea por la destrucción de hábitats, la caza se-

lectiva, la introducción de especies invasoras o la contaminación, las tasas de extinción actuales son al menos 10 veces mayores que las registradas en los peores momentos del pasado, como muestra claramente Elizabeth Kolbert en su libro *La sexta extinción: una historia nada natural*. Lamentablemente, en los 13 años desde la publicación del artículo de Rockström y sus colaboradores las tasas de extinción siguen en aumento con una pérdida estimada de entre 10 000 y 100 000 especies cada año, de acuerdo con el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés). Nuestro reto como humanidad es crear espacios protegidos para que otras especies puedan vivir en paz, así como encontrar formas de manejo ambiental más amigables con todas las criaturas.

El cambio climático antropogénico

Así como las extinciones han sido parte de los procesos naturales de la Tierra, también lo han sido los cambios en el clima. Desde la hipotética congelación casi absoluta del planeta durante la glaciación del periodo Criogénico hasta un mundo sin hielo y con cocodrilos nadando en los polos en el Cretácico, los enfriamientos y calentamientos globales no son ninguna novedad. Lo que nunca se había experimentado es un cambio a la velocidad que vemos hoy. En un artículo publicado por Jessica Tierney de la Universidad de Tucson, Arizona, y sus colaboradores en la revista *Science* en 2020, se muestran los cambios en el clima planetario de los últimos 100 millones de años para contextualizar el cambio actual. Los resultados muestran que estamos calentando el planeta a un ritmo entre cuatro y 10 veces mayor que en los periodos más rápidos de calentamiento en el pasado. Las consecuencias ya se están presentando: pérdida de cultivos, huracanes más intensos, mayor incidencia de enfermedades infecciosas y migración por clima, por mencionar algunos de los muchos ejemplos que enumera el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático en su último reporte. Nuestro reto es producir energía y bienes sin emitir carbono, metano y óxido nitroso (principales gases de efecto invernadero), algo que hasta ahora no hemos logrado.

Uso excesivo de fertilizantes

Somos casi 8 000 millones de seres humanos en el planeta en este momento y todos necesitamos comer. Para mantener semejante producción de alimentos hemos recurrido a un producto esencial para la agricultura moderna: los fertilizantes sintéticos. Hechos a base de nitrógeno y fósforo, estos fertilizantes inorgánicos permiten mantener rendimientos agrícolas elevados y producir así suficiente comida para el mundo. No obstante, su producción, uso y desecho tienen consecuencias graves para los ecosistemas y los seres humanos (véase *¿Cómo ves?*, Núms. 170 y 195). El uso excesivo de fertilizantes sintéticos ha derivado en una cascada de impactos medioambientales que van desde la pérdida de especies, la emisión de gases de efecto invernadero y la eutrofización (exceso de nutrientes) de cuerpos de agua, hasta la generación de zonas "muertas" en el océano. Tenemos que encontrar la manera de mantener una producción de alimentos para todos reduciendo la dependencia de los fertilizantes inorgánicos.

El despilfarro de agua dulce

La agricultura consume la mayor cantidad de agua dulce en el mundo. Las últimas cifras muestran que el porcentaje varía entre 35 % en Europa y 91 % en el sudeste asiático, con un promedio global de 70 %. En nuestro país la situación no es distinta: 76.5 % de toda el agua dulce se va a nuestros

LOS LÍMITES DEL PLANETA

LÍMITE PLANETARIO	PORCENTAJE REBASADO	RETO COMO HUMANIDAD para revertir los patrones actuales de alteración global
Pérdida de biodiversidad	1000 %	Crear espacios de cuidado y protección para la biodiversidad.
Cambio climático	120 %	Generar energía y productos sin usar combustibles fósiles (descarbonización).
Ciclos del nitrógeno (N) y el fósforo (P)	345 % (N) y 81 % (P)	Producir alimentos sin fertilizantes inorgánicos.
Uso de agua dulce	65 %	Tratar las aguas residuales; usar con eficiencia el agua de riego.
Cambio de uso de suelo	78 %	Reducir el área global de cultivos, practicar silvicultura y agricultura urbana; cambiar nuestra dieta.
Grosor de la capa de ozono	99 % (recuperándose)	Eliminación de clorofluorocarbonos e hidrofluorocarbonos.
Contaminación química y aerosoles atmosféricos	Sin determinación	Eliminar productos químicos antes inexistentes (p.ej. plaguicidas).

cultivos y el resto a los hogares y la industria. De los 4000 km³ de agua dulce que circulan anualmente en la Tierra, usamos 2 600 km³, o el equivalente al 65 %, en las actividades agropecuarias. Claro que dicha cifra varía de manera importante entre regiones. Algunas partes del mundo, como Israel, usan más del 100 % del agua disponible, lo que es posible gracias a sistemas de reciclado y reutilización sumamente eficientes. En Colombia, en cambio, no se consume ni la mitad del agua disponible, dado el excedente hídrico anual de ese país.

Independientemente de las circunstancias de cada región, lo cierto es que los seres humanos hemos modificado la disponibilidad de agua dulce a nivel global. Este problema se ha acelerado cada año, con una creciente población que exige más alimentos conforme pasa el tiempo. Y nuestros sistemas de riego actuales son muy poco eficientes, el reto es mejorarlos de manera significativa.

Destrucción de hábitats y cambio de uso de suelo

Quizá la huella visual más extensa de los seres humanos en el mundo sea el cambio de uso de suelo. La Tierra pasó de estar cubierta de bosques a llenarse de grandes extensiones de cultivo. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) nuestro planeta tiene una superficie de tierra de 150 millones de km², de los cuales solo 100 millones son habitables (el resto es desierto y hielos). Los cultivos ocupan 51 millones de km², divididos en 40 millones de km² para el ganado (pastizales y cultivos de forraje) y el resto para cultivos directos de consumo humano. Parecería que más que transformar un planeta para las personas, lo que hemos hecho es un mundo muy agradable para nuestras vacas.

Claramente, el alimentar a una población en aumento implicará una destrucción aún mayor de bosques y otros ecosistemas, sobre todo si sigue creciendo nuestro gusto por la carne roja. El reto es reducir el área global de cultivos por medio de estrategias alternativas, pero sobre todo cambiando nuestra dieta a una que incluya muchos menos productos animales (particularmente carne roja).

Contaminación química

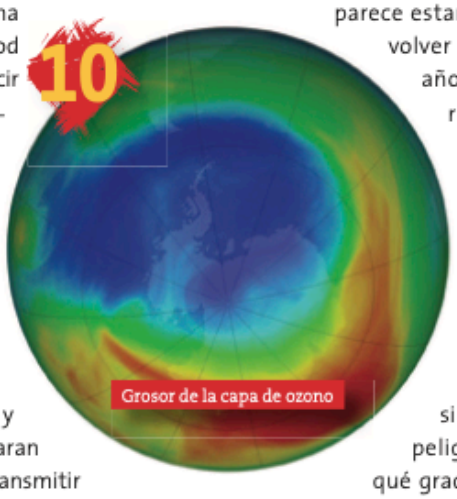
La química nos permite crear toda clase de sustancias novedosas para el bien de la humanidad: antibióticos, medicinas, plásticos, telas, repelentes, fertilizantes... No obstante, la mayoría de estos productos son extraordinariamente nocivos para el medio ambiente, pues no existen seres vivos capaces de procesarlos, transformarlos o simplemente destruirlos. Tomemos el caso de los plásticos, que se han ido acumulando en los rellenos sanitarios, en nuestros océanos y hasta en los seres vivos. Claro que son un producto fabuloso de empaque y transporte, pero si los seguimos usando como hasta ahora acabaremos tapizados de plástico, como en la película *Wall-e*. Lo más preocupante es que en este renglón es difícil evaluar cuál es el límite del planeta; así

que debemos ser muy cuidadosos y buscar alternativas.

Ozono: el único límite en recuperación

Dejé el último límite para el final, para cerrar con una historia de éxito: el ozono atmosférico. Durante décadas se usaron compuestos químicos conocidos como gases clorofluorocarbonados en refrigeradores, sistemas de aire acondicionado y productos en aerosol. Sin que nadie lo supiera, al escapar estos gases ascendían a la estratósfera y destruían las moléculas de ozono que funcionan como filtro de rayos ultravioletas que representan un peligro para la vida. La capa de ozono empezó a adelgazarse, lo que se observó por primera vez como un "agujero de ozono" sobre la Antártida.

En los años 70, las investigaciones del químico mexicano Mario Molina y el estadounidense Sherwood Rowland los llevaron a predecir este efecto de los gases clorofluorocarbonados antes de que se observara, lo cual sucedió poco después. Ambos fueron galardonados con el Premio Nobel de Química en 1995 por esa predicción. Molina falleció en 2020, apenas unos meses después de que él y varios de sus colegas plantearan que la COVID-19 se puede transmitir por aerosoles que exhalan personas infectadas y que se quedan en el aire durante horas; de ahí la necesidad de usar cubrebocas.



Gracias a la contribución de Molina y Rowland la humanidad dejó de emitir los gases que destruían el ozono y desde entonces la capa de ozono se está recuperando lentamente. En los últimos 30 años el tamaño del agujero en la capa ha ido disminuyendo. A ese ritmo, de acuerdo con la NASA, para 2085 se habrá cerrado totalmente. Este es el mejor ejemplo de que sí podemos revertir nuestros impactos en el planeta si todos nos ponemos de acuerdo.

¿Hasta dónde queremos llegar?

Me parece que esta pregunta es particularmente importante ahora que la pandemia por COVID-19 parece estar cediendo y empezamos a volver a la normalidad. Estos dos años en pausa permitieron un respiro en algunos de los daños al planeta que causan nuestras actividades. Se trata de un experimento involuntario que nos ha dado nueva perspectiva. Johan Rockström y colaboradores nos lo dejaron muy claro: la Tierra tiene límites, si los rebasamos ponemos en peligro la vida humana. Hasta qué grado los queremos forzar dependerá de nosotros. Al menos con estos esfuerzos sabemos dónde están esos límites y lo que podemos hacer para no cruzarlos, buscando el equilibrio entre la existencia de la humanidad y el funcionamiento de nuestro hermoso planeta.

- "Límites planetarios", B@UNAM: www.youtube.com/watch?v=kgrrNesJ3uQ
- *Informe mundial sobre ciencias sociales*, "En la frontera de lo social y lo planetario: rutas de navegación en un espacio seguro y justo para la humanidad", parte 1.6.: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246073_spa
- "Límites planetarios", Fundación Slim: https://pabio.pruebat.org/Materiales-Biblioteca-Digital/limites-planetarios-8#content-01

Guillermo N. Murray Tortarolo trabaja en el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la UNAM en Morelia, donde investiga la dinámica socioecológica global y cómo la hemos alterado los seres humanos.

LECTURA 10. RELACIONES TÓXICAS. La vida sexual de los insectos

Fotos Shutterstock

Los machos de diversas especies de insectos producen moléculas que modifican el cuerpo y la conducta de las hembras con las que se aparean. Si pudiéramos manipular esas moléculas sería más fácil controlar las plagas que azotan diversos cultivos

Dejas un tazón de fruta a la intemperie y muy pronto, quién sabe de dónde, llegan enjambres de insectos diminutos que revolotean alrededor de tus mangos maduros. Si observas con cuidado y paciencia a estos insectos verás que son unas mosquitas bastante normales. Pero a pesar de su aspecto anodino, esta especie, llamada *Drosophila melanogaster,* es una de las superestrellas de la biología. La razón: es muy fácil de criar en grandes cantidades, tiene un ciclo de vida —de huevo a adulto— muy rápido y es fácil crear mosquitas mutantes para hacer experimentos genéticos. Otra particularidad es que algunas de sus células (en concreto las de las glándulas salivales de las larvas) tienen cromosomas tan grandes que pueden verse bajo un microscopio cualquiera. Y aquí va un dato que no se queda atrás: los machos producen los espermatozoides más largos del reino animal, de casi 6 centímetros (para ponerlo en perspectiva, las moscas mismas miden unos pocos milímetros). Además, para reproducirse al ritmo que las hace interesantes para los investigadores, las *Drosophilas* tienen mucho, mucho sexo. Pero la cosa no para aquí.

En los animales con reproducción sexual el objetivo de la cópula es que el macho le transfiera a la hembra espermatozoides que fertilicen sus óvulos. Hasta aquí todo normal. Pero en las *Drosophilas* y muchos otros insectos, con el líquido seminal viajan sustancias que se producen en un conjunto de estructuras del macho que se llaman *glándulas accesorias* y que sirven como mensajeras que modifican de distintas formas el comportamiento de las hembras (en los humanos el equivalente sería

la próstata, pero no tiene esa función). Esto ocurre porque en la naturaleza no sólo compiten unas especies contra otras, sino también los individuos de una misma especie entre ellos. El objetivo: dejar más descendencia.

Esas moléculas son las sustancias del amor. O mejor dicho, del sexo.

Un bisturí muy chiquito

Estudiar las glándulas accesorias no es fácil: son diminutas y para observarlas hay que añadirles tintes especiales y usar un microscopio. Además, puede haber desde dos, como en las mariposas, hasta 600 glándulas individuales, como en los grillos, y tienen toda clase de formas, como peras, frijoles o bastones. Están compuestas principalmente por proteínas, pero a veces contienen grasas o azúcares, y rara vez sustancias como el ácido úrico, en las cucarachas.

El microscopio revela ciertas cosas, como su forma y el tipo y número de células que las componen, pero no sus efectos. Para averiguar qué hacen exactamente es necesario diseñar experimentos minuciosos.

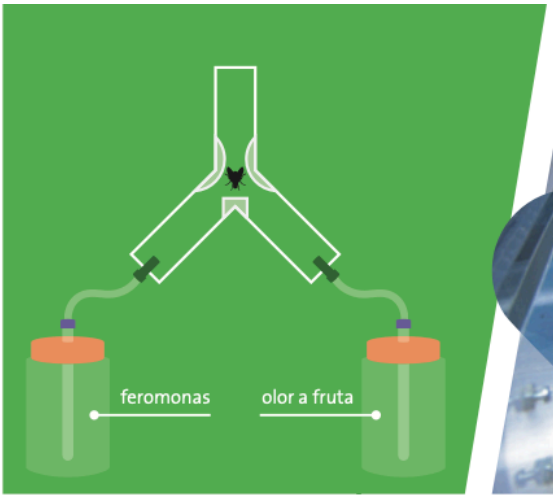
Uno de estos experimentos consiste en extraer los órganos, macerarlos en una solución, tomar una cantidad con una micropipeta, inyectarla directamente en las hembras y observar cómo se comportan. Otro método es el transplante: se quita el órgano del macho y se transplanta en el abdomen o tórax de la hembra, de tal manera que ésta reciba las sustancias del amor.

La microcirugía en los machos es una forma más laboriosa y complicada, porque hay que manipular órganos diminutos en insectos ya de por sí pequeños, pero tiene la ventaja de que las hembras no sufren ningún daño por la inyección o transplante. Es la técnica que usamos en la Universidad Veracruzana para entender qué efectos tienen estas interesantes sustancias en la mosca mexicana de la fruta, *Anastrepha ludens*. Consiste en extraerle al macho únicamente los testículos, en su etapa adulta, y permitirle copular con las hembras. Sin testículos en los que se formen los espermatozoides no puede fertilizar a las hembras, pero sí conserva las glándulas accesorias y los otros órganos reproductivos, de modo que al copular transfiere las sustancias del amor sin los espermatozoides.

Finalmente, también se pueden producir en el laboratorio mutantes que no producen esperma pero sí las sustancias que les interesan a los investigadores. Esto facilita el trabajo de los científicos porque no tienen que hacer minuciosas microcirugías para eliminar los testículos.

En 2008 Geoffrey D. Findlay y sus colaboradores hicieron un experimento en el que incluyeron en la dieta de las moscas hembra un marcador llamado nitrógeno-15. El nitrógeno 15 es un isótopo del nitrógeno, es decir, un átomo de nitrógeno que en vez de los siete neutrones que suelen formar parte del núcleo tiene ocho. Luego se permitió que las moscas marcadas se aparearan con machos sin marcar. Al estudiar el tracto reproductivo de la hembra, donde quedan proteínas marcadas y sin marcar, se puede saber cuáles son las que el macho le transmite a la hembra durante el apareamiento, pues serán las que no contengan nitrógeno-15.

Una vez que se ha identificado una proteína que los investigadores creen que hace tal o cual cosa, puede comprobarse la hipótesis sintetizando la proteína en el laboratorio e inyectándosela a las hembras. Al comparar a las hembras inyectadas con hembras que se aparearon en forma normal



Olfatómetro. La hembra debe decidir entre los olores.

Foto: Cortesía de los autores

pueden irse distinguiendo los efectos de cada sustancia. La cantidad de sustancias del amor depende del insecto: las más estudiadas son las de la *Drosophila melanogaster,* que se estima que produce más de 200 proteínas en las glándulas accesorias.

Atracción animal

Todos estos experimentos han revelado cosas muy interesantes. Uno de los primeros hallazgos se debe a Hans Kummer, que en 1960 fue probablemente el primero en reportar que las moléculas que las *Drosophila* machos le transmiten a las hembras durante el apareamiento las inducen a poner más huevos.

También sabemos que una de las proteínas que se producen en las glándulas accesorias tiene un papel antiafrodisiaco: se encarga de apagar por completo el deseo sexual de la hembra tras la cópula. Esto tiene sentido en términos evolutivos: al eliminar el impulso sexual de la hembra el macho ganador se asegura de que su pareja no quiera aparearse con un rival. Así, la hembra sólo procreará sus hijos y los de nadie más.

Otra molécula, el péptido sexual (PS o Acp70A), provoca una amplia variedad de cambios fisiológicos y de comportamiento; entre ellos, prolonga el lapso en el que la hembra está dispuesta a aparearse y a poner huevos. Una proteína más, la Acp62F, reduce las probabilidades de supervivencia en la hembra, un efecto que aún no se entiende bien en términos evolutivos. Sólo en la mosca mexicana de la fruta encontramos 100 proteínas que el macho le pasa a la hembra con posibles funciones en la respuesta inmunitaria, memoria olfativa, longevidad, espermatogénesis y ovogénesis.

Se sabe desde hace tiempo que las sustancias del amor pueden cambiar la respuesta de las hembras a los olores. Este fenómeno, que se ha estudiados en insectos como las *Drosophila,* hace algo equivalente al efecto antiafrodisiaco. En 2021 Francisco Devescovi y sus colaboradores hicieron un experimento con la mosca de Queensland, *Bactrocera tryoni,* en un olfatómetro. Pusieron a dos grupos de hembras: unas que ya se habían apareado, y por lo tanto habían recibido ciertas moléculas de los machos, y otras que no se habían apareado. En ese túnel Devescovi y colaboradores les dieron oportunidad de elegir entre dos sustancias: feromonas (sustancias químicas que liberan los machos para atraer a las hembras) o bien el olor natural de la fruta. Descubrieron que las mosquitas apareadas preferían el olor de la fruta e ignoraban olímpicamente el olor de los machos; las no apareadas, en cambio, iban hacia él e ignoraban la fruta. Este cambio de respuesta olfativa en hembras apareadas y no apareadas también lo hemos observado recientemente en la mosca mexicana de la fruta. Esta mosca, que vive desde México hasta Costa Rica, se considera una de las plagas más

destructivas de los cítricos, pero también ataca los mangos y otras frutas.

En moscas, mosquitos, escarabajos y saltamontes una proteína llamada ovulina también provoca que las hembras produzcan o depositen más huevos, o ambas cosas. Este efecto es muy estudiado en diferentes insectos porque tiene importantes consecuencias en la reproducción de las plagas. Las hembras que reciben estas sustancias al aparearse pueden infestar más frutas o vegetales, lo que provoca más daño a los cultivos, con graves consecuencias para los agricultores.

Tapón de castidad

El efecto de las sustancias del amor no se limita a lo químico: puede ser también extremadamente físico. En otros insectos (escarabajos, mariposas, grillos o mantis religiosas) estas moléculas inducen la formación de una estructura llamada espermatóforo, parecida a una cápsula. Este espermatóforo transporta los espermatozoides, y en ocasiones le proporciona nutrientes a la hembra, pero en otras funciona como una especie de cinturón de castidad, como el que se cuenta que los hombres le ponían a sus mujeres en la Edad Media para asegurarse de que no pudieran tener sexo con ningún pretendiente en su ausencia. Aunque en realidad no existieron nunca esos cinturones para humanos, en el caso de algunos insectos sí son reales: los espermatóforos son literalmente un tapón genital que evita que copulen con otros machos. Pero como en la evolución la competencia siempre es feroz incluso entre machos y hembras de la misma especie, las hembras de ciertos grillos y mantis religiosas devoran el espermatóforo. Así salen ganando: posiblemente obtienen nutrientes, se aparean con otros machos y pueden elegir a los mejores candidatos para padres. En la mosca mexicana de la fruta se ha observado que las hembras almacenan el esperma en varias estructuras de su cuerpo y sólo usan el del último macho con el que copulan, que es el que gana la carrera de la paternidad.

Otro efecto interesante ocurre en el mosquito del dengue *(Aedes aegypti)*, en el que estas sustancias pueden aumentar la longevidad de la hembra, aunque en otros casos, como en el gorgojo del frijol y en la palomilla *Spodoptera litura*, ocurre lo contrario: provocan que la hembra viva menos. También hay efectos como la pérdida de visión que sufren las reinas de la abeja común, *Apis mellifera*, tras el apareamiento, que hace que en ocasiones no puedan regresar a la colmena, y el aumento en el apetito de las *Drosophilas*, acompañado por una conducta más agresiva, un aumento en su memoria a largo plazo y una reducción en su ciclo de sueño: esteroides para moscas.

Pero eso por qué pasó o qué

En biología evolutiva las cosas no ocurren "por una razón", como si alguien hubiera diseñado ese fenómeno o conducta. Más bien en la evolución ganan los rasgos y las conductas que lleven a dejar más descendientes, incluso si producen efectos negativos en las hembras, como ocurre con las moléculas que en este artículo hemos llamado sustancias del amor.

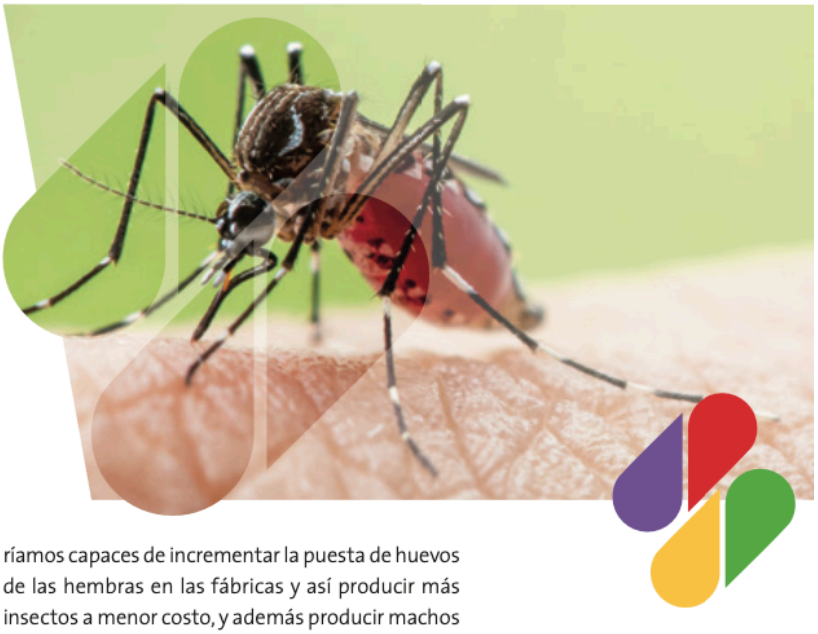
Pero, ¿cómo llegaron a desarrollarse esas sustancias y su efecto sobre la conducta de las hembras? Puede pensarse sobre el tema como una forma de conflicto o de cooperación: las sustancias del amor originalmente podrían haber favorecido el transporte de los espermatozoides para que no se quedaran atorados en el tracto reproductivo de

la hembra. Con el tiempo podrían haber adquirido nuevas funciones que resultaron en mayor descendencia. Y a más descendencia, más individuos heredarían esa característica, lo que les daría ventaja sobre los que no la tuvieran, cuyos rasgos acabarían por desaparecer. Las hembras, por su parte, pueden tener sus propios intereses y desarrollar sus propias mutaciones que las hacen resistir los cambios de conducta o los tapones genitales de los machos.

Relaciones tóxicas

Conocer las sustancias del amor en insectos y sus efectos en las hembras podría tener aplicaciones prácticas, sobre todo en el caso de insectos que se consideran plagas agrícolas, como ya vimos, o que transmiten enfermedades como el dengue, el Zika, el chikunguña o la malaria. Por ejemplo, al manipular los genes que contienen las instrucciones para fabricar ciertas proteínas en las glándulas accesorias de los machos podría conseguirse que la hembra no ponga huevos o que sus huevos no sean fértiles. Una de las razones por las que estudiamos las sustancias del amor tiene que ver con una forma de control de la natalidad amigable con el ambiente que se llama técnica del insecto estéril (TIE).

Con esta técnica, que hoy se usa en México contra la mosca del Mediterráneo y la mosca mexicana de la fruta, se crían insectos de manera masiva en grandes fábricas, se esterilizan con rayos gamma y se liberan en las áreas afectadas. Los machos esterilizados se aparean con las hembras silvestres, que ya no pueden poner huevos fértiles. Reduce las poblaciones de plagas sin necesidad de insecticidas y sin afectar a otras especies que no son plaga o que son incluso benéficas, como las abejas. Pero si pudiéramos manipular las sustancias del amor se-



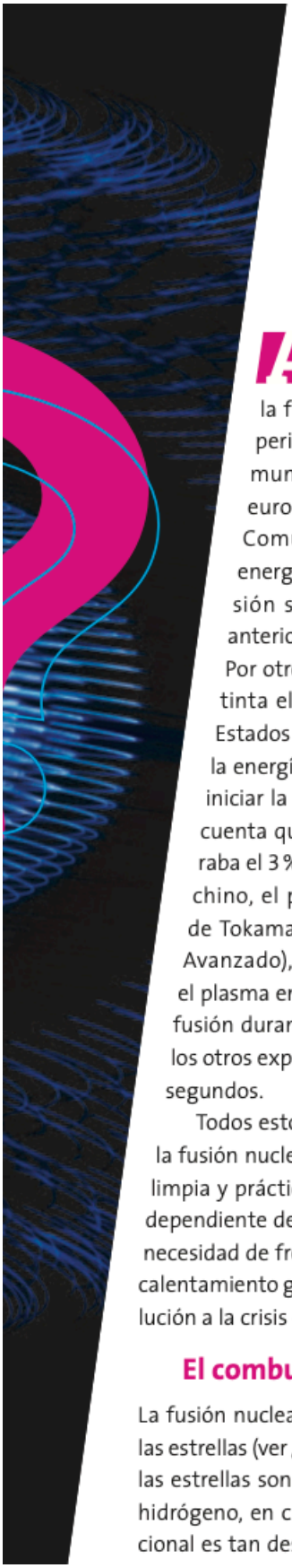
ríamos capaces de incrementar la puesta de huevos de las hembras en las fábricas y así producir más insectos a menor costo, y además producir machos estériles que al copular con una hembra silvestre le transmitan una proteína que la mate. En otras palabras, las sustancias del amor se convertirían en las sustancias de la muerte: malo para los insectos pero bueno para la agricultura.

- *Técnica del insecto estéril*, Organismo Internacional de Energía Atómica, en: www.iaea.org/es/temas/tecnica-del-insecto-esteril.
- *Técnica del insecto estéril para combatir plagas en los cultivos*, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, en: www.gob.mx/inin/articulos/tecnica-del-insecto-esteril-para-combatir-plagas-en-los-cultivos.
- Técnica del insecto estéril para erradicar la mosca de la fruta, Ciencia UNAM, en: https://ciencia.unam.mx/leer/1363/tecnica-del-insecto-esteril-para-erradicar-la-mosca-de-la-fruta.

Guadalupe Córdova García, bióloga, maestra en Neuroetología y doctora en Ciencias en Ecología y Biotecnología por la Universidad Veracruzana. Apasionada de los insectos, colabora con investigadores del INECOL.

Diana Pérez-Staples, es licenciada en biología por Reed College, maestra en Ecología del Instituto de Ecología de la UNAM y doctora en Ecología y Manejo de Recursos Naturales por el INECOL. Es investigadora y docente del Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada de la Universidad Veracruzana. Se dedica a estudiar el comportamiento sexual de insectos plaga.

LECTURA 11. Más cerca de la fusión nuclear



La fuente de energía del Sol y todas las estrellas resolvería nuestros problemas de suministro energético y cambio climático, pero dominarla es una tarea monumental.

A principios de 2022 aparecieron varias noticias relacionadas con la fusión nuclear en las portadas de periódicos y portales web de todo el mundo. Por un lado, el experimento europeo JET (siglas en inglés de Toro Común Europeo) batió el récord de energía generada en un reactor de fusión superando con creces la marca anterior, que tenía más de dos décadas. Por otro lado, mediante una técnica distinta el Centro Nacional de Ignición de Estados Unidos logró recuperar el 70 % de la energía suministrada a su aparato para iniciar la reacción, un éxito si tenemos en cuenta que anteriormente solo se recuperaba el 3 %. Por último, un reactor de fusión chino, el prototipo EAST (siglas en inglés de Tokamak Superconductor Experimental Avanzado), consiguió mantener confinado el plasma en el que se produce la reacción de fusión durante más de 17 minutos, mientras los otros experimentos apenas aguantan unos segundos.

Todos estos logros nos acercan al sueño de la fusión nuclear: una fuente de energía barata, limpia y prácticamente ilimitada. En un mundo dependiente de los combustibles fósiles y con la necesidad de frenar de inmediato los efectos del calentamiento global, la fusión nuclear sería la solución a la crisis energética y climática actual.

El combustible de las estrellas

La fusión nuclear es el proceso por el cual brillan las estrellas (ver *¿Cómo ves?* Núm. 190). En esencia, las estrellas son enormes esferas compuestas de hidrógeno, en cuyo interior la atracción gravitacional es tan descomunal que la materia se comprime hasta alcanzar temperaturas de millones de grados. En estas condiciones, el hidrógeno no se encuentra en estado sólido, líquido ni gaseoso: forma un plasma, una sopa de partículas cargadas eléctricamente en la que los electrones se han separado de sus núcleos atómicos. Y aunque los núcleos de hidrógeno se repelen por tener la misma carga eléctrica, las elevadas presiones y temperaturas los obligan a acercarse lo suficiente como para pegarse unos a otros, formando núcleos atómicos de helio.

Esto es lo que se conoce como fusión nuclear: la unión de núcleos atómicos de un elemento para formar otro núcleo más pesado. En el proceso se pierde algo de masa, que se convierte en energía y se emite al exterior en forma de luz y calor (masa y energía son equivalentes, de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein, $E = mc^2$). Si las condiciones de presión y temperatura se sostienen en el tiempo, la reacción de fusión es capaz de mantenerse por sí sola y la energía que desprende es mucho mayor que la que consume. Dicho excedente de energía puede utilizarse para generar electricidad. Además, el combustible habitual de la fusión nuclear, el hidrógeno, no solo abunda en las estrellas, sino también en nuestro planeta. Por si fuera poco, la reacción no produce gases nocivos ni radiactividad.

Todo son ventajas, salvo un pequeño inconveniente: es muy difícil recrear en la Tierra lo que sucede en el interior de las estrellas. Por no poderse alcanzar las elevadas presiones del Sol, el hidrógeno debe calentarse todavía más, a temperaturas de 150 millones de grados, y mantenerse confinado el tiempo suficiente para que los núcleos se fusionen. El problema es que a tales temperaturas, el plasma fundiría el recipiente empleado para contenerlo. O si el recipiente resiste un poco, al entrar en contacto con el

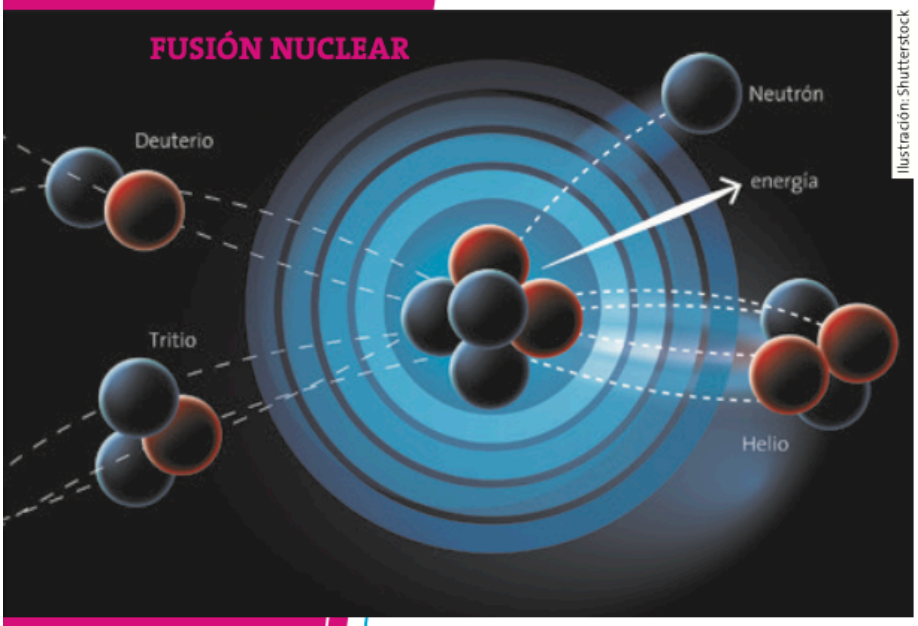


Ilustración: Shutterstock

Fusión nuclear: la unión de núcleos atómicos de un elemento para formar otro núcleo más pesado. En el proceso se pierde algo de masa, que se convierte en energía y se emite en forma de luz y calor.

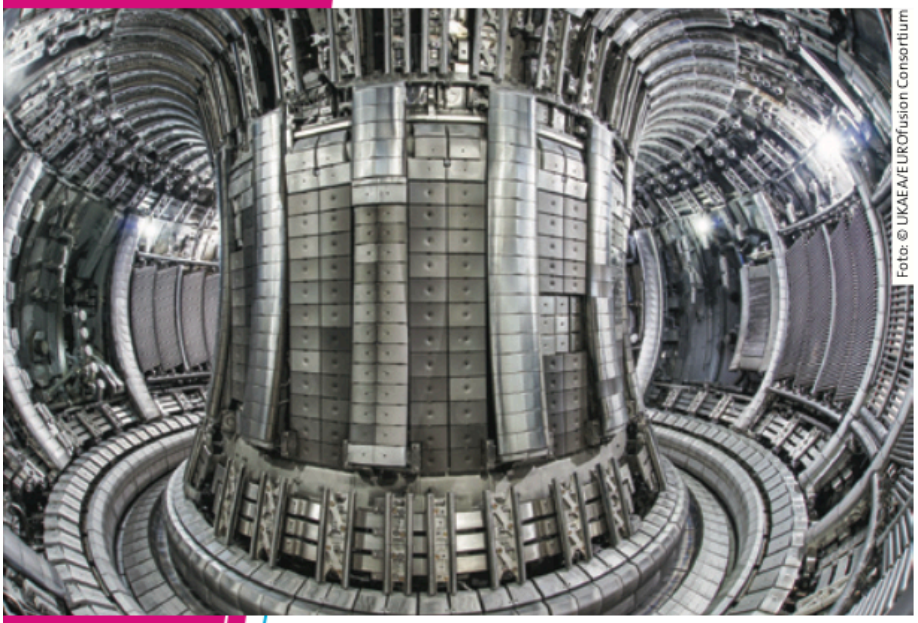


Foto: © UKAEA/EUROfusion Consortium

El reactor de fusión JET logró por primera vez resultados que confirman que la producción de energía de alta fusión es posible mediante la mezcla de combustibles que planean emplear en futuros experimentos.

plasma, este se enfría lo suficiente para detener la reacción de fusión.

Récord de producción de energía

Hasta el día de hoy, el método más prometedor para lograr la fusión nuclear es el llamado confinamiento magnético. Consiste en calentar el combustible por medio de descargas eléctricas y luego utilizar potentes campos magnéticos para mantener confinado el plasma dentro del reactor sin que toque sus paredes. De acuerdo con la propuesta realizada por científicos soviéticos a principios de la década de 1950, este campo magnético debe tener forma toroidal, es decir, como una dona hueca. Este tipo de reactor recibe el nombre de "tokamak" por sus siglas en ruso, que significan "cámara magnética toroidal".

Uno de los experimentos más longevos en activo que usa esta tecnología es el ya mencionado JET, un proyecto de colaboración europea que lleva operando desde 1983 en las afueras de Oxford, Reino Unido. El JET es el tokamak más grande del mundo, a la espera de que se finalice la construcción del anhelado ITER (siglas en inglés de Reactor Termonuclear Experimental Internacional), en Francia. Aunque el JET se ha centrado en comprender el comportamiento del plasma a esas temperaturas y no tanto en maximizar la energía generada, este dispositivo posee en la actualidad el récord de producción de energía.

El 21 de diciembre de 2021, el JET calentó un gas formado por deuterio y tritio hasta alcanzar 150 millones de grados y lo mantuvo estable durante cinco segundos mientras los núcleos se fusionaban,

El Sol artificial de China

Al ser uno de los motores que impulsa nuestra sociedad, es lógico que China tenga puesto un ojo en la fusión nuclear: la fuente de energía definitiva. Socio del ITER desde sus inicios, China también tiene sus propios proyectos de fusión, entre los que destaca el prototipo EAST, siglas en inglés de Tokamak Superconductor Experimental Avanzado. Se trata, por tanto, de un experimento de fusión por confinamiento magnético, como el JET y el ITER.

Las dimensiones del prototipo son más bien modestas, pues el reactor no llega a los cuatro metros de diámetro, por los seis del JET. Sin embargo, su diseño está resultando especialmente adecuado a la hora de mantener el plasma confinado durante largos periodos. En la primera mitad de 2021 el reactor mantuvo el plasma a una temperatura de 120 millones de grados durante 101 segundos, con un pico de temperatura de 160 millones de grados que duró 20 segundos. Y el 30 de diciembre de ese mismo año, aunque la temperatura alcanzada fue menor, casi 70 millones de grados, la operación se alargó la friolera de 1 056 segundos (cerca de 18 minutos). Nunca antes había durado tanto el confinamiento de un plasma a alta temperatura en un reactor de tipo tokamak.

generando un total de 59 megajoules de energía (59 MJ, o alrededor del consumo eléctrico diario de una vivienda en México). El deuterio y el tritio son isótopos del hidrógeno; es decir, tienen un protón, como el hidrógeno, pero distinto número de neutrones (uno el deuterio y dos el tritio).

Aunque otro experimento del JET realizado en 1997 todavía conserva el récord de energía máxima alcanzada, ese pico apenas duró un instante: 0.15 segundos. Los 21.7 MJ que generó el experimento durante cinco segundos no llegan ni a la mitad del más reciente. Este hito es el fruto de más de 20 años de mejoras en el proceso y en el reactor; por ejemplo, la sustitución de carbono por berilio y tungsteno en la pared interna del tokamak. Aunque el carbono es capaz de soportar las altas temperaturas del aparato, también absorbe parte del tritio combustible y reduce la eficiencia de la reacción.

Mas allá del récord, este resultado demuestra que las investigaciones van por buen camino. Todo el conocimiento adquirido en el JET durante casi 40 años se aplicará luego en el ITER.

La alternativa del láser

El tokamak parecía la vía más segura para obtener energía neta a partir de la fusión nuclear. Sin embargo, desde 2009 le ha salido un duro competidor en el Centro Nacional de Ignición (NIF, por sus siglas en inglés), en Livermore, Estados Unidos. El NIF investiga la forma de alcanzar la fusión nuclear usando láseres, lo que se conoce como fusión por confinamiento inercial. El combustible, una mezcla de deuterio y tritio de apenas 200 microgramos, se encuentra en el centro del aparato, en una minúscula cápsula esférica de unos dos milímetros de diámetro, contenida a su vez en un cilindro de oro de un centímetro de largo. A partir de un débil pulso inicial se generan 192 láseres que van aumentando de energía a lo largo de un recorrido de 1.5 kilómetros, hasta alcanzar una energía total de 4 000 000 de joules. Esto supone más de 100 veces la energía que puede proporcionar cualquier otro láser del mundo. Los láseres convergen en el diminuto cilindro de oro durante unos nanosegundos (un nanosegundo es la milmillonésima parte de un segundo). La sincronización debe ser tal que, al cabo de su recorrido, los láseres den en el blanco con un desfase inferior a 30 billonésimas de segundo.

Al recibir el impacto de los láseres, el oro se vaporiza y emite rayos X, lo cual hace que el interior de la cápsula se comprima hasta el grosor de un cabello humano alcanzando una densidad 100 veces mayor que la del plomo y una temperatura de decenas de millones de grados. Este súbito aumento de densidad y temperatura es lo que desencadena la fusión nuclear.

El 8 de agosto de 2021 el NIF produjo una energía estimada de 1.35 MJ durante unos cuatro nanosegundos. Esto supone una cantidad de energía ocho veces mayor que el mejor resultado obtenido hasta ahora en experimentos previos del propio NIF, avance que se debe a una mejor com-

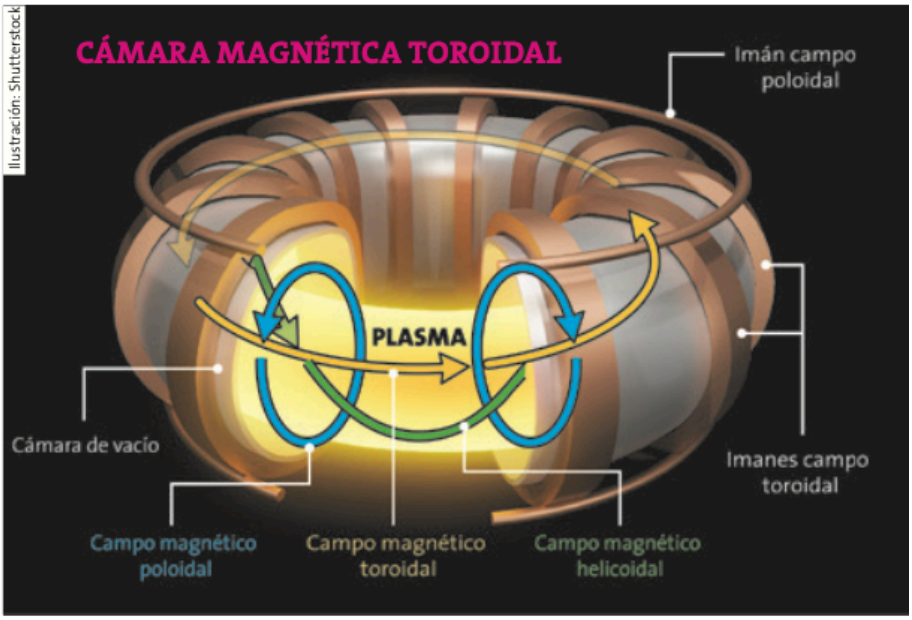


Ilustración: Shutterstock

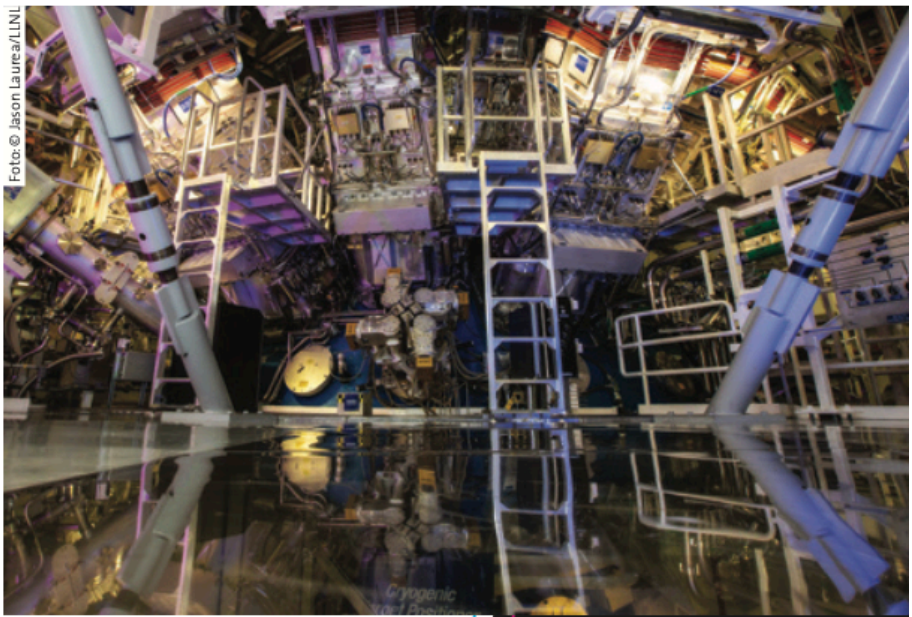


Foto: © Jason Laurea/LLNL

El NIF busca alcanzar la fusión nuclear usando láseres; el combustible se encuentra en el centro del aparato, en una diminuta cápsula de apenas 2 mm de diámetro.

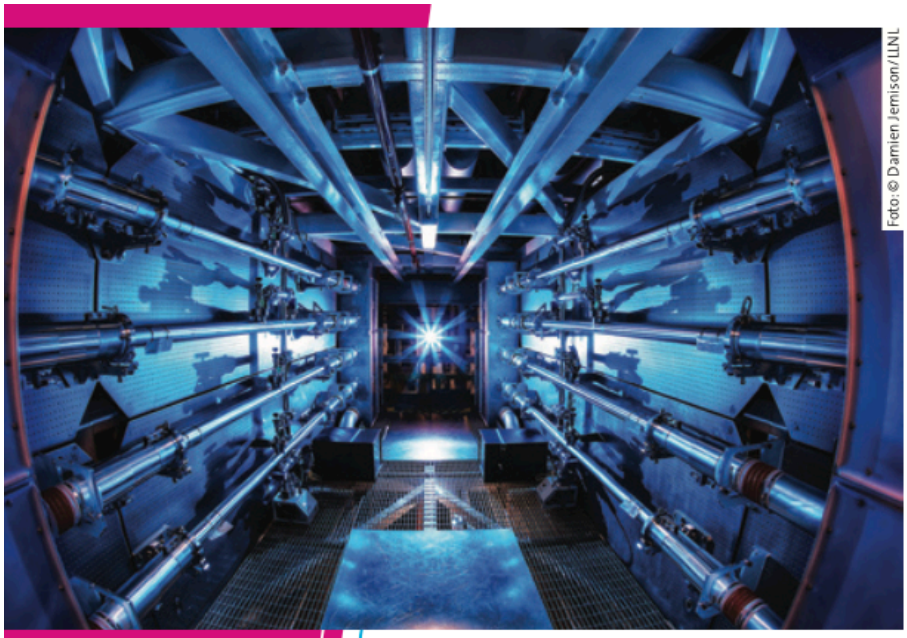


Foto: © Damien Jemison/LLNL

Los preamplificadores del NIF son el paso inicial para incrementar la energía de los rayos láser en su recorrido de 1.5 kilómetros hasta la cámara central.

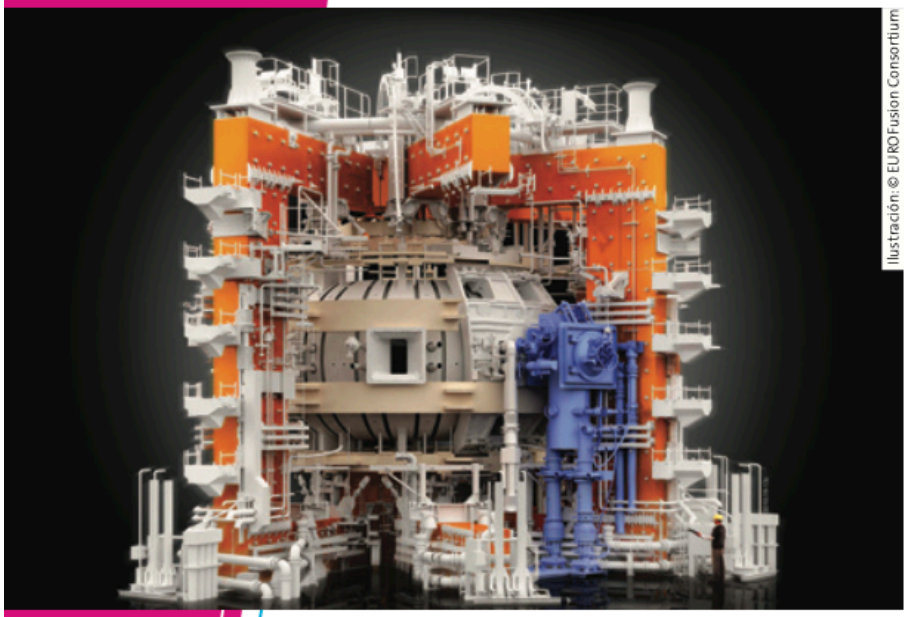


Ilustración: © EUROfusion Consortium

Basado en la tecnología tokamak, el ITER está diseñado para multiplicar por 10 la energía suministrada y producir 500 MW durante alrededor de 500 segundos consumiendo unos 50 MW en la ignición.

prensión de los procesos que intervienen en la implosión de la cápsula.

Preguntas en el aire

El objetivo de cualquier experimento de fusión nuclear, ya sea por confinamiento magnético o inercial, es acabar obteniendo más energía en el experimento que la que se aporta para iniciar y mantener la reacción; en tal caso se dice que se ha alcanzado la "ignición". Sin embargo, la realidad es que ningún experimento lo ha logrado hasta ahora. En el caso del último experimento del JET, se produjeron 59 MJ, pero hubo que suministrar 178.8 MJ para mantener el plasma confinado. Se llama factor de ganancia (Q) al cociente de la energía liberada entre la aportada. En el reciente experimento del JET, Q alcanzó un valor de 0.33, muy lejos de un valor superior a 1, que implicaría ignición. Más cerca se quedó el último experimento del NIF, que produjo 1.35 MJ frente a 1.9 MJ consumidos por los láseres, con lo que Q = 0.71.

Una de las causas de que no se haya alcanzado la ignición en el JET es la naturaleza compleja e ingobernable del plasma. Cuanto más se calienta y se lo intenta comprimir para desencadenar la fusión, más difícil resulta confinarlo. Como cuando intentas agarrar un puñado de arena con la mano y los granos se te escurren entre los dedos, el plasma siempre encuentra la manera de escapar de la prisión magnética. Si los investigadores lograran dominar el plasma a su antojo, la fusión nuclear en el reactor se podría prolongar durante días o semanas, en lugar de los segundos o minutos actuales, convirtiéndose así en una fuente casi ilimitada de energía.

En cuanto al NIF, hay que tener en cuenta que el cilindro de oro que contiene el combustible se destruye en cada experimento. Y hay que esperar varias horas a que se enfríen los láseres para volver a dispararlos. Un futuro reactor de fusión comercial que produzca energía de forma continua necesitaría disparar el láser y reponer el cilindro varias veces por segundo, lo que por ahora no se sabe cómo hacer. Desde este punto de vista, la fusión en un reactor de tipo tokamak es mucho más sencilla, pues basta inyectar el combustible en forma de gas.

La mayor esperanza

Mientras tanto, se está construyendo en Francia el proyecto más ambicioso y complejo de fusión nuclear: el reactor ITER. En este proyecto participan la Unión Europea (más Suiza), Estados Unidos, Rusia, Japón, China, India y Corea del Sur. Basado en la tecnología tokamak, el ITER está diseñado para multiplicar por 10 la energía suministrada (Q = 10) y producir unos 500 MW durante alrededor de 500 segundos consumiendo unos 50 MW en la ignición. El combustible utilizado sería un gramo

La hoja de ruta de la fusión comercial

Una vez que el ITER sea capaz de producir energía de forma puntual, el siguiente desafío consistirá en hacerlo continuamente, que es el objetivo del proyecto DEMO (acrónimo de *DEMOnstration Power Plant*). Este prototipo experimental aspira a producir 2 000 MW de potencia eléctrica de manera sostenida, empleando para ello solo 80 MW (Q = 25). Antes de eso, el proyecto IFMIF, actualmente en desarrollo, investigará los materiales que requiere la construcción de un reactor de fusión como el DEMO. El primer prototipo de reactor de fusión comercial propiamente dicho sería el PROTO (acrónimo de PROTOtype Power Plant), todavía demasiado lejano como para haber sido diseñado en detalle.

De acuerdo con las fechas que se barajan actualmente, se espera que en 2025 finalice el ensamblaje del reactor de fusión ITER y que empiecen las pruebas con plasma. Si todo va bien, hacia 2040 ITER e IFMIF habrán cumplido su objetivo y se podrá empezar con la construcción del DEMO. Pasarán al menos 10 años hasta que se termine de construir y se ponga en marcha el experimento. Se espera que el DEMO cumpla su objetivo a principios de la lejana década de 2060. Antes de eso, en 2055, ya habría empezado la construcción del PROTO, que debería demostrar la viabilidad comercial de la energía de fusión en la década de 2070. Estos plazos podrían acortarse si la crisis energética se vuelve insostenible. Tomando ciertos riesgos, el desarrollo de DEMO y PROTO podría combinase en un único proyecto. En tal caso, la fusión comercial llegaría en unos 40 años.

de deuterio y tritio a partes iguales, calentado mediante microondas hasta más de 100 millones de grados y confinado por la acción de nueve potentes imanes superconductores, cada uno capaz de generar un campo magnético que es 200 000 veces más intenso que el campo magnético terrestre. El edificio que albergará el reactor tendrá una altura de 20 pisos y se asentará sobre una plataforma del tamaño de 60 campos de fútbol. En su interior, el reactor de fusión duplicará en tamaño al JET y

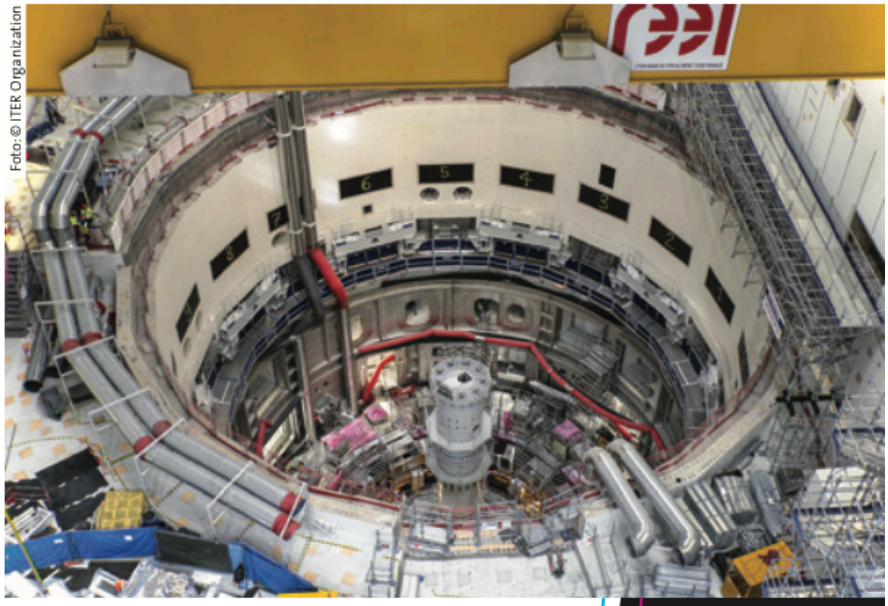


Foto: © ITER Organization

Instalación de un nuevo elemento de andamiaje sobre el pozo del tokamak del ITER en abril de 2022, el cual permitirá montar el cableado y ductos de ventilación.

pesará 23 000 toneladas, tres veces más que la Torre Eiffel. Algunas de las piezas que forman el complejo son tan pesadas que hubo que modificar las carreteras y los puentes por donde se transportaron. En construcción desde 2010, se espera que el ITER empiece a operar en 2025 y que cumpla su objetivo alrededor de 2040, medio siglo después de empezar su diseño.

Cada vez comprendemos y controlamos mejor la fusión nuclear. Pero hay que ser realistas: todavía quedan por delante varias décadas hasta que podamos abastecer a la humanidad con esta fuente de energía. En el camino hay que resolver diversas cuestiones técnicas, como los materiales y los sistemas de refrigeración que se utilizarán en el reactor, así como la forma de producir tritio, muy escaso en la naturaleza. El desafío es grande, pero la recompensa promete ser mayor todavía.

- "Fusión nuclear", *Toda la UNAM en línea*: www.objetos.unam.mx/fisica/fusionNuclear/index.html
- "Fusión nuclear", Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares: www.inin.gob.mx/temasdeinteres/fusionnuclear.cfm
- Reactor Termonuclear Experimental Internacional: https://www.iter.org

Daniel Martín Reina es físico y colaborador habitual de *¿Cómo ves?* Es miembro del grupo de Investigación de Instrumentación Electrónica y Aplicaciones de la Universidad de Sevilla, España. Escribe el blog de divulgación *La aventura de la ciencia*: http://laaventuradelaciencia.blogspot.mx

LECTURA 12. Nada Peor para el humor.

NADA PEOR PARA EL HUMOR

Por **Guillermo Murray Tortarolo** Ilustraciones **Richard Zela**

El clima afecta cómo nos sentimos y cómo nos comportamos de manera individual y también colectiva. Conforme el planeta se calienta, vivimos estos efectos de maneras cada vez más severas y dramáticas

Nada peor para el humor que el calor. Cuando nos atrapa el sol de las tres de la tarde en el tránsito difícilmente podemos permanecer sonrientes y contentos. El frío no se queda atrás: cuando tenemos que ir a la escuela o el trabajo muy temprano en los meses de invierno, con escarcha en el pasto o el pavimento y vaho saliendo de nuestras bocas, en general nos da una sensación de desasosiego sin importar cuán abrigados vayamos. Y qué decir de la tristeza durante los días nublados, cuando no tenemos ganas de salir a ningún lado y aumenta nuestro antojo de pan dulce. En otras palabras, el tiempo meteorológico tiene un gran impacto sobre el estado de ánimo y las decisiones que toma la gran mayoría de las personas. Tal vez a ti te ha pasado.

Este fenómeno, que nos ocurre casi a todos, también produce cambios en el comportamiento de poblaciones enteras, es decir a nivel demográfico. El ejemplo más sencillo es el aumento en el consumo de helado durante el verano o de chocolate y pancito durante el invierno, pero hay patrones mucho menos evidentes. Como te imaginarás, el cambio climático global —y en particular

el aumento en la temperatura— se ha asociado con un incremento en los casos de ciertos comportamientos demográficos.

Temperatura y agresión humana

Cuando tenemos calor, en particular si es incómodo y no hay una forma sencilla de aliviarlo, el estado de ánimo se caldea —literalmente se calienta— y nos ponemos irritables, lo que favorece la violencia y la agresión física. Sucede que el incremento en la temperatura ambiental produce un aumento en la presión sanguínea y un cambio en las prioridades del cuerpo: cuando hace calor, el cerebro se concentra en regular la temperatura y la presión corporal, y produce menos neurotransmisores que regulan las emociones, como la serotonina.

Uno de los científicos que más ha estudiado este fenómeno es Craig Anderson, de la Universidad Estatal de Iowa, quien a lo largo de más de 30 años ha investigado los motores de la violencia humana en diferentes situaciones: cuando usamos videojuegos, tras exponernos a medios de comunicación y en particular cuando sufrimos calor. Sus estudios han mostrado que las ondas de calor, los veranos extremos o los años particularmente calientes están relacionados con un aumento en los asaltos violentos y las invasiones de propiedad en Estados Unidos. En particular, él y sus colaboradores encontraron una relación entre la temperatura promedio anual y los asaltos más violentos.

En esta misma línea se encuentra una investigación de Marshall Burke y colegas, de la Universidad de Stanford, que revela una clara relación entre los recientes aumentos de temperatura en África y las probabilidades de conflictos armados. Los autores anticipan que para 2030 en este continente podrían aumentar 54 % los conflictos militares y producirse más de 393 000 muertes violentas como resultado del cambio climático. Los efectos son particularmente fuertes en África subsahariana, donde los autores atribuyen la violencia a una disminución en el rendimiento de los cultivos a causa de los veranos más calientes. Por ejemplo, en 2021 la mayor parte de África se vio impactada por una fuerte sequía y una onda de calor (la peor en 70 años) que derivó en conflictos armados en diversos países, como Chad, Congo y Somalia.

Burke y colegas también encontraron que existe una relación entre las tasas de suicidio en Estados Unidos y México en las décadas de 1990 a 2010 y la frecuencia de las altas temperaturas, y anticiparon lo que puede ocurrir en 2050 en diversos escenarios. Sus resultados muestran que para nuestro país vecino cada grado de aumento en la temperatura significa un incremento de 0.7 % en la frecuencia de este triste suceso; para México, en cambio, aumenta mucho más: 2.1 %. El efecto es similar sin importar si nos encontramos en municipios naturalmente cálidos o templados, y es aún más fuerte durante los aumentos de temperatura en verano. Los autores también analizaron patrones de lenguaje depresivo en más de 600 millones de estados de redes sociales y encontraron un claro aumento durante los periodos calientes. Está claro que en México el calor de primavera y verano tiene un serio impacto en el deterioro de la salud mental de nuestra población.

Lluvia, sequía y conflicto

Si el calor nos pone de mal humor, la sequía también dispara enormes conflictos sociales. Pensemos en lo que sucedió en el norte de México a principios de 2022: una sequía, ocasionada por el fenómeno de La Niña, dejó sin agua a varios municipios, y esto llevó a diversos problemas sociales, como manifestaciones, plantones y fuertes críticas políticas. Por suerte la sequía eventualmente disminuyó y la vida ha vuelto más o menos a la normalidad, pero una de las consecuencias que aún vivimos ha sido el aumento inflacionario en los precios de los alimentos de la canasta básica.

Creemos que la sequía ha sido también la causante del colapso de grandes civilizaciones, como la cultura maya clásica, y que es el motor de guerras civiles. Tal es el caso de los conflictos bélicos experimentados recientemente en el creciente fértil, en particular en Siria. Por ejemplo, según una investigación de Colin Kelley y colaboradores, del Imperial College London, en Inglaterra, la sequía que experimentó la región entre 2007 y 2010 fue el motor principal de la guerra que se suscitó en este país y que comenzó en 2011. Durante estos tres años ocurrió la peor sequía registrada en la historia de la región, ocasionada por el cambio climático antropogénico (provocado por los humanos). De acuerdo con los autores, la poca respuesta del gobierno frente a la falta de agua y la caída de la producción agrícola llevaron a que 1.5 millones de personas migraran de las zonas agrarias a la periferia urbana. Estos migrantes climáticos pasaron a representar hasta el 20 % de la población de las ciudades. Esto a su vez provocó un aumento en el estrés social por la falta de recursos y un incremento en el malestar general. La

suma de estos elementos fue la pólvora que encendió esta terrible guerra.

Pero el mayor efecto de la sequía sobre el comportamiento humano es el desplazamiento. La gente prefiere buscar mejores oportunidades en otros países que enfrentarse a la violencia ocasionada por la falta de agua. Este patrón se repite a nivel internacional, como mostraron Olev Smirnov y colegas, de la Universidad de Oregon. Los autores predijeron lo que ocurriría con la migración internacional en diversos escenarios, y encontraron que si no se contiene la emisión de gases de efecto invernadero, para 2100 podrían hasta quintuplicarse las migraciones provocadas por las sequías. Los principales países afectados son Turquía, Marruecos, Algeria, Brasil, China, Venezuela... y por supuesto, México.

Hablando de nuestro país, varios estudios han relacionado los eventos que hemos experimentado en las últimas décadas con los picos migratorios fuera del país. Por ejemplo, Shuaizhang Feng y colaboradores, de la Universidad de Stanford, mostraron que las sequías que experimentamos en México entre 1990 y 2005 (por ejemplo la terrible sequía de 1994 y la del 2000), llevaron a una disminución en la producción de las cosechas de maíz de temporal, y con ello a un incremento en la tasa migratoria a Estados Unidos. Los autores también mostraron que para 2080 la sequía será la causa de la migración adicional de entre 1.4 y 6.7 millones de mexicano.

Inundaciones y estrés

Como hemos visto hasta aquí, en general los eventos extremos de calor y sequía llevan a malestar social y cambios conductuales, y los ejemplos seleccionados pueden replicarse prácticamente en cada región del mundo. No obstante, ahora quiero contarte los impactos que tienen otros eventos extremos en la conducta humana: las inundaciones.

Una inundación se da a raíz de un periodo de excesivas precipitaciones, un aumento súbito del nivel del mar y, en casos no tan comunes en nuestro país, por un rápido deshielo. En cualquier caso, implica el crecimiento desmedido de un cuerpo de agua —un río, un lago, o hasta el mar— en un periodo muy corto de tiempo, que tiene como resultado que el agua invada una región que normalmente no ocupa. La gente que habita en las cercanías suele verse atrapada sin previo aviso, y esto provoca enormes pérdidas: mueren personas y animales, y se pierden electrodomésticos, muebles, papeles esenciales de identificación y también las reservas de alimentos y medicinas de los hogares.

Lo que es peor, las inundaciones suelen producir una serie de dañinos efectos secundarios.El agua estancada y la intrusión de aguas negras induce el aumento de enfermedades como el cólera y la disentería, y las transmitidas por mosquitos, como la malaria. También favorecen que crezcan hongos en las casas, y esto lleva a enfermedades respiratorias. En fin, toda una serie de eventos desafortunados. No es de extrañarse que la gente que sufre una inundación tenga niveles extraordinariamente altos de estrés.

Es justamente ese estrés el que modifica la conducta de las víctimas de inundaciones. Pero que en este caso en particular no se trata sólo de la generación actual, sino de la siguiente: está muy bien documentado que el estrés que sufren las mujeres embarazadas impacta el crecimiento fetal, de modo que tras una catástrofe de este tipo es común que sus bebés nazcan con bajo peso. Los niños que ya habían nacido y que sufrieron los efectos de la inundación sufren con frecuencia problemas

de conducta y desórdenes psiquiátricos —en particular desorden de estrés postraumático, depresión y otros— como mostraron Lea Mallet y Ruth Etzel, de la Universidad de Wisconsin, en Estados Unidos. Ellos encontraron que los niños que vivieron el desastre también presentan menor rendimiento escolar y en general mayor inestabilidad emocional. Uno de los resultados más interesantes de esta investigación es que los mismos patrones se observan en todo el mundo, desde los niños afectados por el tsunami en Sri Lanka en 2004 hasta los que vivieron el huracán Floyd en Estados Unidos en 1999 o las fuertes inundaciones en Japón en 2018.

Clima, cambio climático y conducta humana

Estos casos revelan claramente la estrecha relación entre clima y conducta. Las alteraciones en nuestro comportamiento por el frío, el calor, la lluvia o la sequía las experimentan también todos nuestros vecinos, amigos y conciudadanos. Cuando nos enfrentamos a un evento extremo este efecto acumulativo en todos nosotros lleva a importantes patrones de conducta poblacional con implicaciones serias como guerras, migraciones e incluso impactos en las generaciones futuras.

Aquí entra un nuevo factor de riesgo: el cambio climático. En la actualidad no tenemos duda de que el clima está cambiando, la Tierra se está calentando y las lluvias están cambiando en cantidad y tiempo. Nos enfrentamos también cada vez más a un número creciente de eventos climáticos extremos, como intensas sequías y ondas de calor, heladas y huracanes más violentos que afectan a un número mayor de personas cada año. Hasta ahora la investigación científica se ha centrado en las causas del cambio y los impactos que tiene en cosas como la producción de alimentos, los daños materiales y las pérdidas económicas, pero cada vez tenemos más evidencias de los serios impactos sobre la conducta humana.

En el caso de México y toda América Latina la psicología y demografía del cambio climático son ciencias que se encuentran en sus inicios, pero desempeñarán un papel esencial para entender las relaciones entre las personas y el clima, en especial para poder informar a aquellos que toman decisiones qué mecanismos de adaptación pueden evitarnos mayores problemas

sociales. Algunas soluciones son tan sencillas como poner más árboles en las ciudades (para regular el clima, en particular las temperaturas extremas), refrigerar el transporte público o evitar, desde el gobierno, las actividades físicas a las horas máximas de calor. Éstos son apenas unos pocos ejemplos, pero quién sabe, a lo mejor tú que me estás leyendo puedes ir planteando algunas soluciones. ¿Qué se te ocurre?

- Aragonés, Ana María (coord.), *Consecuencias del cambio climático sobre la migración: Un análisis para México*, Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, México, 2016.
- Organización Internacional del Trabajo, *Cambio climático, desplazamientos y migración laboral*, en: www.ilo.org/global/topics/labour-migration/climate-change/green-jobs/lang--es/index.htm.
- Romero Mireles, Laura Lucía, "Lo que viene: Grandes migraciones por motivos climáticos", *Gaceta UNAM*, en: www.gaceta.unam.mx/lo-que-viene-grandes-migraciones-por-motivos-climaticos/.

Guillermo Murray Tortarolo es investigador en el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, donde estudia los diferentes motores e impactos del cambio climático en México y el mundo. Es fanático de la enseñanza y la divulgación de la ciencia a todos los niveles.

Richard Zela es ilustrador y narrador gráfico, autor del cómic *Cosas que nunca cambian*.

LECTURA 13. Sangre de colores: desde humanos hasta lagartijas

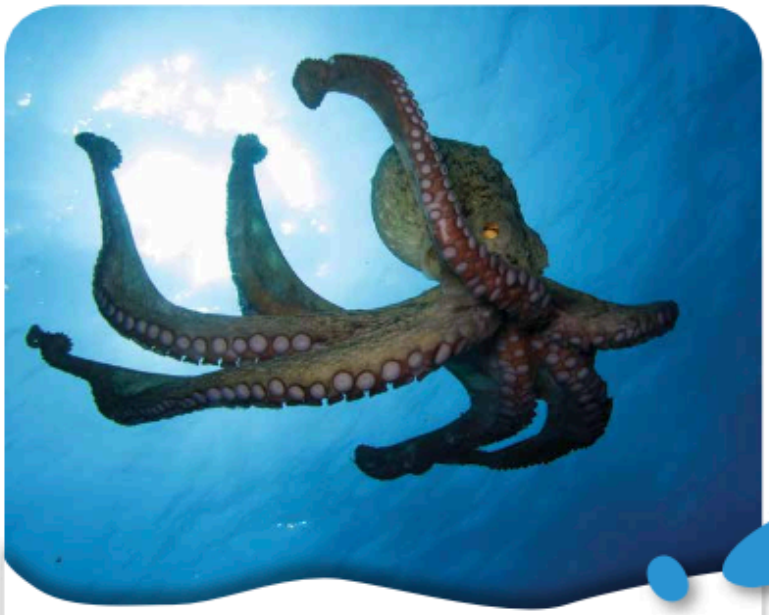
En los cuentos, los príncipes y las princesas tienen "sangre azul". Por supuesto, es solo una manera de hablar, pero hay otros animales cuya sangre sí es de ese color. También hay animales de sangre verde y hasta transparente. El color de la sangre de una especie está relacionado con su historia evolutiva.

Según el historiador John H. Kautsky en su libro *The politics of aristocratic empires* (*La política en los imperios aristocráticos*), los miembros de las familias más poderosas en el pasado buscaban maneras de demostrar una superioridad jerárquica y biológica sobre el resto de la población. Les gustaba encontrar características que los distinguieran del común de los mortales. Una muy socorrida era mostrar las venas de los brazos, que se veían de color azul pálido por el contraste entre lo rojo de la sangre y la palidez de la piel de personas que no tenían que laborar al rayo del Sol. Sus súbditos o vasallos generalmente tenían la piel tostada por las largas jornadas de trabajo y era menos probable que se les vieran azules las venas. Así, lo de la "sangre azul" de los aristócratas se refiere a la diferencia entre las clases que trabajaban en el campo y las clases ociosas, o que tenían otras ocupaciones.

¿Sangre azul? Tradicionalmente se representan las venas del sistema circulatorio en azul; si miramos las que están a flor de piel parecen azules, pero esto se debe a un efecto de la luz en la piel y no a la sangre misma.

Fotos: Shutterstock

No hay humanos con sangre azul, pero otros organismos sí pueden tener sangre de ese color, e incluso de otros colores. Los primeros organismos unicelulares en la historia de la vida en la Tierra obtenían nutrientes del ambiente por difusión simple (o sea, esperando a toparse con las sustancias necesarias) o fagocitosis (rodeando y capturando partículas de nutrientes con la membrana celular). Al aumentar la complejidad biológica, los organismos desarrollaron una serie de conductos en el interior de sus cuerpos para transportar oxígeno y nutrientes. En las esponjas de mar, organismos muy simples, la función de trans-



La sangre azul de los pulpos se debe a la oxidación del cobre presente en la metaloproteína conocida como hemocianina.

Foto: ©Julia Sunnarborg/iNaturalist

Si bien el escinco *Prasinohaema virens* tiene hemoglobina en la sangre, el color verde se debe a una alta concentración de biliverdina.

portar nutrientes la lleva a cabo el agua que hacen circular por el interior de su cuerpo. Los organismos más complejos, como los cefalópodos (pulpos, sepias y calamares) y los vertebrados, cuentan con un tejido especial para cumplir esas funciones de transporte.

La sangre es un tejido encargado del transporte de oxígeno y dióxido de carbono (CO_2) principalmente, aunque tiene otras funciones importantes como transportar nutrientes y hormonas o captar y disipar calor. En organismos que no pueden producir su propio calor corporal, como reptiles, anfibios y peces, el calor es absorbido por la piel expuesta a la luz solar, tras lo cual se difunde por el resto del organismo gracias a la sangre. Cuando el organismo necesita conservar el calor corporal, el flujo de sangre se reduce y, al contrario, cuando necesita disipar calor, el flujo aumenta.

La sangre se forma en tejidos especializados como la médula ósea roja (que se encuentra en el interior de los huesos) en mamíferos y los riñones en los peces, en un proceso conocido como hematopoyesis ("creación de sangre"). La sangre está compuesta por un tejido transparente llamado plasma y por células como los glóbulos rojos, células del sistema inmune y plaquetas, que son las encargadas de la reparación o cicatrización de zonas donde el tejido ha sido dañado. En la mayoría de los casos, en el interior de cada glóbulo rojo se encuentra una proteína que tiene la función de capturar moléculas de oxígeno. Esta proteína es un pigmento. El tipo de pigmento en cada grupo de organismos determina el color de la sangre.

Adaptación al frío

La mayoría de los vertebrados tienen sangre roja. Esta debe su color a la hemoglobina, sustancia compuesta por aminoácidos y un grupo "hemo" de gran afinidad con el oxígeno y que contiene un átomo de hierro. Al captar las moléculas de oxígeno la hemoglobina toma un color rojo parduzco.

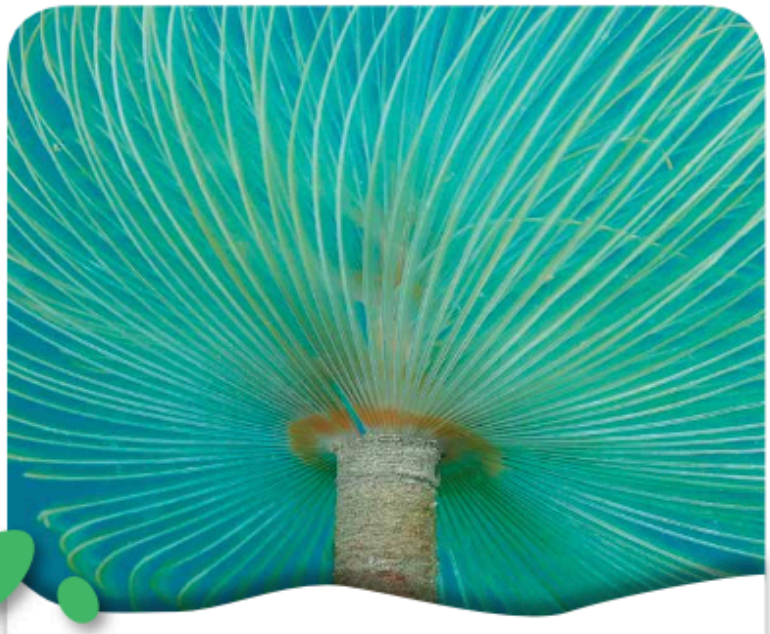
La sangre es el primer tejido en sufrir cambios cuando se modifican las características del ambiente (temperatura y presión atmosférica, entre otras) o internas del organismo (por ejemplo, por edad o trastornos a la salud). Por eso se utiliza este tejido como indicador de salud y bienestar tanto en humanos como en animales. Con los avances de la medicina, se prevé que pronto será posible detectar un gran número de enfermedades con una sola gota de sangre.

Los primeros registros de animales que sí tienen la sangre azul datan de 1878, cuando el fisiólogo

belga Léon Fredericq notó que la sangre de algunos cefalópodos (pulpos, por ejemplo) se volvía azul al pasar por las branquias. Posteriormente se descubrió que este fenómeno se debía a la oxidación del cobre presente en una proteína que se denominó hemocianina (actualmente está en debate el nombre, ya que esta proteína no contiene el grupo "hemo"). Existen varias diferencias entre los organismos de sangre roja y los de sangre azul en lo que se refiere a la función de la sangre.

Los organismos de sangre azul presentan el inconveniente de que su capacidad de transportar oxígeno es tres veces menor que la de los organismos de sangre roja. El oxígeno es esencial para generar energía, y esa energía se utiliza para realizar movimientos corporales u otras actividades como crecer y buscar alimento o pareja. La capacidad reducida de transportar oxígeno en los organismos de sangre azul ha llevado a que los cefalópodos del océano Antártico tengan una forma de vida sedentaria, marcada por poco movimiento y ausencia de cambios corporales durante su ciclo de vida. Actualmente a la comunidad científica le preocupa que estos organismos no puedan responder de manera adecuada al calentamiento global y desaparezcan. La principal razón es que la afinidad de la hemocianina con el oxígeno se reduce al aumentar la temperatura. Al parecer lo que era una adaptación al frío extremo es un inconveniente en la situación global actual, en que los mares se están calentando.

La sangre azul ha despertado gran interés en la comunidad científica por dos razones: la primera es que se desconoce si su aparición fue independiente en los grupos que tienen hemocianina (cefalópodos y artrópodos), ya que los hábitos de cada grupo y la cantidad de esta proteína que poseen no favorecen ningún patrón en particular. El protagonista de la segunda razón es el cangrejo herradura y el potencial uso médico de su sangre (ver *¿Cómo ves?* Núm. 227). Muchos avances científicos y tecnológicos provienen de la observación de los organismos en su ambiente. Los científicos notaron que, a pesar de vivir en el océano, los cangrejos herradura que tenían heridas no presentaban infección. Con el tiempo descubrieron que inyectar bacterias o partes de bacterias en los cangrejos herradura provocaba una respuesta de gelatinización en la sangre, lo que inactivaba los agentes tóxicos. Actualmente los científicos se han propuesto descifrar cómo funciona este sistema de protección y la posibilidad de usarlo en el tratamiento de enfermedades inmunes en los seres humanos.

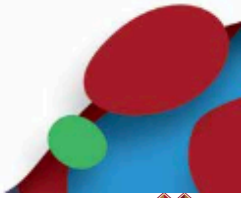


El poliqueto *Sabella spallanzanii* tiene el pigmento respiratorio clorocruorina; con una estructura parecida a la hemoglobina este le da un tono verdoso a su sangre.

Órganos en los que se lleva a cabo la formación de glóbulos rojos en distintas clases de vertebrados

Clase de organismo	Ejemplo	Órgano hematopoyético
Ciclóstomos (No tienen mandíbula inferior)	Lampreas Mixinos	Submucosa intestinal
Elasmobranquios	Mantarrayas Tiburones	Órgano de Leydig Riñón cefálico Bazo
Teleósteos (Peces con esqueleto osificado)	Truchas	Riñón Bazo
Anfibios	Ranas Salamandras	Hígado Bazo Medula ósea
Aves, reptiles y mamíferos	Lagartijas Cuervos Humanos	Bazo Medula ósea roja

De la sangre de los cangrejos herradura se extrae lisado de amebocitos (son parte del sistema inmunológico de estos organismos), que son esenciales para detectar endotoxinas en la industria farmacéutica. Las empresas farmacéuticas usan el lisado de amebocitos para fabricar y probar vacunas contra la COVID-19. El número de cangrejos herradura que se requieren para probar y producir



Algunos invertebrados marinos como *Sipunculus nudus* tienen hemeritrina como pigmento respiratorio que, al oxigenarse, le da un tono rosa-violeta a la sangre.

Diferencias entre organismos de sangre roja y azul

Sangre roja	Sangre azul
Peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos	**Cefalópodos y artrópodos**
Sistema circulatorio cerrado (la sangre permanece dentro de venas y arterias, nunca entra en contacto directo con otros tejidos)	Sistema circulatorio abierto (la sangre entra en contacto directo con los tejidos)
La hemoglobina se encuentra dentro de los glóbulos rojos	La hemocianina se encuentra en el plasma
El hierro es la molécula que capta el oxígeno	El cobre es la molécula que capta el oxígeno
Mayor capacidad de captación de oxígeno	Poca capacidad de captación de oxígeno

las vacunas es inmenso; esto ha puesto en alerta a la comunidad científica, que teme por la población de estos fósiles vivientes.

Sangre verde

Ciertas especies de lagartijas de Nueva Guinea tienen la sangre verde. No se debe a que no tengan hemoglobina sino a una acumulación de biliverdina, el pigmento que da el color verde a la bilis. La biliverdina proviene de la desintegración de la hemoglobina y se encuentra en tales concentraciones en la sangre de estos reptiles, que el color verde predomina sobre el color de los glóbulos rojos y tiñe la sangre, los huesos, los músculos, la lengua y las mucosas.

En todos los demás vertebrados, este exceso de pigmento biliar en la sangre causa un problema patológico conocido como ictericia, que puede ocasionar graves daños a nivel motor y cerebral. Las lagartijas del género *Prasinohaema* de Nueva Guinea toleran concentraciones de este pigmento que serían altamente tóxicas para las personas (más de 100 veces lo reportado en humanos). Aunque la función del exceso de pigmentos de la bilis en lagartijas es desconocida, se especula que puede protegerlas contra los rayos ultravioleta, servir como tóxico en caso de que sean depredadas por otros animales y para la termorregulación; las lagartijas no pueden producir calor de forma autónoma como los mamíferos, por lo que tienen que exponerse a fuentes caloríficas externas, de ahí la frase "tomar el Sol como lagartija". En la última década, la biliverdina en organismos animales ha sido de interés por dos motivos: 1) la medicina tradicional china la emplea como antioxidante y 2) la ruta metabólica de la degradación de la hemoglobina podría ser útil para el tratamiento de la ictericia en humanos.

Además de estas lagartijas, también hay peces, ranas y una especie de insecto con sangre verde, pero la concentración de biliverdina en estas especies no es tan grande.

Peces de hielo

Ahora nos falta hablar de cierto grupo de peces cuya sangre es trasparente. En el océano Antártico, los llamados "peces del hielo" carecen de pigmento respiratorio en la sangre, por lo que esta se considera sin color o transparente. Aunque parece ilógico no tener pigmento respiratorio en la sangre, es probable que se deba a que el pigmento aumentaría la viscosidad del fluido sanguíneo, lo que en lugares fríos dificultaría la actividad de bombeo del corazón. Así, la selección natural habría favorecido la eliminación del pigmento en estos organismos. Por otra parte, en este tipo de hábitat la disponibilidad de oxígeno es muy alta, por lo que no es necesario tener pigmento respiratorio. Incluso algunos investigadores han mostrado que estos peces han perdido la base ge-

nética para producir proteínas del tipo globulinas funcionales. Una desventaja es que estos peces poseen una tolerancia muy baja a la hipoxia (concentración de oxígeno por debajo de lo normal) en comparación con peces de sangre roja.

El color no importa

El estudio de la sangre en organismos como los mamíferos (incluidos los humanos) está muy avanzado, pero en otros como los anfibios y reptiles no. De los organismos de sangre azul o transparente sabemos muy poco. Una probable causa de esta desigualdad se debe a la dificultad de trabajar con ciertos organismos: obtener muestras para los análisis tiende a complicarse en lagartijas de cinco gramos de peso o ranas de tres centímetros.

Con el calentamiento global, una cantidad considerable de especies podrían desaparecer. Se ha propuesto que una opción es que migren a zonas más frías que las que habitan actualmente; por ejemplo, a zonas más elevadas o latitudes más altas, lo cual es bastante difícil para los cefalópodos y peces del hielo que ya habitan zonas cercanas a los polos. Sin embargo, para mamíferos, anfibios y reptiles sí es probable, siempre y cuando tengan los mecanismos fisiológicos y conductuales necesarios. Por ejemplo, el aumento de los glóbulos rojos y la hemoglobina en la sangre, así como proteínas que impidan la congelación de los tejidos.

Ahora que hemos platicado de la función de la sangre, así como de sus variaciones de color, debo decir que no se puede afirmar que un tipo de sangre sea mejor que otro. Simplemente, cada especie ha pasado por una serie de eventos de adaptación por selección natural que han moldeado a la especie de acuerdo con sus hábitos y biología en general. Los cefalópodos de sangre azul no son mejores organismos que los de sangre de otro color... y lo mismo se puede decir de los aristócratas en la especie humana, que otrora querían distinguirse por el supuesto color de su sangre.

Foto: Uwe Kils

Los peces del hielo (*Chaenocephalus aceratus*) carecen de pigmento respiratorio en su sangre; esta es incolora o transparente.

- Rosas Zavala, Alejandro; Karina Almeida Leñero, Noráh Barba Behrens, "La hemocianina: ¿existen los seres de sangre azul?", *Educación Química*, Revistas UNAM: http://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/66686/.
- Sierra Castillo, Claudia, "¿Tienen todos los animales sangre?", *Hypatia*, Gobierno del Estado de Morelos: www.revistahypatia.org/~revistah/index.php?option=com_content&view=article&id=148&Itemid=265
- Agencia SINC, "Desvelan el misterio de la sangre verde de los lagartos de Nueva Guinea", RTVE: www.rtve.es/noticias/20180521/desvelan-misterio-sangre-verde-lagartos-nueva-guinea/1737380.shtml

Juan Carlos González Morales es estudiante de doctorado en el Posgrado de Ciencias Biológicas de la UATx y colaborador del Instituto para la Conservación de la Cordillera Neovolcánica ante el Cambio Climático.

Jimena Rivera Rea es bióloga, estudiante de doctorado en Manejo y Conservación de Recursos Naturales en la UAEMéx y colaboradora del Instituto para la Conservación de la Cordillera Neovolcánica ante el Cambio Climático.

Descarga la **guía del maestro** para abordar este tema en el salón de clases.
www.comoves.unam.mx

LECTURA 14. Avatares químicos. En busca de nuevos fármacos

Avatares QUÍMICOS

En busca de nuevos fármacos

La rápida evolución de las enfermedades nos obliga a desarrollar tratamientos más eficaces en tiempo récord. Hoy, con herramientas computacionales, no solo podemos encontrar nuevas moléculas para producir medicamentos, también podemos seleccionar las más potentes y específicas y las menos tóxicas

Por **Cynthia Fernández Pomares**, **Humberto L. Mendoza Figueroa** y **José Correa Basurto**

En el ámbito de la informática un avatar es la representación gráfica de una persona en un en un entorno virtual. Nuestro avatar puede interactuar y hacer cosas que no haríamos en la realidad. Hay avatares hasta para las mascotas. Pues bien, hoy, con las herramientas computacionales que nos permiten simular fenómenos físicos y químicos, también podemos construir representaciones tridimensionales de las moléculas de las sustancias medicinales: avatares químicos que nos ayudan a encontrar nuevos fármacos.

Mecanismo de acción

Los fármacos son compuestos químicos usados para diagnosticar, prevenir o tratar enfermedades. En clase de química se dibujan como figuras geométricas y líneas interconectadas con letras que simbolizan los elementos químicos. Pero más allá del lápiz y el papel, el avatar de estas figuras, su representación en tercera dimensión, nos permite ver el orden en el que los átomos se unen, su distribución en el espacio y cómo interactúa la sustancia con otras moléculas; todo ello se simula utilizando cálculos matemáticos.

De la distribución tridimensional de los átomos depende el efecto biológico de la

molécula; es decir, su capacidad para modificar las funciones de las células del organismo. En este contexto a la molécula se le denomina *ligando*.

Para modificar esas funciones, el ligando tiene que adherirse primero a un elemento de la superficie de la célula: una proteína que llamamos "receptor" y también "objetivo farmacológico". Como resultado de esa unión, se activan o bloquean funciones específicas de la célula. Esto se conoce como mecanismo de acción farmacológica.

Figuras en la arena

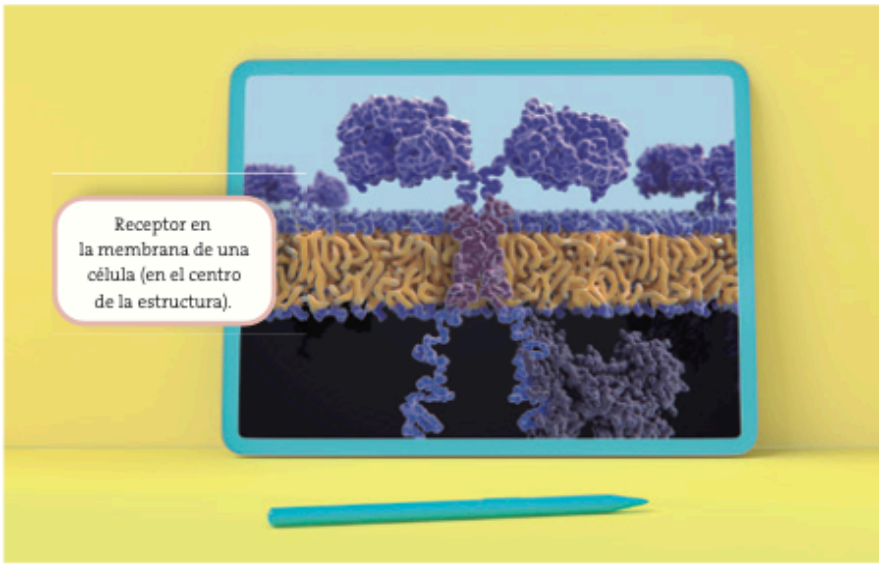
De los granos de arena surgió buena parte de la tecnología informática. El silicio, principal componente de la arena, es el segundo elemento más abundante en la Tierra y el primero en nuestras computadoras. Por eso a las investigaciones químicas y biológicas realizadas por medio de simulaciones por computadora se les llama estudios *in silico*, o en silicio, por analogía con los estudios *in vivo* (con organismos vivos) e *in vitro* (con células en tubos de ensayo y cajas de Petri).

En la farmacología clásica, las sustancias potencialmente medicinales se extraían, por ejemplo, de alguna planta, y sus efectos se probaban en tejidos o en animales vivos. Luego se buscaba el componente responsable de la actividad biológica: el principio activo. Después esta molécula se aislaba para estudiar su mecanismo de acción. Esta estrategia experimental es altamente costosa y tardada.

Los métodos de diseño de fármacos *in silico* van al revés de la farmacología clásica. En vez de empezar con una sustancia cuyos efectos se quieren probar, primero se selecciona una proteína receptora en la célula (un objetivo farmacológico) y luego se buscan moléculas capaces de unirse a ella. También podemos partir de una molécula específica y buscar la proteína receptora de la célula con la que pueda interactuar.

Ante todo, estructura

Todas las estrategias del diseño *in silico* exigen que conozcamos la estructura tanto de las moléculas de los fármacos potenciales como de las proteínas de la superficie de la célula. Estas estructuras se determinan por medio de técnicas experimentales como la cristalografía de rayos X —que se usó para revelar la estructura del ADN (veáse *¿Cómo ves?*, núm. 168)— y la resonancia magnética nuclear, que toman una especie de fotografía bidimensional o tridimensional de las estructuras.



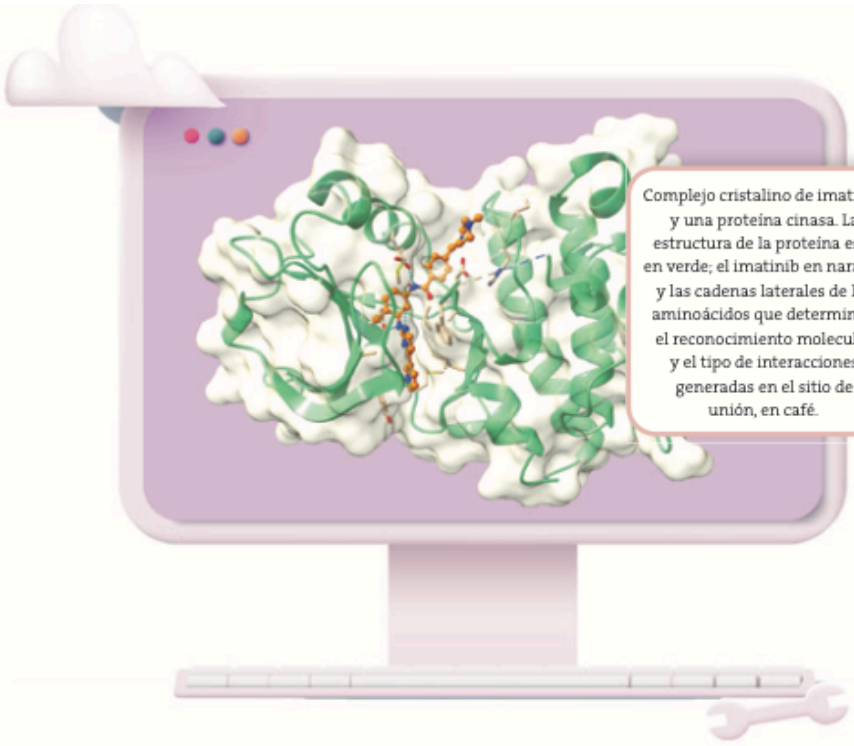
Las imágenes estructurales se convierten en números, que es como si tomáramos las medidas de una persona y las guardáramos en un archivo para construir su avatar digital. La información se almacena en bases de datos como DrugBank, Protein Data Bank, PubChem y ChEMBL. Los programas bioinformáticos utilizan estas bibliotecas virtuales para construir modelos matemáticos que calculan la forma en que pueden unirse el ligando y el receptor.

Ensayo y error

El imatinib es un medicamento que ha revolucionado la terapia contra uno de los tipos de leucemia (cáncer de células sanguíneas), la leucemia mieloide crónica. Su objetivo farmacológico es la proteína BCR-ABL, una especie de Frankenstein molecular producto de la fusión de los cromosomas 9 y 22. Esta proteína, también conocida como cromosoma Filadelfia, es una clase de cinasa, es decir una enzima que enciende y apaga procesos celulares; el problema es que dispara la proliferación desbocada de las células mieloides.

Lo que hace el imatinib es inactivar la función de la enzima anómala uniéndose a su sitio activo y provocando la muerte únicamente de las células que tienen el cromosoma Filadelfia.

Este fármaco no se diseñó por computadora, sino a fuerza de ensayo y error. En 1976 se aisló la estaurosporina, una molécula



Complejo cristalino de imatinib y una proteína cinasa. La estructura de la proteína está en verde; el imatinib en naranja y las cadenas laterales de los aminoácidos que determinan el reconocimiento molecular y el tipo de interacciones generadas en el sitio de unión, en café.

como tratamiento para la leucemia mieloide crónica. Así, una enfermedad mortal se transformó en un padecimiento crónico y tratable.

Pero probar cada molécula fue un proceso muy largo y costoso. Los estudios *in silico* agilizan este trabajo: es algo parecido a encontrar entre cientos de llaves (los ligandos) la que abre una puerta, pero en lugar de probar una por una, la simulación en computadora nos indica cuáles tienen las mayores probabilidades de funcionar.

Unirse o no unirse, esa es la cuestión

Una de las estrategias usadas para evaluar si un ligando posee alguna propiedad farmacológica es determinar si puede unirse a una proteína objetivo en la célula. La herramienta más utilizada para esto es el *docking*, o acoplamiento molecular, que no solo nos dice si el ligando y la proteína son compatibles, también predice la fuerza de unión y la variante del ligando que encaja mejor con la proteína objetivo. Normalmente, la fuerza de unión determinará la duración del efecto del nuevo fármaco: entre más fuerte la unión, más duradero el efecto.

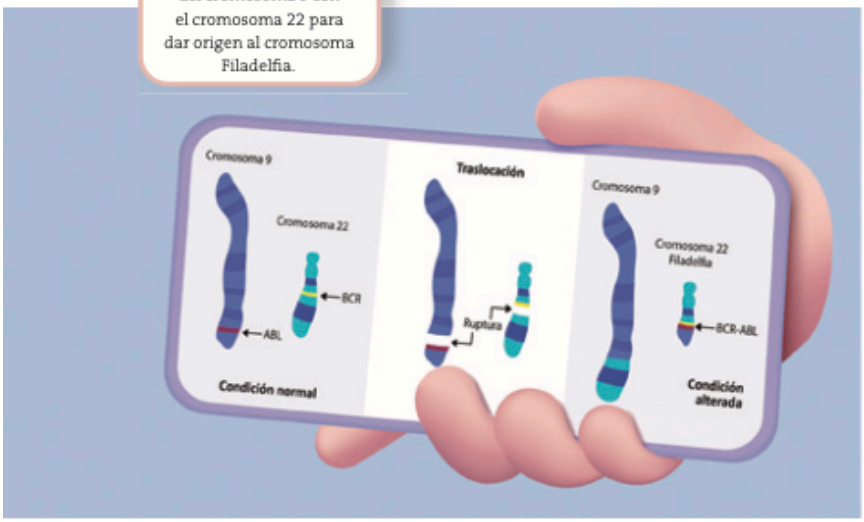
La forma en que un ligando activa o inhibe la función de su receptor se denomina conformación bioactiva. En el *docking* rígido, la proteína se mantiene en una sola posición geométrica mientras el ligando se mueve hasta encontrar un modo de unión de alta afinidad. En el *docking* flexible, la proteína se somete a efectos dinámicos hasta encontrar la conformación bioactiva del ligando. Es un poco como esos juguetes para bebés que consisten en un cubo con perforaciones de diversas formas en las que hay que encajar la pieza de la forma correspondiente. El *docking* rígido equivaldría a buscar piezas que quepan en un hueco específico y el flexible a moldear la pieza hasta encontrar la forma que mejor encaje en el hueco. La computadora asigna una puntuación a cada conformación (o forma geométrica) del ligando. Las más afines a la proteína objetivo, las más estables y que requieran menos energía para unirse, serán las mejor calificadas.

No es lo mismo, pero es igual

A pesar de que el imatinib cambió el pronóstico de la leucemia mieloide crónica, algunos pacientes desarrollaron resistencia al tratamiento. Mutaciones en el gen que hace que la célula fabrique la

producida por bacterias marinas que inhibe la actividad de las cinasas, matando cualquier tipo de célula. Partiendo de allí, el equipo del bioquímico Nicholas B. Lydon, en Suiza, identificó una estructura similar, pero más simple y específica para inhibir una clase de cinasas. Con esa molécula base, los investigadores diseñaron cientos de moléculas con modificaciones estructurales que se fueron probando una a una. Fue hasta 1996 cuando, en colaboración con el oncólogo Brian Druker, del Instituto Dana-Farber, en Boston, se encontró entre todas esas moléculas una que inhibía exclusivamente la acción de la fusión de los cromosomas 9 y 22. Finalmente, en 2001 el imatinib se aprobó

Este diagrama muestra cómo se fusiona una parte del cromosoma 9 con el cromosoma 22 para dar origen al cromosoma Filadelfia.



¿Y la inteligencia artificial?

ChatGPT es un modelo de lenguaje de inteligencia artificial (IA) que simula conversaciones con los usuarios y responde todo tipo de preguntas. Le preguntamos si la IA puede ayudar al diseño de fármacos y si nos podía dar algún ejemplo. Ésta fue su respuesta:

"La IA puede predecir la actividad biológica de las moléculas candidatas a fármacos mediante el uso de modelos de aprendizaje automático *(machine learning)*. Estos modelos se entrenan con grandes conjuntos de datos de experimentos biológicos y clínicos que incluyen información sobre la estructura de las moléculas y su actividad biológica. Una vez entrenado, el modelo puede utilizarse para predecir la actividad biológica de nuevas moléculas.

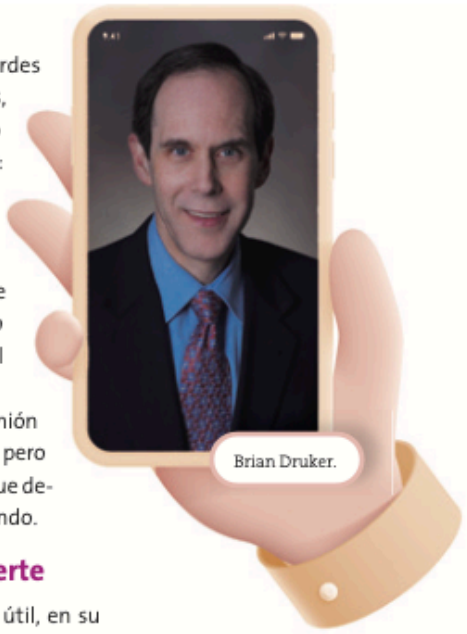
Por ejemplo, se podría entrenar un modelo de aprendizaje profundo en datos sobre la actividad biológica de una amplia variedad de moléculas antivirales. Una vez entrenado, el modelo podría utilizarse para predecir la actividad antiviral de nuevas moléculas candidatas. De esta manera, los investigadores podrían centrarse en las moléculas más prometedoras para su posterior evaluación en experimentos biológicos y clínicos."

proteína BCR-ABL modificaron el sitio activo de la proteína original, debilitando la unión del imatinib. A partir de la estructura cristalizada del imatinib y el receptor unidos, se hicieron modificaciones al esqueleto del fármaco, añadiendo o cambiando átomos que reforzaban la unión. Los avatares de estas nuevas moléculas fueron evaluados por *docking* molecular y así se encontró un nuevo fármaco más potente y eficaz para tratar esa leucemia: el nilotinib. En este ejemplo, los investigadores tomaron una molécula base y suponiendo que la estructura es la clave de la eficacia, crearon en el laboratorio versiones ligeramente modificadas que tenían un efecto igual o mayor.

Pero toda regla tiene excepciones: hay compuestos que, sin parecerse en estructura, tienen efectos similares, por ejemplo, el ketorolaco y el ibuprofeno, dos medicamentos antiinflamatorios y analgésicos. También hay moléculas que se parecen, pero cuyos efectos son opuestos, como la psilocibina y la clozapina: la primera es un alucinógeno, la segunda un antipsicótico.

Volvamos al ejemplo del juguete. En la abertura cuadrada cabría perfectamente un triángulo si su altura es menor que el lado del cuadrado. Pero el triángulo no toca todos los bordes del espacio cuadrado; en otras palabras, interactúa de forma diferente. Lo mismo ocurre entre los fármacos y su receptor: los átomos de ambos interactúan entre sí para desencadenar un efecto. Si una molécula no interactúa con los mismos aminoácidos (moléculas que se combinan para formar proteínas) o interactúa con otros, probablemente el efecto será menor o hasta opuesto.

El *docking* solamente indica si la unión entre dos moléculas será favorable o no, pero hay otras características importantes que determinan la actividad biológica del ligando.


Brian Druker.

Prohibido dejarlo a la suerte

Para que un ligando sea clínicamente útil, en su diseño hay que tomar en cuenta otras características, pues aunque la nueva molécula tenga buenas probabilidades de unirse al objetivo puede resultar altamente tóxica, degradarse muy rápido en el organismo e incluso ser imposible de absorber.

Para superar estos obstáculos, otros métodos *in silico* calculan las propiedades fisicoquímicas, tóxicas y hasta la dosis en que las moléculas recién diseñadas ejercerán su acción. Un ejemplo es el método denominado "relación cuantitativa estructura-actividad" (QSAR, por sus siglas en inglés), que da una aproximación de estas propiedades comparando el ligando con fármacos conocidos de estructura y características similares a él. Con ello construye el modelo matemático en el que se basarán sus predicciones. Como estos modelos dan una idea de las propiedades del nuevo compuesto, se reduce la cantidad de experimentos y animales necesarios para ponerlo a prueba.

Los métodos *in silico* permiten filtrar una lista de candidatos a moléculas con acción farmacológica para solamente sintetizar las más prometedoras.

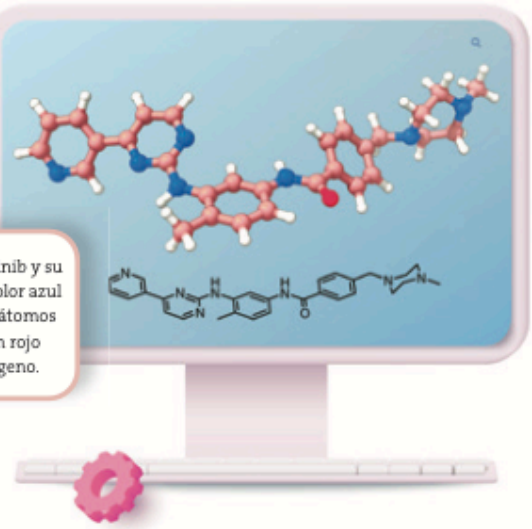
La magia de crear

En el laboratorio materializamos los avatares de las moléculas mejor calificadas por los métodos *in silico*. Para sintetizarlos se hacen reaccionar materias primas hasta que forman la estructura deseada.

Si bien a la hora de crear *in silico* el límite es la imaginación, muchas veces las rutas de síntesis química no son sencillas. Algunas requieren pasar de una reacción a otra para obtener productos inter-

medios que nos permitan continuar el camino. Por eso es necesario buscar la ruta óptima que maximice la producción con el fin de reducir el costo del producto final.

Los obstáculos no acaban ahí. A veces las nuevas moléculas resultan químicamente inestables en condiciones ambientales y una vez purificadas se degradan, lo que causa no pocas frustraciones. Pero es fascinante que cambiar un solo átomo por otro, o simplemente modificar su posición, pueda dar un efecto completamente diferente.



Estructura del imatinib y su imagen en 3D. En color azul se representan los átomos de nitrógeno y en rojo un átomo de oxígeno.

Nicholas B. Lydon.

De la computadora a la farmacia

Una vez sintetizada una nueva molécula, hay que probar su efecto en un sistema biológico: en ensayos preclínicos en células *(in vitro)* y animales *(in vivo)*, y ensayos clínicos en humanos. Desarrollar un nuevo fármaco desde su diseño hasta su aprobación toma entre 10 y 15 años, un proceso de gran costo económico y humano, si además se toma en cuenta que solo se aprueba el 12 % de los fármacos que llegan a la fase clínica.

Aunque los resultados de los modelos computacionales solo son simulaciones —avatares de estructuras químicas que predicen cómo actuarían en la realidad—, el diseño de fármacos *in silico* gana cada día más terreno por ser una manera más rápida y certera de encontrar nuevos medicamentos con efectos específicos, menos tóxicos para el paciente, a menor costo e incluso menos dañinos para el ambiente.

Agradecemos al Dr. Jonathan Cueto Escobedo, al M. en C. Luis Ángel Luis Gil y a la Dra. Miriam Guadalupe Báez por sus aportaciones y comentarios, que enriquecieron este artículo.

- Prieto Martínez, Fernando y José L. Medina Franco, "Diseño de fármacos asistido por computadora: cuando la informática, la química y el arte se encuentran", *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, México, 2020: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2018000200201.
- Scior, Thomas, Evelyn Martínez Morales y Eduardo Salinas Stefanón, "Los modelos *in silico*, una herramienta para el conocimiento farmacológico", *Elementos: Ciencia y Cultura*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, 2007: https://elementos.buap.mx/index.php.

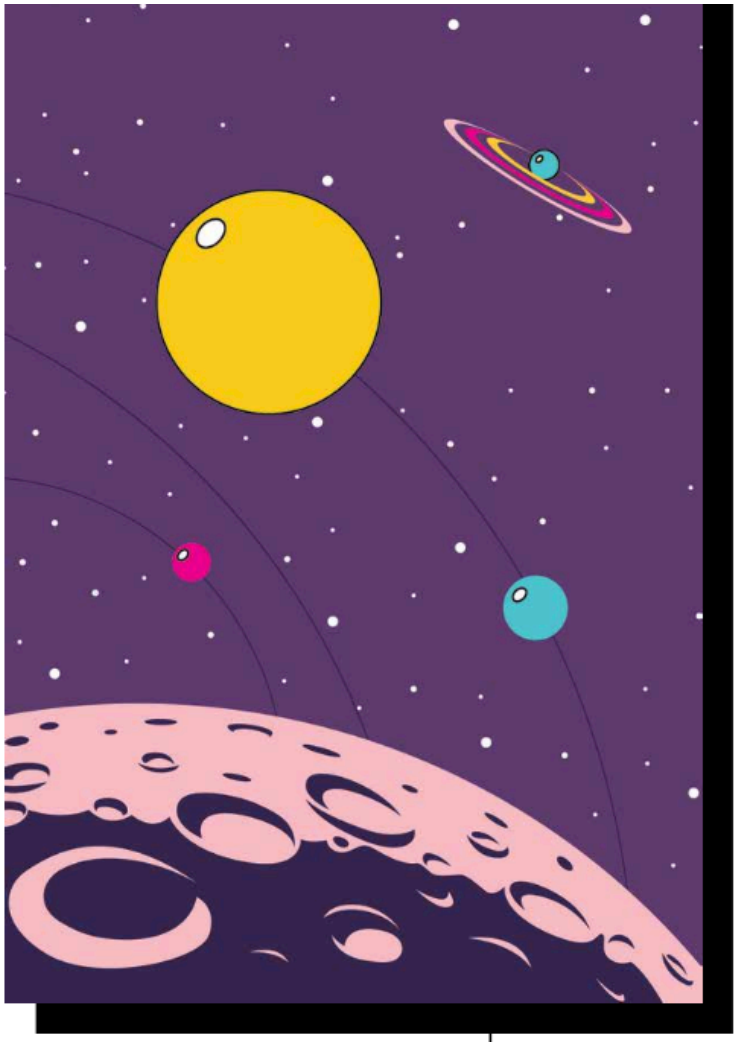
Los autores son investigadores del Laboratorio de Diseño y Desarrollo de Nuevos Fármacos e Innovación Biotecnológica de la Escuela Superior de Medicina del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

José Correa Basurto es médico, maestro en farmacología y doctor en investigación en medicina. Ha sido responsable técnico de proyectos nacionales e internacionales de diseño y desarrollo de fármacos y nanovacunas.

Humberto L. Mendoza Figueroa es doctor en farmacología. Desarrolla proyectos relacionados con la química medicinal para el diseño y síntesis química de nuevas moléculas con actividad anticancerígena.

Cynthia Fernández Pomares es investigadora del programa Estancias Posdoctorales por México 2021 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Estudia el efecto de compuestos anticancerígenos sobre el metabolismo.

LECTURA 15. “PLANETA” es una palabra errante.



Los términos que usamos para expresar el conocimiento científico se tienen que ir redefiniendo conforme este avanza. Es lo que le ha ocurrido a la palabra "planeta" desde hace milenios.

En los cielos de la antigua Grecia los "planetas" eran Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, pero también el Sol y la Luna porque estos se mueven entre las constelaciones, y por lo tanto eran un astro errante en el sentido griego de entonces.

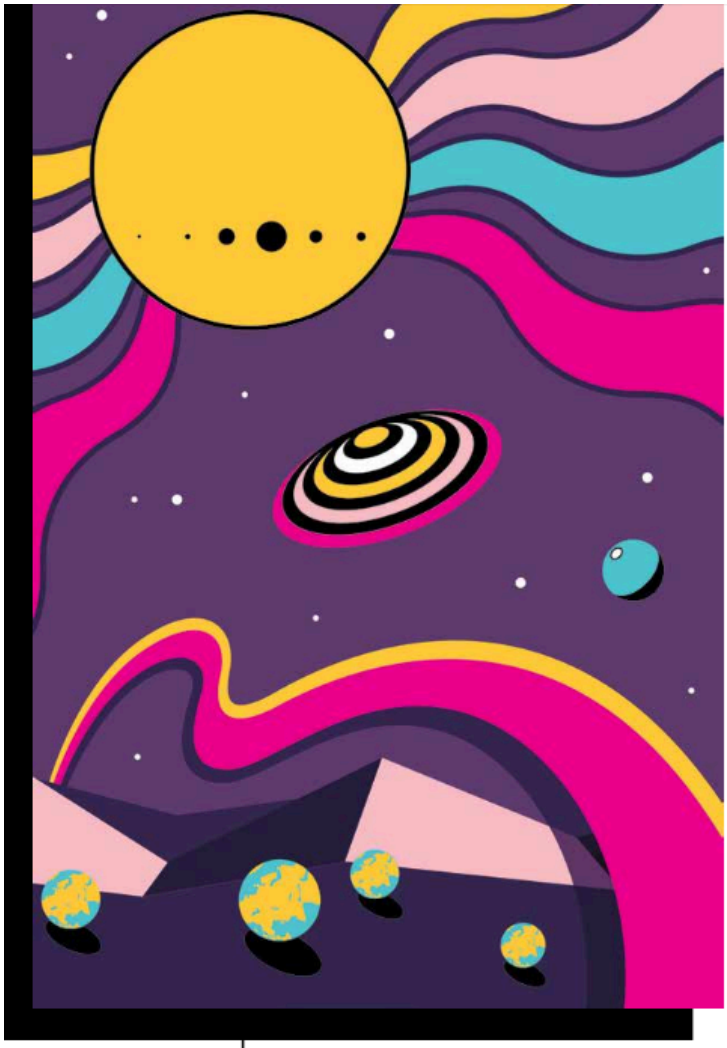
Vayan a la Grecia antigua, díganle a un griego que vivimos en un planeta y verán que los manda al manicomio. Y con toda la razón. No es porque el griego sea tonto y no sepa. No es que le estemos revelando un conocimiento demasiado avanzado para su época. Es simplemente que "planeta" quería decir una cosa totalmente distinta hace 2 300 años.

Paseantes

En algún momento en la primaria o secundaria uno aprende que "planeta" quiere decir "errante" en griego... y se queda en las mismas porque la palabreja no le dice nada. Tras varias décadas de saber que "planeta" era "errante", hace unos años di una clase sobre Johannes Kepler en el campus Juriquilla de la UNAM. Una de las participantes era griega y aproveché para preguntarle qué significa "planeta" en su lengua. Me contestó que el verbo correspondiente en griego moderno significa "pasear".

Falta saber por qué pensaban los griegos que los planetas paseaban. Si uno mira al cielo inocentemente pero con detenimiento, como hicieron los humanos de muchos lugares en épocas remotas, al cabo de un tiempo distinguirá dos tipos de luces en el cielo: las que giran todas juntas alrededor del mundo formando siempre los mismos dibujos en la bóveda celeste —las constelaciones— y las que, además de girar con todo lo demás, se desplazan sobre ese telón de fondo cambiando de posición relativa entre ellas y respecto a las constelaciones. Haciendo abstracción de la rotación diaria de la bóveda celeste, lo más natural es llamarlas "luces que no se mueven (fijas)" y "luces que sí se mueven (errantes)", y eso es lo que hicieron los griegos antiguos, aunque en vez de luces las nombraron "astros" o "estrellas".

Tenemos que batallar un poco con nuestros conocimientos del siglo XXI para entender que para los griegos el Sol también era un planeta. Hay que pensarlo así: si su brillo no opacara las estrellas, veríamos que el Sol también se mueve entre las constelaciones, y por lo tanto es un astro errante en el sentido griego antiguo. Y la Luna igual. Así pues, en



Siguiendo a Copérnico, si la Tierra gira alrededor del Sol (como ahora sabemos lo hacen Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno,) entonces es como las estrellas errantes. Por consiguiente, estas son como la Tierra y entonces son mundos posiblemente habitados.

los cielos griegos los planetas eran Mercurio, Venus, la Luna, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno (los otros planetas que conocemos hoy solo se ven con telescopio y por lo tanto no los conocían los griegos). Nada que ver con nuestro concepto moderno, según el cual un planeta es un mundo que gira alrededor de un sol (no quiero escribir "estrella" porque esa palabra tampoco quería decir lo mismo que hoy).

¿Y la Tierra qué venía siendo en este galimatías? La Tierra era la parte habitable del Universo (el cual en aquellos tiempos se llamaba mundo, para mayor confusión de los humanos del siglo XXI): una esfera situada en el centro de todo, en cuya superficie vivía la humanidad y alrededor de la cual giraban las estrellas —las fijas y las errantes—. Si un día viajan en el tiempo a la Grecia antigua, eviten llamarle "planeta" a la Tierra. A los griegos antiguos les sonaría tan absurdo como nos suena a nosotros que el griego nos diga que el Sol es un planeta. Y sin embargo, tanto nosotros como el griego tenemos razón. "Planeta" es una palabra errante que ha ido cambiando de significado a lo largo de los siglos para ajustarse a lo que vamos averiguando acerca del Universo.

Revolución

Nicolás Copérnico es famoso porque tiene una estatua en Chapultepec y también porque fue el primero que dijo que la Tierra da vueltas alrededor del Sol y le hicieron caso (fue el primero en decirlo *al que le hicieron caso*; hubo otros que lo dijeron antes, pero no lo fundamentaron tan bien y los ignoraron). Y lo dijo en un librote en el que construía cuidadosamente el argumento a favor de esta idea. Les ahorro los detalles.

Una vez que le hicieron caso a Copérnico, muchos años después de su muerte, y todo el mundo se convenció de que la Tierra no estaba fija en el centro del cosmos, sino dando vueltas alrededor del Sol, ocurrió un maremágnum conceptual con la palabra "planeta". Si la Tierra gira alrededor del Sol como ahora sabemos que hacen Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, entonces la Tierra es como una estrella errante. Y si la Tierra es como las estrellas errantes, entonces estas son como la Tierra. Por lo tanto, los planetas no son simples lucecitas en el cielo: son otros mundos, otras esferas de tamaño considerable y posiblemente habitadas. Incluso se pensaba que tenían que estar habitadas. El argumento queda muy bien ilustrado por este párrafo que me encanta del artículo "Astronomía" de la primera edición de la *Encylopaedia Britannica* (1771): "En la superficie de la Luna, por encontrarse más cerca que ningún otro cuerpo celeste, vemos un mayor parecido con la Tierra. Con ayuda de telescopios vemos que la Luna está llena de altas montañas, extensos valles y profundas cavidades. Estas semejanzas no dejan duda de que todos los demás planetas y lunas del sistema están diseñados para albergar criaturas con capacidad de conocer y adorar a su benéfico Creador". Era un argumento muy común en la época: esos nuevos mundos también eran obra de Dios, y como Dios no hace nada en balde —y como esos mundos claramente no son para nosotros—, deben ser para sus propios habitantes, los cuales (no faltaría más) necesariamente serán inteligentes y adorarán a su creador.

O sea que, además, la revolución copernicana abrió las puertas al concepto de habitantes de otros planetas, pero esa es otra historia.

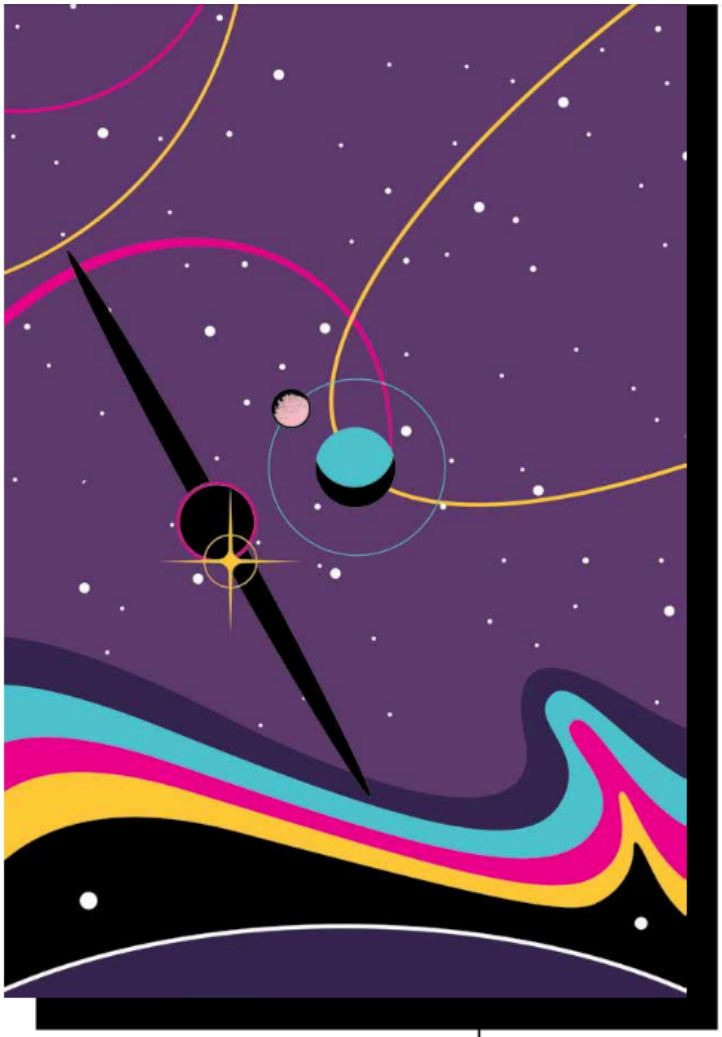
El nuevo de la colonia

La palabra "planeta" siguió vagando. En 1610 Galileo Galilei descubrió con su telescopio cuatro es-

trellitas girando alrededor de Júpiter y las llamó "planetas mediceos" en honor de la familia Medicis, gobernantes de su nativa Toscana. Quién sabe en qué momento, después de Galileo, los objetos que giraban alrededor de objetos más grandes como los planetas mediceos alrededor de Júpiter o la Luna alrededor de la Tierra dejaron de llamarse planetas para llamarse satélites o lunas. A principios del siglo XIX, cuando empezaron a aparecer objetos antes desconocidos entre las órbitas de Marte y Júpiter, también se les llamó planetas durante un tiempo, hasta que fueron tantos que resultaba incomodísimo, y para referirse a ellos el astrónomo William Herschel inventó la palabra "asteroide", que significa "parecido a una estrella". Herschel eligió este nombre porque los asteroides eran tan pequeños que al telescopio se veían como puntitos de luz, igual que las estrellas lejanas.

Luego apareció Plutón. Cuando lo encontró el astrónomo Clyde Tombaugh, en 1930, lo más natural era incluirlo entre los planetas. Era un objeto que giraba alrededor del Sol, y además el hallazgo era la culminación de la búsqueda de un hipotético "planeta X", que empezó tras el descubrimiento de Neptuno 100 años antes. Esta búsqueda pasó por varias etapas, entre ellas una en la que Urbain Leverrier, el descubridor de Neptuno, buscó al planeta X entre el Sol y Mercurio. Leverrier se refería a su hipotético planeta intramercuriano como Vulcano, nombre de un dios romano asociado con el calor tremendo que haría en ese planeta por estar tan cerca del Sol. Tombaugh trabajaba en el Observatorio Lowell, fundado por el millonario Percival Lowell para estudiar los míticos canales de Marte y para encontrar el planeta X. Este acabó por aparecer, pero de canales, nada. Eran una quimera, como bien pudo haberlo sido también el planeta X.

Sumar un miembro a la lista de planetas no era nada del otro jueves. Ya había ocurrido en 1781 con el descubrimiento de Urano, en 1801 con el descubrimiento de Ceres (el primer asteroide, originalmente considerado como un planeta que "faltaba" entre Marte y Júpiter) y en 1846 con el descubrimiento de Neptuno. Tras el hallazgo de Tombaugh se organizó un concurso para ponerle nombre al nuevo hermanito y lo ganó una niña inglesa de 11 años llamada Venetia Burney, que propuso el nombre del dios romano del inframundo, Plutón (Hades, en griego). Digamos, el Mictlantecuhtli de por allá. Qué encantadora chica.

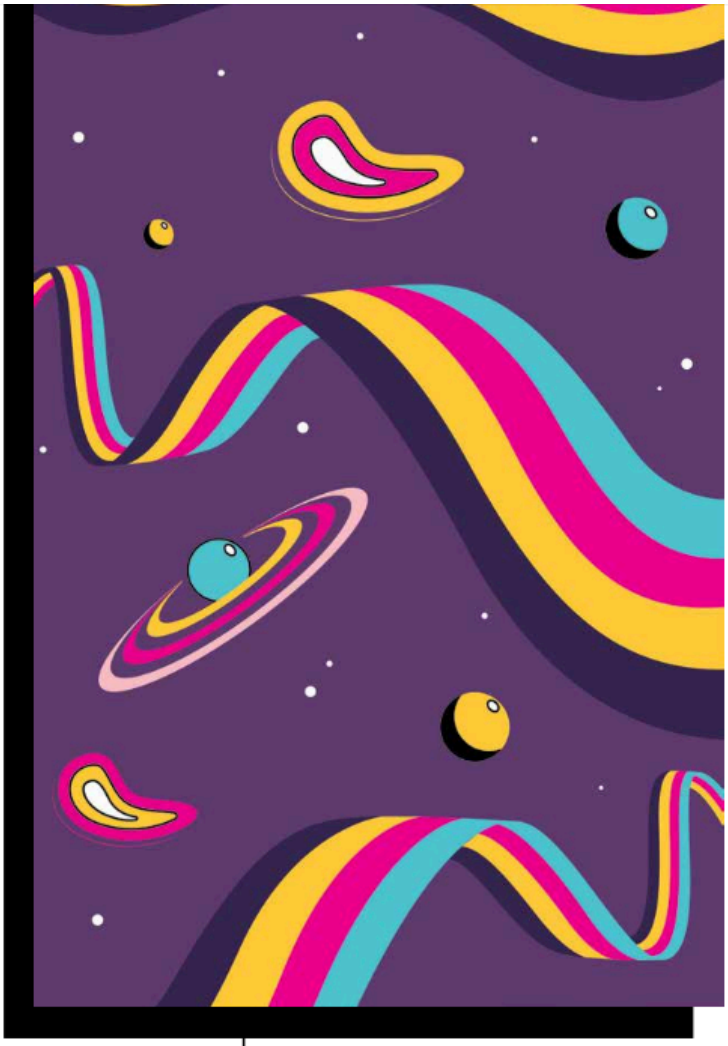


Fue William Herschel quien inventó la palabra "asteroide", que significa "parecido a una estrella", porque los asteroides eran tan pequeños que al telescopio parecían puntitos de luz, igual que las estrellas lejanas.

Sospechoso

Plutón siempre fue el raro de la familia. Es rocoso y más pequeño que la Luna, pese a encontrarse en la región que nos habíamos acostumbrado a considerar como el dominio de los planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). Su órbita está muy inclinada respecto al plano de los planetas respetables, y además tiene la osadía de cruzar la órbita de Neptuno, razón por la cual Plutón empezó a ser el planeta más lejano apenas en 1999, pese a lo que nos enseñaban en la escuela.

Por si fuera poco, la teoría de la formación del Sistema Solar de los años 50 explicaba que más allá de Neptuno debería de haber una franja muy ancha llena de objetos rocosos de tamaños muy variados, incluso más grandes que Plutón. Esta franja se llama cinturón de Kuiper. Desde entonces los astrónomos miraban a Plutón con suspicacia. ¿Sería Plutón un objeto del cinturón de Kuiper, y por lo tanto, uno de muchos objetos similares? ¿Había que incluir a estos entre los planetas?



Desde los años 50 se sospechaba que más allá de Neptuno debía existir una ancha franja de objetos rocosos de diversos tamaños, incluso más grandes que Plutón: el cinturón de Kuiper. En los años 90, con mejores telescopios, se empezaron a encontrar dichos planetoides.

Los hermanos de Plutón

A partir de los años 90, con mejores instrumentos de observación, los astrónomos empezaron a encontrar planetoides más allá de Neptuno con todas las características que se esperaban desde hacía 40 años de los objetos del cinturón de Kuiper. Un día salía una noticia: "La NASA descubre el décimo planeta del Sistema Solar". Poco tiempo después, otra noticia: "La NASA descubre el décimo planeta del Sistema Solar". Y así, cada cierto tiempo, se descubría el décimo planeta del Sistema Solar. ¿Cuántos décimos planetas podía tener el Sistema Solar?

En realidad eran objetos del cinturón de Kuiper, y todos se parecían a Plutón. Tanto se parecían, que los astrónomos ahora sí miraban al noveno planeta con franca desconfianza. Añádase que en esa misma época aparecieron también planetas girando alrededor de otras estrellas, objetos de tamaños entre estrella y planeta llamados enanas marrones, e incluso mundos de dimensiones planetarias vagando por el espacio interestelar sin vínculo gravitacional con ninguna estrella. Nadie estaba pensando aún en retirarle a Plutón la membresía del club planetario, pero los murmullos del mundo astronómico llegaron hasta los noticieros y se malinterpretaron, como ocurre frecuentemente con las noticias científicas. En febrero de 1999 la Unión Astronómica Internacional (UAI) —el órgano internacional responsable de la nomenclatura en astronomía— se sintió obligada a publicar un desmentido: no, nadie estaba expulsando a Plutón. Y añadía: "La UIA lamenta que estas imprecisiones hayan causado inquietud pública". Quizá tendrían que haber añadido un "por ahora" al desmentido, porque la comunidad astronómica sí estaba empezando a considerar la necesidad de esclarecer el estatus de los objetos "transneptunianos" (de más allá de Neptuno), y con este, el de Plutón.

Los asteroides habían dejado de llamarse planetas no solo porque fueran muchos y hubiera sido incomodísimo (hoy en día serían más de 135 000 planetas que aprenderse en la primaria), sino porque claramente formaban una familia de objetos con el mismo origen y evolución: una clase que estaba allá afuera en la naturaleza, y no una simple distinción humana arbitraria sin significado físico. Los objetos del cinturón de Kuiper también forman una clase señalada por su origen (son desechos de la formación del Sistema Solar, desterrados por la gravedad de Júpiter a la oscura periferia, donde vagan rodeados de sus congéneres). Tal vez eso se podría tomar en cuenta para excluirlos de la lista de los planetas.

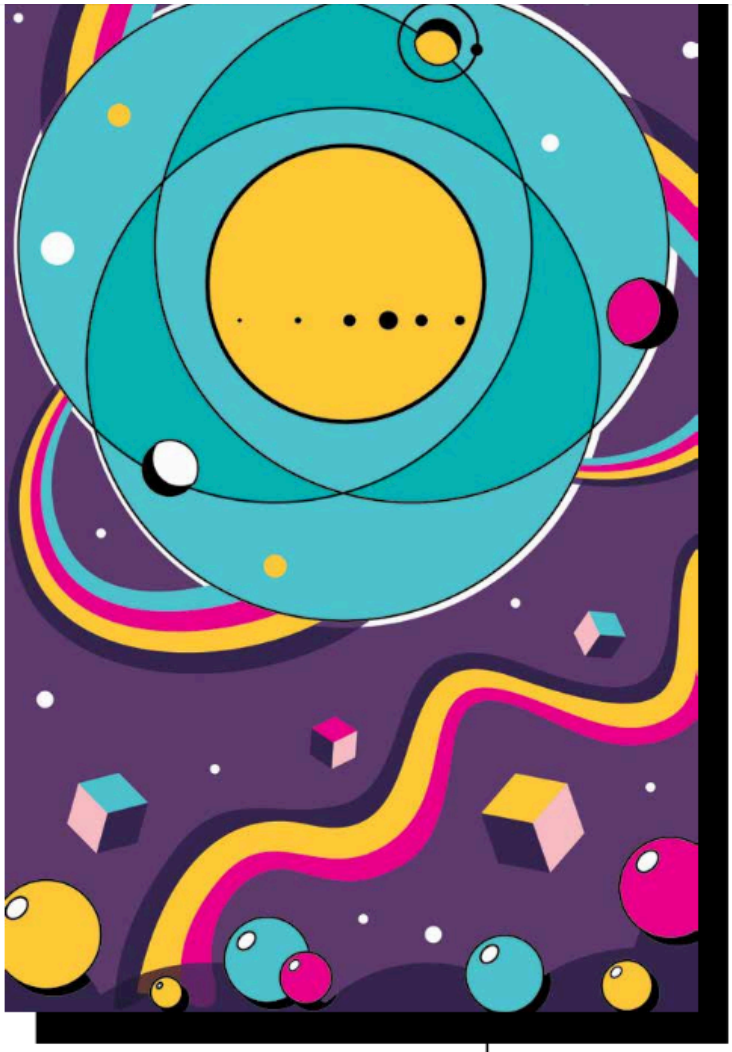
Plutón expulsado

Las cosas se pusieron intensas en 2005 con el descubrimiento de uno de esos "décimos planetas" del Sistema Solar: el objeto que hoy se conoce como Eris, cuya masa es mayor que la de Plutón. En 2006, orillada por los acontecimientos, la UAI formó un comité para explorar posibles definiciones de la palabra "planeta". Desde la revolución copernicana se había entendido que "planeta" es un objeto que gira alrededor del Sol en una órbita estable y poco alargada (esto para excluir a los cometas, que giran alrededor del Sol en órbitas muy alargadas). Con la aparición —y posterior exclusión— de los asteroides, se añadió a esta definición tácita la idea de que el objeto fuera de cierto tamaño, pero nunca se especificó cuál. Ahora se hacía urgente proponer una definición oficial, lo que nunca había ocurrido, por extraño que parezca.

Había quien sugería que simplemente se decidiera un tamaño a partir del cual se tenía derecho a ser planeta (por ejemplo, de Plutón para arriba), pero resultaba un criterio muy artificial. En el Sistema Solar hay objetos de todos los tamaños girando alrededor del Sol, desde granos de polvo hasta planetas gigantes, sin solución de continuidad; ¿con qué criterio físico significativo se establecería el tamaño mínimo de la planetitud? Otras personas proponían que se considerara planeta a cualquier objeto con masa suficiente para adquirir forma esférica por su propia gravedad (en cuyo caso habría que incluir al asteroide Ceres), pero esto también era arbitrario: no hay una frontera bien definida entre objetos esféricos y objetos que no lo son. ¿Qué grado de desviación de la esfericidad se consideraría aceptable? Añádase, además, la dificultad de determinar la forma exacta de objetos muy pequeños y muy lejanos.

En agosto de 2006, tras muchas discusiones, la UIA adoptó una definición que exige —además del criterio de esfericidad— que el aspirante a planeta haya barrido (o dispersado) la mayor parte del material a lo largo de su órbita, criterio propuesto por Alan Stern y Harold Levison. En esencia, esto exige que el candidato sea el objeto cuya gravedad domina en su región del Sistema Solar, cosa que no se puede decir de Eris.

Ni de Plutón. Ni modo. No se podía adoptar una definición arbitraria como la del tamaño o la de la forma esférica solo para poder incluir a Plutón en el club planetario. Los científicos necesitan definiciones que en la medida de lo posible estén basadas en distinciones naturales cuantificables, y no había ninguna definición con estas características que pudiera incluir al antiguo noveno planeta al tiempo que excluía a los otros objetos del cinturón de Kuiper. Con la nueva definición —que, por cierto, vale únicamente para el Sistema Solar— la UAI solo estaba haciendo lo que se había hecho tantas veces a lo largo de la historia: ajustar el significado del término "planeta" al conocimiento científico del momento. No hay nada más cambiante que el conocimiento científico. Quizá en el futuro se hará necesario reconsiderar otra vez, y la palabra "planeta" vuelva a vagar.



En 2006 la UIA adoptó una nueva definición que exige que el aspirante a planeta sea el objeto cuya gravedad domina en su región del Sistema Solar, con lo cual Plutón quedaba excluido.

- Planesas, Pere, *La idea de planeta a lo largo de la historia*, Unión Astronómica Internacional: http://astronomia.ign.es/rknowsys-theme/images/webAstro/paginas/documentos/Anuario/laideadeplaneta.pdf
- Marín, Daniel, "La historia del Sistema Solar o de cómo Saturno salvó a la Tierra", *Eureka*: https://danielmarin.naukas.com/2011/07/04/la-historia-del-sistema-solar-o-de-como-saturno-salvo-a-la-tierra/
- Basri, Gibor, *Una buena definición de la palabra "planeta": ¿misión imposible?*, Universidad de Berkeley: https://astrosociety.org/file_download/inline/a9bb3988-cbca-471d-9cdc-9871ccbcd794

Sergio de Régules es divulgador de la ciencia y coordinador científico de *¿Cómo ves?* En 2019 ganó el Premio Nacional de Divulgación de la Ciencia y la Técnica otorgado por la SOMEDICYT y en 2021 el Premio Latinoamericano a la Popularización de la Ciencia y la Tecnología, otorgado por la RedPOP.

LECTURA 16. PLEGANDO PROTEÍNAS

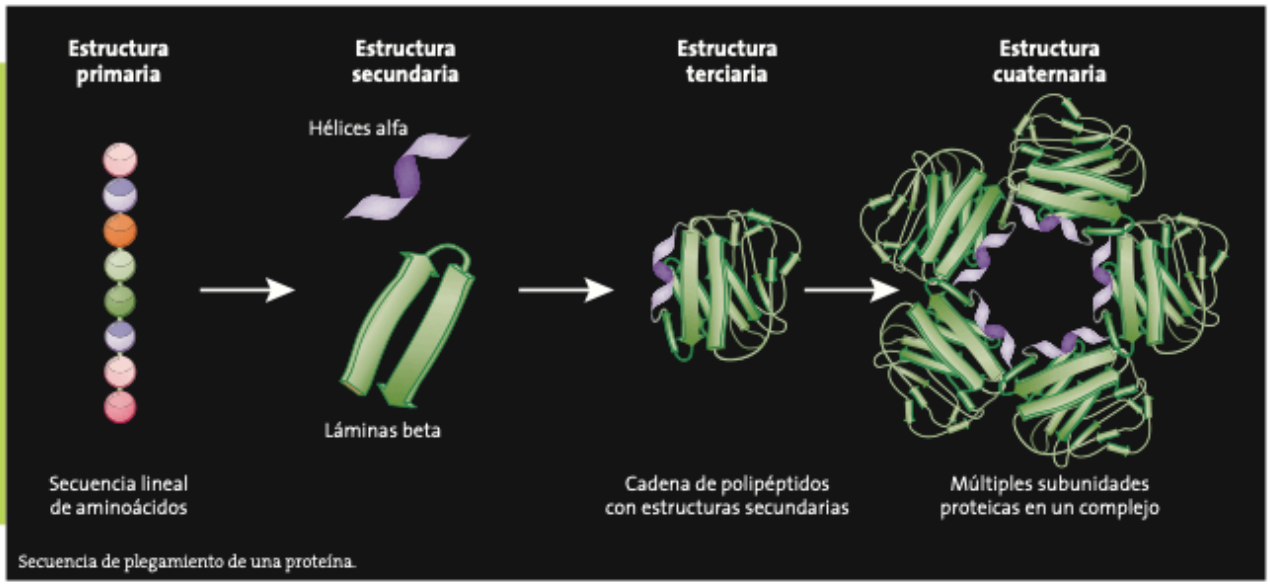
NAS

La inteligencia artificial está revelando la estructura de moléculas esenciales para la vida

Durante la Segunda Guerra Mundial escasearon en los países en conflicto toda clase de productos, desde azúcar hasta jabón y zapatos. Uno de los alimentos que más se racionaron fue la carne. Ante la escasez de carnes tradicionales comenzó a investigarse la posibilidad de usar carne de ballena como suplemento (la guerra hace cosas muy raras). Gracias a esa investigación, a principios de la década de 1950 el bioquímico John Kendrew, de la Universidad de Cambridge, descubrió en su universidad una reserva congelada de carne de cachalote, una especie de ballena que se sumerge a profundidades enormes para buscar alimento.

Cachalotes y rayos X

Kendrew estaba interesado en determinar experimentalmente la estructura atómica de las proteínas. Hasta entonces nadie había logrado escudriñar la escala nanométrica que habitan las proteínas para apreciar su forma tridimensional. El problema era muy importante debido al papel esencial de estas moléculas —gigantescas para los estándares celulares— en el funcionamiento de un organismo. Conocer su forma con precisión proporciona una clave para entender cómo funcionan estas máquinas moleculares y cómo interactúan con otras moléculas, información útil para campos tan diversos como la neurobiología, la evolución y la inmunología. El investigador inglés había volcado casi todos sus esfuerzos en el estudio de una proteína en particular: la mioglobina, que almacena oxígeno en los músculos. Su intención era usar una técnica llamada cristalografía de rayos X, que



Secuencia de plegamiento de una proteína.

aprovecha el fenómeno de la difracción de los rayos X cuando pasan a través de un cristal para revelar la estructura incógnita de la molécula. Para sus experimentos Kendrew necesitaba crear grandes cristales de mioglobina, lo que se puede hacer de varias formas, todas las cuales requieren la proteína en buenas cantidades.

Antes de su encuentro con la carne de cachalote refrigerada Kendrew había empleado mioglobina de corazón de caballos, pero pronto descubrió que los animales buceadores, que necesitan aguantar la respiración durante tiempos prolongados, tienen concentraciones más altas de esta proteína. Tras intentar con tortugas, delfines, pingüinos y otros animales marinos, el investigador consideró las posibilidades que ofrecían los cachalotes. En una carta a un colega Kendrew escribe: "hace tres semanas obtuvimos los cristales de mioglobina más maravillosos: de cachalote, ni más ni menos". "Son cristales gigantescos", añade, seguramente emocionado tras unos siete años de trabajar en este proyecto.

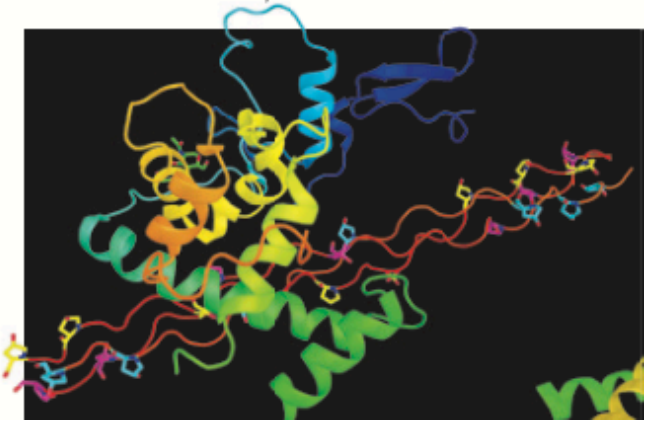
Con los cristales de mioglobina de carne de cachalote, Kendrew y su equipo lograron determinar que la proteína tenía una estructura formada por ocho hélices conectadas por bucles. Casi al mismo tiempo, su colega Max Perutz, en el mismo instituto, descifró la estructura tridimensional de una proteína hermana, la hemoglobina. A partir de las formas que revelaron estos equipos pudo entenderse, por ejemplo, cómo se une la hemoglobina a las moléculas de oxígeno en los pulmones, cómo las libera y cómo se las pasa a la mioglobina.

En 1962 Kendrew y Perutz recibieron el premio Nobel de Química por sus descubrimientos, que les tomaron años, equipos completos de trabajo y miles y miles de libras. Más de seis décadas después, hay programas de inteligencia artificial que pueden hacer algo muy similar en cuestión de minutos, y hasta en segundos.

Un problema duro de roer

Desde aquellos trabajos pioneros se ha descifrado la estructura de montones de proteínas, y hemos descubierto que tienen una inmensa diversidad de formas. Unas parecen barriles o donas, otras bastones retorcidos y otras son más bien aplanadas. Las hay parecidas a una suerte de dardo —como la famosa espícula del virus SARS-CoV-2—, las hay simétricas y las hay enmarañadas, pequeñas o pesadas.

Las proteínas están formadas por cadenas cuyos eslabones son moléculas llamadas aminoácidos. Existen 20 aminoácidos, de modo que la cantidad de combinaciones posibles es inmensa —lo



mismo ocurre con las 27 letras del alfabeto, con las cuales puede crearse un abanico muy diverso de palabras (azahar, tintico, serendipia, febril, perenne, vals, esternocleidomastoideo)—. La forma de cada proteína está determinada por el orden específico de los aminoácidos, y esa cadena a su vez está codificada en el genoma de cada organismo. La secuencia de aminoácidos puede escribirse de forma lineal, pero para que la proteína funcione debe adoptar una forma tridimensional concreta; para esto la cadena se pliega de maneras muy complejas, que durante años fueron extremadamente difíciles de predecir a partir de la simple secuencia.

Una proteína promedio tiene entre 300 y 400 aminoácidos (aunque las hay mucho más grandes). Para entender cómo se va retorciendo y acomodando tridimensionalmente es necesario predecir cómo interactúan todos esos eslabones entre sí y con el medio acuoso que los rodea dentro de la célula. Por ejemplo, si entre los componentes de un aminoácido hay uno al que no le guste el agua, esa estructura se doblará hacia dentro de la proteína. También es necesario saber qué tipo de interacciones habrá entre los componentes de uno y otro y predecir si la interacción será débil o fuerte. Aunque hay mucha información que facilita ese trabajo, con tantos eslabones la labor sigue siendo muy compleja.

La tarea de descubrir los principios generales que rigen cómo se pliega una secuencia de aminoácidos determinada se conoce como el problema del plegamiento de proteínas, y desde hace décadas se sabe que es imposible resolverlo sin ayuda de computadoras.

El biólogo germano-rumano Andrei Lupas, uno de los científicos que trabajan en este problema, lamentó varias veces que no viviría para ver su solución. Pero en una entrevista en noviembre de 2020 ya no parecía tan pesimista. Se acababa de anunciar que un programa desarrollado por la compañía británica de inteligencia artificial DeepMind de Google había arrasado en un desafío bienal en el que compiten diversos grupos de investigación para predecir la estructura tridimensional de proteínas a partir de su secuencia de aminoácidos. El programa se llama AlphaFold 2. Lupas fue juez de los modelos presentados ese año en la competencia, y aunque es cauto y no afirma que el problema se ha resuelto por completo, reconoció que este logro "lo cambiará todo".

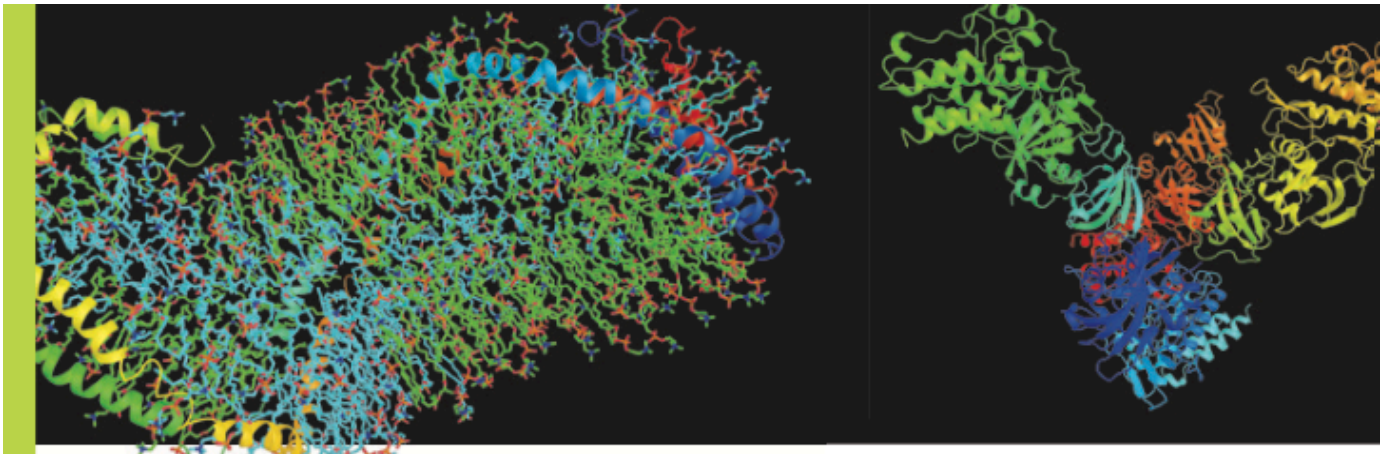
Predecir o posdecir

El concurso que ganó AlphaFold 2 en 2020 fue la edición número 24 del experimento CASP (siglas en inglés de "Evaluación Crítica de la Predicción de Estructuras de Proteínas").

Ya desde la década de 1990 había grupos de investigación que decían tener las herramientas y los modelos para predecir la estructura tridimensional de una proteína a partir de su secuencia de aminoácidos. Pero lo que hacían estos investigadores era comparar sus predicciones con estructuras que ya se conocían experimentalmente. En lugar de predicciones, Lupas las describe como "postdicciones".

En 1994 un grupo de científicos dirigido por el biólogo computacional John Moult, de la Universidad de Maryland, organizó el experimento CASP para poner a prueba estos modelos de manera más objetiva. Los aspirantes se enfrentaban al reto de descifrar proteínas cuyas estructuras ya estaban determinadas experimentalmente, pero que aún no habían sido publicadas. Es decir, los participantes debían trabajar a ciegas.

En aquel primer CASP quedó claro que los modelos no funcionaban: ninguno alcanzó una precisión aceptable. Lupas añade que casi ninguno de los grupos que participaron en esa ocasión regresó

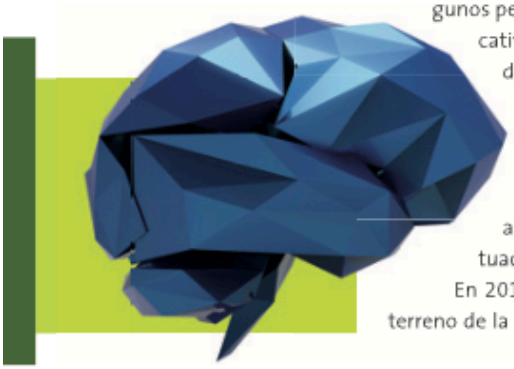


a futuros CASP. Tampoco hubo mucho éxito en el segundo encuentro, en 1996. En marzo del siguiente año, el periódico *The New York Times* lo resumió todo en este encabezado: "Diseñar vida: Proteínas 1, computadora 0". El problema excedía las capacidades de las computadoras más potentes.

A partir de 1998, sin embargo, empezaron a notarse algunos avances. Se desarrolló una nueva manera de enfrentar el problema: buscarles a las proteínas de estructura desconocida "parientes" con una estructura conocida. A partir de la secuencia de aminoácidos de la proteína a descifrar se pueden identificar proteínas con secuencias parecidas. Y si se conoce la estructura tridimensional de éstas, puede usarse como modelo para inferir la que aún se desconoce. Esta técnica fue útil especialmente para predecir la estructura de proteínas de dificultad intermedia. Por ejemplo, en ese entonces Lupas estudiaba unas proteínas que ayudan a bacterias patógenas a adherirse a las células de los animales que infectan. Comparando las secuencias de una de estas familias de "adhesinas" con otras parecidas, el equipo pudo predecir su estructura, con ciertas limitaciones.

Con todo, el problema del plegamiento parecía aún estar lejos de resolverse.

Cambia el tablero con IA



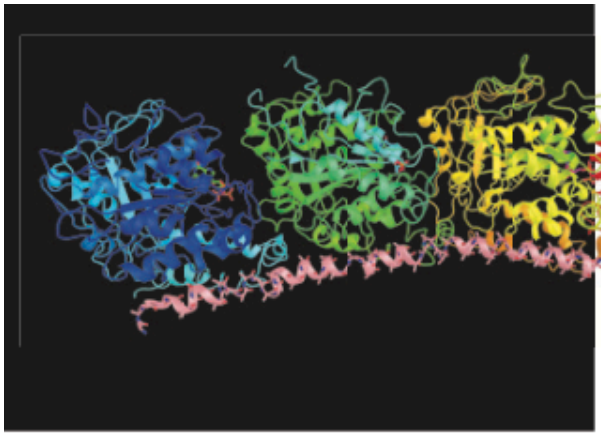
En los experimentos CASP que siguieron hubo algunos pequeños saltos, pero ninguno significativo, especialmente en las estructuras difíciles. Las calificaciones que se le otorgan a los modelos revelan un estancamiento todavía hasta 2016: en una escala de 100 puntos de precisión de la predicción, hasta ese año ningún equipo obtuvo una puntuación arriba de 40.

En 2018, sin embargo, algo cambió. En el terreno de la predicción de moléculas difíciles las calificaciones subieron de 40 a más de 60. Muchos de los modelos computacionales recientes inauguraban una nueva estrategia para estudiar este problema: echar mano de redes neuronales artificiales, sistemas de cómputo inspirados en el cerebro humano y su cableado neuronal, muy útiles para identificar patrones en grandes cantidades de datos. AlphaFold, que ese año debutó con su primera versión en CASP, fue el más exitoso.

Dos años después, en 2020, la segunda versión de AlphaFold arrasó en la competencia: la puntuación media de este algoritmo para la predicción de proteínas difíciles fue de 87 puntos. En unos pocos años la inteligencia artificial parecía haber cambiado el tablero en ese juego de adivinanzas.

AlphaFold utiliza un método llamado *aprendizaje automático profundo*. Para que estas redes neuronales artificiales aprendan se las expone a muchas estructuras de proteínas ya conocidas que corresponden a secuencias de aminoácidos específicas. Una vez entrenado, el sistema es el que debe predecir la forma de secuencias novedosas.

El concepto de aprendizaje automático (o de máquina) se planteó de manera formal en la década de 1950. Sin embargo, como explica el bioquímico mexicano Gabriel del Río Guerra, del Instituto de Fisiología Celular de la UNAM, por entonces no existían ni algoritmos ni computadoras suficientemente potentes para poner en práctica el concepto. Del Río Guerra cuenta que conforme aumentaron la capacidad y la velocidad de procesamiento de las computadoras fue posible entrenar redes neuronales artificiales para hacer montones de cosas, como reconocer imágenes de casas, flores, personas o trenes (etiquetadas previamente por un humano). Para este entrenamiento se expone a las redes a miles y miles de ejemplos, de modo que puedan encontrar patrones que se correlacionen con las etiquetas. Cuando se hizo lo mismo con la predicción de proteínas, vino el "boom".



El éxito del aprendizaje de máquina para el reconocimiento de imágenes y otras tareas sugería que era una herramienta adecuada para acometer el problema de la predicción de la estructura proteínica, dice Del Río Guerra. "El ser humano puede hacer predicciones sin entender lo que hace", continúa. Por ejemplo, los humanos usamos el fuego desde mucho antes de saber nada de termodinámica. Mediante prueba y error pudimos anticipar lo que pasaba cuando se expone un objeto o a una persona al fuego: qué cosas se calientan y cuáles se echan a perder. Y todo esto sin entender el fenómeno en sí. "Eso es exactamente de lo que se trata el aprendizaje de máquina: me das muchos ejemplos y a partir de ellos yo hago una predicción."

Esto es lo que hizo AlphaFold 2: examinó las aproximadamente 170 000 proteínas cuya estructura ya ha sido determinada por métodos experimentales y aprendió de ellas. "Esto es tremendo", declaró Moult al enterarse de los resultados que obtuvo el algoritmo en 2020. "En cierto sentido, el problema está resuelto", dijo.

¿Será?

En un artículo publicado en 2021 Lupas y colegas afirman que el problema se resolvió quizá sólo en su forma básica; es decir, en lo que atañe a la capacidad de deducir la estructura de una proteína a partir de su secuencia de aminoácidos. Pero el problema es más complejo: la secuencia de una proteína contiene también información sobre la que aún no es posible hacer predicciones precisas; por ejemplo, qué moléculas es capaz de reconocer la proteína, a cuáles se adhiere o cómo responde a condiciones cambiantes en el medio. Los autores concluyen que AlphaFold 2 es sólo el primer paso en el camino hacia la solución del problema del plegamiento de proteínas.

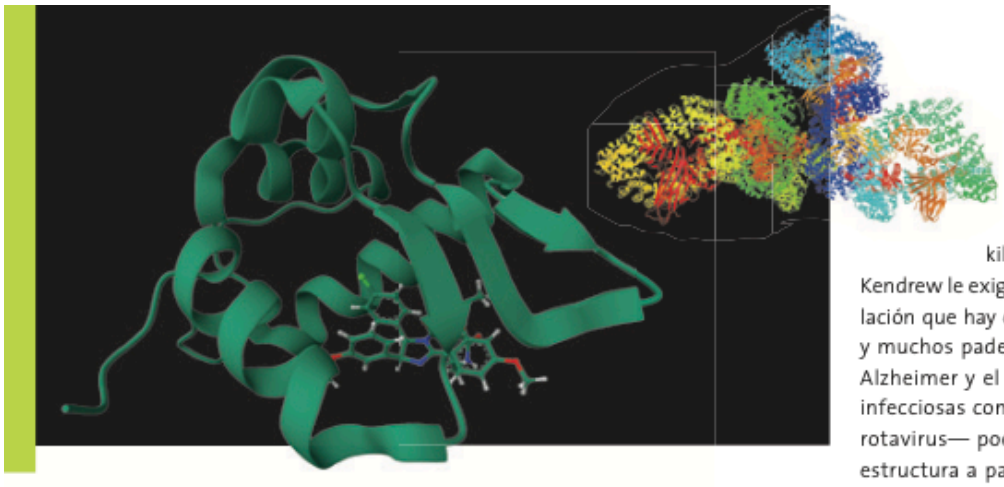
Del Río Guerra coincide en que aún hay muchas preguntas pendientes. Predecir la función de la proteína, por ejemplo, sigue siendo un enorme reto, y este problema ha engendrado un concurso equivalente al CASP, en el que se ponen a prueba métodos computacionales que predicen la función de las proteínas a partir de su secuencia o estructura. Aunque también aquí se han utilizado métodos de aprendizaje de máquina, los puntajes obtenidos no han sido tan altos como en el CASP, explica.

Nina Pastor Colón, investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, cuenta que existen otras limitaciones de estos algoritmos de inteligencia artificial. Pastor Colón estudia unas moléculas llamadas proteínas intrínsecamente desordenadas o desestructuradas, que no cumplen con el precepto clásico "una secuencia-una estructura", sino que adoptan diferentes formas dependiendo de las moléculas que las rodean. Por ejemplo, la proteína p53, asociada a la protección contra el cáncer, tiene secciones intrínsecamente desordenadas que usa para unirse a varias proteínas más, y con cada una adopta una configuración distinta. Es "un camaleón molecular", en palabras de Pastor Colón. Estas secuencias no son raras (hay estimaciones que sugieren que 30 % de las proteínas humanas son intrínsecamente desordenadas), pero su naturaleza las hace difíciles de estudiar a nivel experimental, por lo que los algoritmos de aprendizaje automático no han sido entrenados con estos ejemplos y están muy limi-

1. Mediante los últimos métodos en machine learning hemos resuelto el inveterado problema biológico del plegamiento de proteínas.
2. Puesto que somos una exitosa subsidiaria de Google, tenemos más acceso a financiamiento y poder computacional del que podemos usar.
3. Así, tras varias semanas de cálculos, les presento el archivo pdb para la proteína que dice "Apple apesta".
4. ¿También planean hacer descubrimientos farmacéuticos?

   Sí, después de la proteína de Facebook.

smbc-comics.com.
Cortesía de Zach Weinersmith



tados en el tipo de predicciones que hacen para ellas. Pastor Colón considera que herramientas como AlphaFold pueden ser rápidas, pero no son infalibles.

Sin embargo, como sugiere Lupas, es probable que estos métodos sean sólo el principio de la solución al problema del plegamiento. En diciembre de 2022 se llevó a cabo el más reciente CASP. DeepMind y su AlphaFold no participaron esta vez, pero entre los grupos ganadores de ese año la mayoría incorporó el algoritmo de AlphaFold —que es público— y se lograron algunos pequeños avances en los retos pendientes. El año pasado también entró en escena la compañía Meta (antes Facebook), el gigante de las redes sociales, que usando un algoritmo también basado en aprendizaje automático logró predecir la forma de más de 600 millones de proteínas a partir de secuencias derivadas de ADN de muestras de suelo y agua de mar, así como de intestino y piel humanos. Lo hizo en apenas dos semanas, más rápido que AlphaFold 2.

El interés por resolver el plegamiento de proteínas no nace sólo de la simple curiosidad. Se discute el alcance que tendrá predecir una estructura sin necesidad de invertir todo el tiempo y el dinero que implica la experimentación, y ahorrándose, por ejemplo, los años y los kilos de carne de cachalote que a Kendrew le exigió su misión. Dada la estrecha relación que hay entre las formas de una proteína y muchos padecimientos —desde el cáncer, el Alzheimer y el Parkinson hasta enfermedades infecciosas como el Chagas o las causadas por rotavirus— poder determinar en minutos una estructura a partir únicamente de la secuencia de aminoácidos podría ayudar a entender estos padecimientos o acelerar el diseño y desarrollo de fármacos para combatirlos.

Ya hay grupos de investigación que usan AlphaFold para desarrollar vacunas más efectivas contra la malaria. Otros más emplean el programa para estudiar proteínas que participan en la resistencia a antibióticos desarrollada por muchas bacterias —un grave problema de salud pública—. Algunos investigadores también están empleando esta tecnología de predicción para diseñar proteínas que aceleren el reciclaje de plásticos de un solo uso.

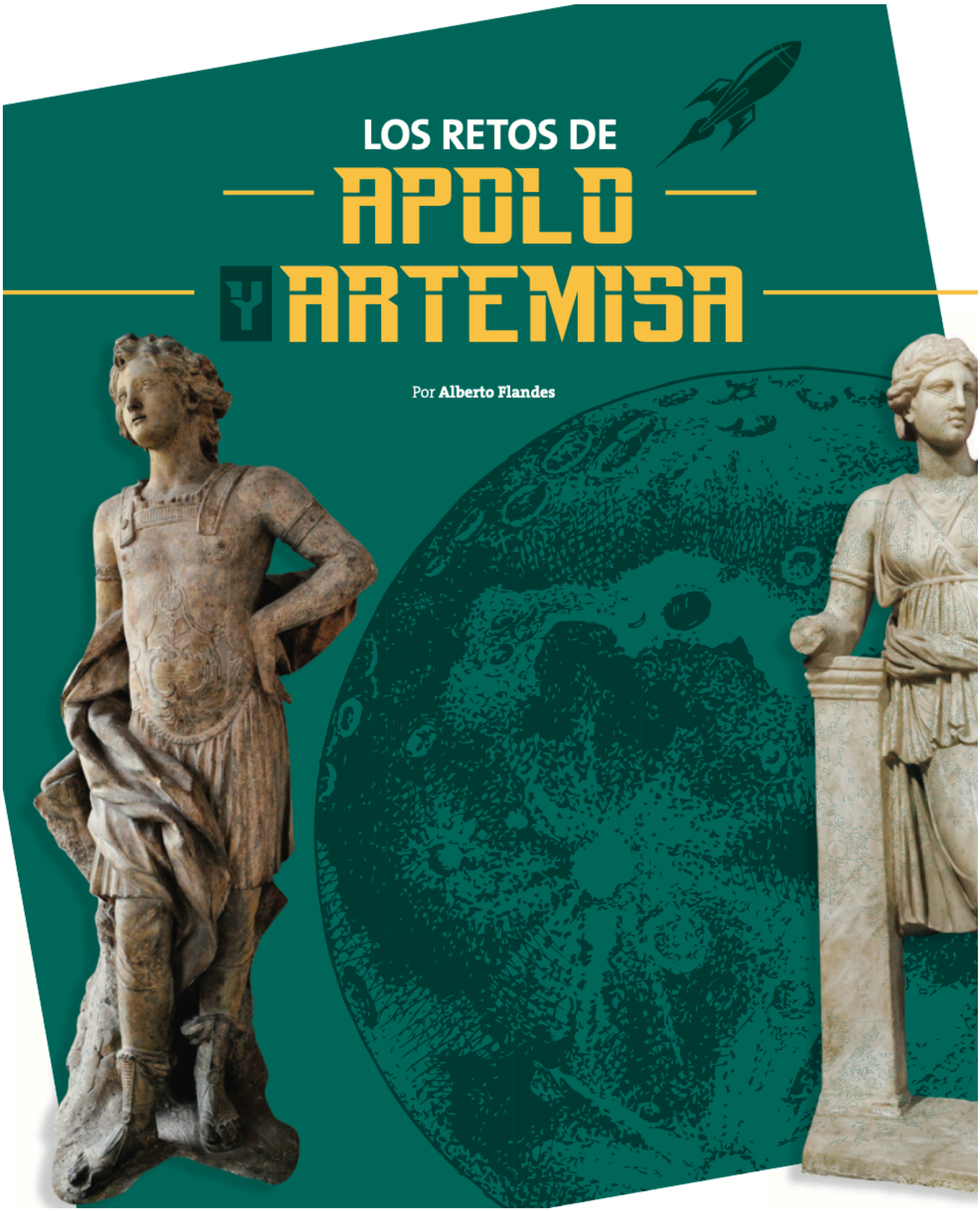
Sin embargo, también debe quedar claro que predecir la estructura y entender el plegamiento son dos cosas muy diferentes, dice Pastor Colón. "El problema [...] de la inteligencia artificial es que es una bonita caja negra", explica. Puede ofrecer buenos resultados, pero no sabemos por qué: no conocemos las variables que usa el algoritmo para hacer sus predicciones. "Por lo tanto, uno renuncia a entender cómo le hace para plegarse y se queda con el resultado final del proceso, nada más."

Esta búsqueda, que requiere mucho más que inteligencia artificial, es algo que motiva a Pastor Colón a seguir estudiando la dinámica molecular de las proteínas. Como concluye la investigadora: no debemos renunciar "al fino arte de pensar".

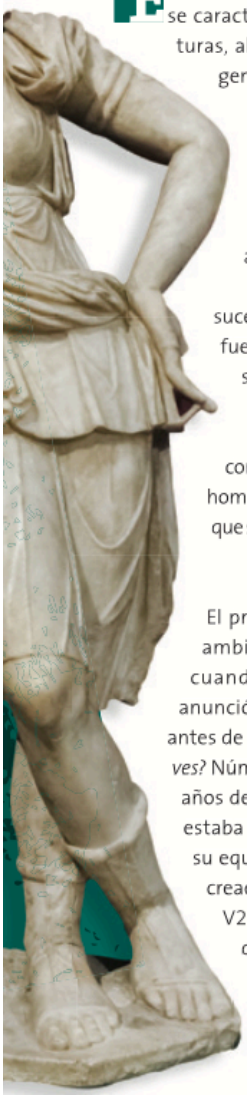
- "Funciones de las proteínas", Portal Académico CCH, UNAM, en: https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/biologia1/unidad1/biomoleculas/funcionesproteinas.
- "Proteínas", Coordinación de Universidad Abierta, Innovación Educativa y Educación a Distancia, UNAM, en: http://uapas2.bunam.unam.mx/ciencias/proteinas/

Alejandra Manjarrez estudió biología en la UNAM y es doctora en ciencias por la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Es escritora de ciencia y su trabajo ha sido publicado en *The Scientist*, *The Atlantic*, *Muy Interesante* y *Revista de la Universidad de México*, entre otros medios.

LECTURA 17. LOS RETOS DE APOLO Y ARTEMISA



La humanidad está a punto de emprender el regreso a la superficie de la Luna con un nuevo programa espacial, heredero del que nos llevó allá hace más de 50 años.



En los antiguos mitos griegos Apolo, dios del Sol, se caracterizaba por una vida llena de aventuras, algunas de ellas junto a su hermana gemela, Artemisa. Se dice que Artemisa nació primero y que Apolo no habría nacido si ella no hubiera ayudado a su madre durante el parto; de ahí que además de diosa de la caza era reconocida como la diosa que asistía a las mujeres en los alumbramientos.

En la historia de los viajes espaciales sucedió lo contrario: el programa Apolo fue primero, y más de 50 años después se creó el programa Artemisa. Las misiones Apolo surgieron para llevar a la humanidad a la Luna, una aventura complicada. Artemisa nace para llevar a hombres y mujeres a la Luna y más allá, lo que será una aventura aún más complicada.

Desafíos lunares

El programa Apolo nació en 1962, en el ambiente turbulento de la Guerra Fría, cuando el presidente John F. Kennedy anunció que Estados Unidos iría a la Luna antes de que acabara la década (véase *¿Cómo ves?* Núm. 248). Detrás de este discurso había años de investigación y desarrollo. Kennedy estaba asesorado por Wernher von Braun y su equipo, que en la Alemania nazi habían creado el primer misil balístico: el cohete V2. Se dice incluso que Von Braun fue quien realmente convenció a Kennedy de que era posible ir a la Luna.

En contraste, el programa Artemisa nace después de numerosos viajes tripulados orbitales, muchas misiones de exploración espacial exitosas de diversos países y en un ambiente en el que las compañías privadas están tomando el control del espacio cercano con tecnologías innovadoras.

El reto de las misiones Apolo era construir un cohete más potente que el V2 que impulsara dos naves: un orbitador y un módulo de aterrizaje para llevar a tres astronautas a más de 400 000 kilómetros de distancia. También había que desarrollar trajes que protegieran a los tripulantes de las duras condiciones del espacio, así como un sistema confiable que les diera autonomía a las naves, ya que, si bien podrían mantener comunicación con la Tierra, no habría forma de rescatarlos en caso de falla.

El reto de las misiones Artemisa será construir una infraestructura orbital alrededor de la Tierra y la Luna, y establecer bases lunares con miras a colonizar el espacio cercano a la Tierra e impulsar la exploración tripulada a Marte y a otros planetas.

Cuestión de propulsión

Para que las naves de las misiones Apolo pudieran escapar de la gravedad de la Tierra y llegaran a la Luna se diseñó el enorme cohete Saturno V, que tenía tres secciones y cinco motores, y usaba como combustible una mezcla de hidrógeno y oxígeno líquidos. A diferencia del V2, a medida que el Saturno V se elevaba hacia el espacio y consumía su combustible se iba despojando de sus secciones; así se aligeraba y multiplicaba el impulso de sus motores. Los Saturno V hicieron posible el primer alunizaje en 1969 y en total llevaron a la Luna a 24 hombres, 12 de los cuales caminaron sobre su superficie. Hasta hoy ninguna mujer ha visitado nuestro satélite.

Naves *Apolo* (izq.) y *Artemisa* (der.). NASA.

La nave tripulada *Orión* de las misiones Artemisa será impulsada por cohetes de combustible líquido SLS (siglas en inglés de "sistema de lanzamiento espacial"), similares al Saturno V. Aunque con algunas mejoras en su potencia y su electrónica, estos cohetes son tecnología reciclada de los transbordadores espaciales que entre 1981 y 2011 fueron la siguiente generación de naves tripuladas —después de las misiones Apolo— para llevar astronautas, satélites para muchos propósitos, el Telescopio Espacial Hubble y equipo diverso a órbitas de entre 400 y 36 000 km alrededor de la Tierra, y naves de exploración que han visitado planetas y otros cuerpos del sistema solar.

Los cohetes SLS son auxiliados por dos cohetes adicionales de combustible sólido (llamados SRB) a base de polvo de aluminio. En el caso de los transbordadores, después de los lanzamientos los SRB desplegaban paracaídas al desacoplarse para luego caer en el mar, donde se recogían para reutilizarlos. En las misiones Artemisa no será posible recuperar ni los SLS ni los SRB; como se desacoplarán a una altura mucho mayor, su reingreso a la atmósfera los destruirá.

Sin embargo, las misiones Artemisa también usarán otros cohetes de carga superpesada del tipo de los SLS y el Saturno V: son los cohetes reutilizables Starship y Falcon Heavy de la compañía SpaceX, que impulsarán otras naves o servirán como tanques orbitales de reabastecimiento de combustible, pero también podrían sustituir a los SLS en caso de falla.

Poder de cómputo

En 1958 Jack Kilby, futuro Premio Nobel de Física (en el año 2000), inventó los circuitos integrados o chips. Esto permitió a los científicos del programa Apolo construir computadoras digitales lo suficientemente compactas como para integrarlas al cohete, a las pequeñas naves Apolo y a sus módulos de aterrizaje, dándoles autonomía y haciéndolos más eficientes y confiables. Este es, posiblemente, el ejemplo más claro del impacto en la sociedad de la investigación científica y el desarrollo tecnológico.

Esas primeras computadoras compactas tenían apenas unos 100 kilobytes de capacidad, pero en las etapas críticas después de los despegues del Saturno V eso bastaba para calcular la posición exacta del aparato 25 veces por segundo y hacer las correcciones necesarias de la trayectoria a fin de reducir las posibles fallas. Al final estas computadoras ayudaron también a dirigir las naves a la Luna y a que los módulos de aterrizaje se posaran sin contratiempos en su superficie.

En las misiones Artemisa, las nuevas computadoras, mucho más potentes y compactas, van a permitir una electrónica más eficiente para el control de los cohetes y las naves. Cohetes como los de SpaceX cuentan con una multitud de sensores que vigilan el funcionamiento de cada parte del aparato y pueden identificar fallas al momento. La nueva tecnología electrónica y computacional permite también que las consolas de las naves sean más simples y que las pantallas táctiles sustituyan en buena medida los numerosos botones y palancas de las consolas antiguas, haciendo también las cabinas y naves más espaciosas y cómodas.

Trajes EVA. Izquierda: Apolo. Derecha: Artemisa (ilustración). NASA.

Los problemas inmediatos

El programa Apolo tuvo que desarrollar trajes especiales para proteger a los astronautas de las condiciones extremas del espacio: ausencia de aire y por tanto de presión, temperaturas extremas y altas dosis de radiación y partículas energéticas. Había otros problemas que el traje no resolvería, como los efectos de la aceleración durante el despegue para alcanzar la velocidad de escape en pocos minutos y la microgravedad (o ausencia de gravedad).

La aceleración en los despegues no ha sido problema hasta ahora, pues procura mantenérsela en alrededor del triple de la aceleración de la gravedad (3g). No así la microgravedad; hoy se sabe que si los astronautas pasan mucho tiempo en condiciones de ingravidez pueden sufrir descalcificación de los huesos y atrofia muscular. Es por eso que están obligados a seguir un régimen estricto de ejercicios durante la misión mientras no se implementen sistemas que generen gravedad artificial en las naves.

Los efectos de la radiación del espacio, es decir, ondas electromagnéticas, así como iones y electrones de alta energía que vienen del Sol y de fuera del Sistema Solar, se pueden mitigar relativamente con los trajes y las propias naves, pero siguen siendo un problema que será determinante en estancias prolongadas en las superficies de la Luna y Marte; la razón es que ambos cuerpos carecen de la atmósfera densa y el campo magnético que nos protegen de esta radiación en la Tierra.

La solución al traje espacial

El traje espacial de las misiones Apolo se elaboró a partir de la fusión de ideas de los especialistas en textiles de la empresa ILC Dover —conocida ahora como Playtex— y de los ingenieros de la empresa Hamilton Standard, que desarrollaba componentes y sistemas aeroespaciales. El resultado fue un traje presurizado que tenía tres capas y una mochila en la que se reciclaba el aire que exhalaban los astronautas y que albergaba parte del sistema de refrigeración de los trajes. En su elaboración se usaron tecnologías y materiales ya existentes, pero también nuevos. Por ejemplo, para los guantes se usó la tela Chromel R, de cromo y níquel, que en su momento tenía un costo de 2 000 dólares por metro (unos 16 000 dólares actuales). Para hacer los trajes no inflamables luego del accidente del *Apolo 1*, en el que murieron calcinados tres astronautas tras una explosión en la cápsula durante la prueba de lanzamiento, se utilizó la llamada tela Beta, compuesta de fibra de vidrio y recubierta de teflón. El teflón, un polímero resistente a muchos solventes y sustancias químicas descubierto por el físico Roy Plunkett, de la compañía DuPont, era entonces un material nuevo.

Estos trajes también se conocen como trajes EVA (siglas en inglés de "actividades extravehiculares"). Los trajes espaciales actuales de este tipo no son radicalmente distintos a los de las misiones Apolo, pero hay otros más ligeros que han sufrido nuevos cambios y que se usan dentro de las naves en situaciones de emergencia, como una pérdida de presión. Entre ellos están los trajes Sokol (en español, "halcón"), diseñados en Rusia para los astronautas de las naves Soyuz. Una versión más moderna de estos trajes es la que introdujo SpaceX para los astronautas que viajan en su cápsula Dragon, aún más ligeros y estilizados. No obstante, la NASA lanzó una licitación para compañías interesadas en participar en el diseño de los trajes EVA que los astronautas usarán en la superficie de la Luna y Marte

Orion aproximándose a la estación Gateway. Ilustración NASA.

Lanzamiento aplazado

El primer lanzamiento de la misión Artemisa estaba programado para fines de 2021, pero se pospuso al 29 de agosto de 2022. Ese día se detectó una falla en el sensor de temperatura del tercer motor y el lanzamiento se canceló. El 3 de septiembre, fecha del segundo intento, una fuga de hidrógeno obligó a una nueva cancelación. El 27 de septiembre, cuando se estaba considerando un nuevo intento, el huracán Ian amenazaba con azotar las costas de Florida, donde se encuentra el Centro Espacial Kennedy, sede de los lanzamientos. En esa ocasión el cohete fue trasladado de la plataforma de lanzamiento a la seguridad del hangar de ensamblaje para protegerlo del huracán. Al cierre de esta edición (12 de octubre), el lanzamiento estaba programado para el 11 de noviembre.

–*S.R.*

en los próximos años —o en la siguiente década—, que por el momento siguen en desarrollo.

El agua

El hidrógeno y el oxígeno eran el combustible de los cohetes del programa Apolo; sus naves los usaban en celdas para generar electricidad. La combinación de ambos producía además el agua que se requería en cada nave. El dióxido de carbono (CO_2) que generaban los astronautas en la nave y en sus trajes espaciales se eliminaba usando filtros de un compuesto en polvo llamado hidróxido de litio, que al combinarse con el CO_2 forma un mineral llamado carbonato de litio y también agua. Cada una de las misiones Apolo producía entre 200 y 250 litros de agua, por lo que el suministro de este líquido no era una preocupación. Las misiones Artemisa emplearán estas tecnologías, pero además buscarán aprovechar el agua de la Luna para consumo de los astronautas y como combustible.

Sabemos que hay agua en la Luna gracias a las muchas misiones que se han dedicado a estudiar su superficie. En particular la misión india Chandrayaan-2, que en 2021, usando su radar, pudo identificar hielo de agua mezclado con las capas de polvo, o regolito, de la superficie lunar, especialmente en regiones aisladas de la luz del Sol en ambos polos lunares y en otras zonas.

El Polo Sur de la Luna será el primer objetivo de la misión Artemisa. Del agua que pueda encontrar, el hidrógeno y el oxígeno se van a separar usando corrientes eléctricas en un proceso llamado electrólisis que es, en cierta forma, inverso al proceso de combustión de hidrógeno con oxígeno en los cohetes.

Militares *vs.* científicos

Los astronautas de las misiones Apolo eran militares de carrera, varios de ellos pilotos y otros con títulos de ingeniería eléctrica o aeronáutica. Fue hasta la última misión (Apolo 17 en diciembre de 1972) cuando se decidió incluir a un científico no militar en la tripulación: el geólogo y profesor universitario Harrison Schmitt. Es claro que los astronautas militares de la fuerza aérea eran necesarios, porque las misiones requerían el conocimiento operacional y técnico de aeronaves, implicaban un alto riesgo y, por lo mismo, exigían personas con muy buena condición física y mental y muy disciplinadas. Sin embargo, una vez que se logró el objetivo de llegar a la Luna, las misiones pasaron a una etapa de exploración que demandaba el apoyo de científicos. En este sentido, era casi natural incluir a una persona capacitada para reconocer el terreno y recoger las muestras más útiles. Claro que estando en la Luna por primera vez

Astronautas en el Polo Sur de la Luna. Ilustración NASA.

cualquier roca era importante, pero en viajes subsecuentes había más opciones y unas rocas podían ser más interesantes que otras o dar más información. Para reconocerlas hacía falta un especialista.

En contraste, en el grupo de astronautas entre los que se seleccionará la primera tripulación para el alunizaje de *Artemisa III* hay mujeres y hombres, militares y especialistas en ingeniería, pero también en geología, física, medicina y biología. Algunos serán astronautas por primera vez y habrá también veteranos y veteranas, como la astronauta Christina Koch, que podría ser la primera mujer que pise la Luna. Koch tiene dos títulos (física e ingeniería eléctrica) y su récord personal es de 328 días en la Estación Espacial Internacional, durante los cuales realizó seis caminatas espaciales.

Cuenta regresiva

Cada lanzamiento de la misión Artemisa tendrá un costo de por lo menos 4 000 millones de dólares, y el costo total de las etapas programadas muy probablemente superará el producto interno bruto de la mayoría de los países del mundo.

Artemisa I es un vuelo de prueba no tripulado que rodeará la Luna y soltará un módulo que caerá en la superficie lunar antes de volver a la Tierra. *Artemisa II* será el equivalente al *Apolo 8* de 1968: un vuelo tripulado de prueba programado para 2024, previo al alunizaje de *Artemisa III*.

Las naves principales de Artemisa son *Orion*, de la empresa Boeing, y *Dragon XL*, de SpaceX, que serán el enlace entre la Tierra y la Luna. Además, se pondrá en órbita lunar la nave *Gateway* de SpaceX, que funcionará como una miniestación espacial. La nave *Starship HLS*, también de SpaceX, será el equivalente al módulo de aterrizaje *Eagle* que llevó a Neil Armstrong y Buzz Aldrin a la superficie de la Luna en el *Apolo 11*.

En contraste con el programa Apolo, el programa Artemisa es el resultado de una colaboración internacional, por el momento entre la NASA y las agencias espaciales europea, japonesa y canadiense. Igual que las Apolo, las misiones Artemisa serán cruciales para el futuro de la humanidad en el espacio y aportarán mucho al desarrollo de tecnologías que usaremos en la Tierra.

Este artículo fue posible gracias al apoyo de PAPIIT IN104721.

- "Artemis I: Vamos a la Luna", *Universo curioso de la NASA*, National Aeronautics and Space Administration, en: www.nasa.gov/mediacast/artemis-i-vamos-a-la-luna
- Domínguez Álvarez Icaza, Elisa, "Misión Artemis: nuevos pasos hacia la Luna", *Ciencia UNAM*, UNAM, México, en: https://ciencia.unam.mx/contenido/galeria/205/mision-artemis-nuevos-pasos-hacia-la-luna
- García Llama, Eduardo, *Apolo 11: la apasionante historia de cómo el hombre pisó la Luna por primera vez*, Crítica, Madrid, 2019.

Alberto Flandes, frecuente colaborador de *¿Cómo ves?*, es investigador del Instituto de Geofísica de la UNAM. Se dedica a estudiar la física de los planetas y del medio interplanetario.

LECTURA 18. TERROR a medianoche ¿o a mediodía?

Nuestra susceptibilidad al miedo no es la misma a todas horas. ¿Por qué? Este fenómeno podría estar relacionado con un aspecto central de la evolución de nuestra especie.

El 31 de octubre tiene lugar en Estados Unidos y otros países la celebración de Halloween. Su origen se remonta a un festival de los pueblos celtas de hace 2 000 años, el Samhain; se creía que entonces los dioses se presentaban para atemorizar a la gente con sus engaños y bromas siniestras. Siglos después, el cristianismo convirtió el antiguo festival en la Víspera del Día de Todos los Santos, *All Hallows' Eve*; este término derivó en Halloween. Los inmigrantes irlandeses llevaron la celebración a Estados Unidos en 1840. En México muchas personas la han adoptado y adornan sus casas con representaciones de esqueletos, murciélagos, arañas, ataúdes, brujas y otros objetos que evocan la sensación de miedo o terror. Y aunque en general no nos gusta sentir miedo, vemos gustosos las películas de terror que se presentan en esas fechas; entre más nos asusten, mejores nos parecen.

Peligro, peligro...

El miedo es una respuesta fisiológica y emocional a lo que percibimos como una amenaza. También podemos sentirlo ante la posibilidad de que ocurra algo contrario a nuestros deseos. El terror es simplemente una sensación de miedo muy intensa. Ver una película puede hacernos sentir miedo a pesar de saber que todo es falso, incluso imposible y hasta ridículo (¿un muñeco que cobra vida y se dedica a asesinar a todo el elenco?). No hay peligro para nosotros, tranquilamente sentados en el cine o en casa. Pero nos ponemos en los zapatos de los personajes y nos imaginamos que nos ocurre lo mismo que a ellos, lo que basta para compartir su miedo.

Ciertas escenas típicas de las películas de terror están tan arraigadas en la cultura que hallarnos en situaciones similares —un bosque oscuro con neblina, un pasillo donde de pronto parpadean las luces o una puerta que se cierra súbitamente— nos pone los pelos de punta. Esto incluso puede tener consecuencias sobre nuestras acciones cotidianas, llevándonos por ejemplo a dudar si ir hasta la cocina por un vaso de agua a medianoche es una buena idea a pesar de sentir sed.

Tras experimentar un episodio digno de película de terror podemos pensar fría y racionalmente sobre estas situaciones y concluir sin mucha difi-

cultad que el miedo solo está en la mente. Pero esto no es del todo cierto, como veremos.

Parece que viste un fantasma

El miedo desencadena reacciones en el organismo que se pueden considerar signos clínicos: dilatación de las pupilas, sudoración excesiva y piloerección (que se te pongan literalmente los pelos de punta), así como aumento de las frecuencias cardiaca y respiratoria. Muchos de estos signos se usan en las pruebas poligráficas (conocidas comúnmente como detectores de mentiras), las cuales se basan en la idea de que presentarle evidencia de un crimen a una persona culpable causará cambios súbitos en ella por el miedo a ser descubierta.

Hay grandes diferencias individuales que invalidan las pruebas poligráficas para determinar si alguien está mintiendo. Por ejemplo, para algunas personas el simple hecho de ser interrogado basta para producir una respuesta de miedo. Otras en cambio tienen más sangre fría —menos emotividad—, lo que les permite regular su respuesta fisiológica, haciendo que sus mentiras pasen inadvertidas.

En numerosas obras literarias se hace referencia a los signos clínicos del miedo. En *El conde de Montecristo*, de Alejandro Dumas, el autor describe la reacción del protagonista, Edmundo Dantés, al poner en práctica su plan para escapar del castillo de If. El plan consistía en fingirse muerto, tras lo cual lo arrojarían al mar en un saco cerrado y tendría que liberarse y nadar ocho kilómetros hasta la costa. Dumas describe los signos del miedo de la siguiente manera: "Con una mano apoyada en el pecho trataba de ahogar los latidos de su corazón mientras enjugaba con la otra el sudor de su frente, que corría por sus mejillas. De vez en cuando todo su cuerpo se estremecía con un temblor convulsivo, oprimiéndosele el corazón como si estuviese sometido a la presión de un torno". Narrativas como esta comunican de manera efectiva un estado de terror porque es más fácil que el lector empatice con la reacción fisiológica extrema del personaje que si el autor simplemente dijera que Edmundo "tenía mucho miedo".

Las películas de terror también explotan este tipo de elementos descriptivos para comunicar la sensación de miedo del personaje incorporando sonidos asociados con las respuestas fisiológicas, como un corazón latiendo rápidamente o la respiración alterada de las víctimas. Este recurso lo usó por primera vez Edgar Allan Poe en su relato "El corazón delator", en el que un asesino cree escuchar los latidos del corazón del cadáver que escondió bajo la duela y enloquece de pensar que todos pueden oírlo y que el ruido lo delatará.

Variedad de reacciones

Resulta fácil suponer que la mente puede controlar estas respuestas fisiológicas al miedo. Sin

embargo, es casi imposible separar las sensaciones psicológicas asociadas al miedo de las reacciones corporales que desencadena. Por ejemplo, ingerir alimentos con un contenido alto de estimulantes como cafeína o azúcar puede ser suficiente para hacernos sentir ansiosos, lo que puede volvernos más susceptibles a asustarnos con un ruido fuerte (para controlar la ansiedad puedes regular tu respiración de manera que disminuya tu frecuencia cardiaca. Una técnica consiste en inhalar por cuatro segundos, sostener la respiración brevemente y exhalar lo más lento posible.)

Como ves, para experimentar plenamente el miedo es necesaria una constante comunicación entre el cerebro y el resto del organismo, lo que descarta la concepción clásica de que son cosas separadas.

En situaciones de peligro, el sistema nervioso simpático (SNS) coordina una amplia variedad de reacciones destinadas a mejorar nuestras probabilidades de supervivencia; por ejemplo, ante una amenaza podemos defendernos (pelear) o poner tierra de por medio (huir). El SNS es parte del sistema nervioso autónomo, que no puedes controlar de manera consciente. Las respuestas mediadas por el SNS son automáticas, lo que te permite reaccionar más rápida y eficazmente sin tener que pensar. Frente al peligro este sistema hace que se libere el neurotransmisor noradrenalina o las hormonas de las glándulas adrenales, como la adrenalina y el cortisol. Estas sustancias son las responsables de muchas de las reacciones fisiológicas relacionadas con el miedo. Si las inyectáramos en el organismo obtendríamos las mismas reacciones.

Además de los efectos visibles mediados por estas hormonas y neurotransmisores, hay otros que son menos evidentes, pero que también son importantes y están asociados con un aumento en la capacidad de movernos (para pelear o huir). Por ejemplo, incrementar la tensión muscular y la dilatación de vasos sanguíneos permite que la sangre llegue más fácilmente a los músculos. También aumenta la concentración de azúcar en la sangre para darnos más energía.

¿Valiente o temerario?

El miedo nos da la posibilidad de huir de asesinos seriales o, si existieran, de hombres lobo. También podemos ver su utilidad en situaciones más cotidianas, como tomar decisiones. Si estas implican un riesgo (por ejemplo, una apuesta en un juego de cartas), puede notarse el mismo conjunto de cambios fisiológicos que al experimentar miedo.

Fue mediante un juego de apuestas con cartas que el neurocientífico Antonio Damasio observó que, en general, al perder una apuesta aumenta la conductividad eléctrica de la piel (por la transpiración súbita). Sin embargo, en individuos con daño en la corteza prefrontal del cerebro —en la que se encuentran áreas encargadas de realizar un balance costo/beneficio— no aumenta esta conductividad eléctrica. En consecuencia, estos individuos suelen tomar decisiones muy arriesgadas, como elegir opciones en las que la recompensa es alta pero las probabilidades de éxito son bajas. Valdría la pena preguntarnos si los héroes de las películas de miedo son valientes o simplemente malos tomando decisiones.

Noche oscura y tormentosa

Así como es más fácil asustar a alguien con frecuencia cardiaca elevada por tomar demasiado café, también es más sencillo que una película de

terror produzca una mayor sensación de miedo si la vemos de noche. ¿Será nada más por la falta de luz, que implica más incertidumbre cuando evaluamos el entorno para ver si hay peligro? Al parecer, no: la hora del día sí afecta. Ver una película de miedo de día, aun cuando la habitación esté a oscuras, no produce la misma experiencia de miedo. Encender las luces al ver una película de noche reduce la sensación de miedo, pero no tanto como verla de día.

En varios estudios científicos se ha encontrado que el efecto potenciador del miedo que tiene la noche es relativamente independiente del efecto de la iluminación. Uno de esos estudios lo hizo un equipo dirigido por Yadan Li, de la Universidad del Suroeste de Chongqing, China. El equipo observó un mayor aumento en los signos fisiológicos asociados al miedo —concretamente la conductividad eléctrica cutánea, la frecuencia cardiaca y la presión arterial— al exponer individuos a imágenes y sonidos terroríficos durante la noche (a las 20 horas) que durante el día (a las 8 horas). Además, no resultó de gran importancia que la habitación donde se realizó el experimento estuviera iluminada o no.

Generalmente no somos conscientes del estado fisiológico de nuestro cuerpo. Pensamos que si no sentimos un cambio es porque no lo hay. Sin embargo, a lo largo del día nuestra frecuencia cardiaca fluctúa, incluso si no realizamos actividad física intensa. La más alta ocurre en el día y la más baja en la noche, sobre todo al dormir. Esta fluctuación también se da prácticamente en todas las hormonas que circulan en la sangre, entre ellas las que se liberan en situaciones de miedo o estrés como el cortisol y la adrenalina. El patrón de variación de estas hormonas es similar al de la frecuencia cardiaca, con su punto más alto cuando estamos despiertos y los más bajos al descansar o dormir.

En animales de laboratorio se ha observado que la liberación de las hormonas del miedo y el estrés difiere a lo largo del día. Cuando trasladamos ratas de sus cajas habituales a un ambiente desconocido aumentan sus niveles sanguíneos de corticosterona, que es equivalente en los roedores al cortisol humano. Ese incremento es mayor cuando la introducción a un nuevo ambiente se realiza en el periodo de descanso de los animales. Al igual que nos sucede con las películas de terror, en las ratas el mismo estímulo puede inducir un nivel diferente de miedo dependiendo de la hora del día.

De manera similar, un susto por la noche produce un mayor cambio relativo en la frecuencia cardiaca con respecto al nivel basal. Si esta sube durante la noche, que es cuando debería estar baja, el impacto es mayor porque el aumento proporcional también es mayor.

En el día la frecuencia cardiaca en reposo ronda los 75 o 90 latidos por minuto; un estímulo que la eleve a 100 tendrá un impacto menor que si lo hiciera en la noche, cuando esa frecuencia se encuentra entre los 65 y 75 latidos por minuto. En los humanos la frecuencia cardiaca alcanza su punto más bajo entre las 2 y 3 de la mañana... y todos sabemos que nada bueno ocurre a esas horas.

Detrás del miedo

Como muchas otras características biológicas, los ritmos biológicos brindan ventajas adaptativas a los organismos que los poseen, es decir, aumentan la capacidad de supervivencia y reproducción. ¿Tiene alguna ventaja sentir más miedo de noche que de día? La explicación más plausible es que ser más susceptible al miedo en el momento en que

un organismo se prepara para dormir lo motiva a buscar ambientes seguros. En caso de no encontrarlos, el organismo no duerme profundamente, lo que le sirve para estar alerta a posibles riesgos y reaccionar adecuadamente. Dormir es muy importante, pero a la vez nos pone en una situación de enorme vulnerabilidad. Mientras dormimos somos incapaces de hacer frente a los peligros —reales o imaginarios— que acechan en la oscuridad. Por lo tanto, encontrar un lugar donde podamos pasar la noche durmiendo sin interrupciones es vital.

Aunque lo anterior podría explicar el porqué de este fenómeno, conocer el cómo, es decir, los mecanismos neuronales subyacentes, es un campo fértil para la investigación psicobiológica. Resulta de gran interés saber cómo modifica la conducta nuestro reloj biológico: si nos hace más temerarios y propensos a tomar riesgos y si nos conduce a evaluar situaciones como seguras o peligrosas según la hora del día. Este conocimiento también abre una ventana para entender cómo pueden alterar diferentes condiciones patológicas la percepción del miedo y poner en riesgo el bienestar de los individuos. Por lo pronto, podemos hacer unas palomitas, invitar amigos y poner nuestra película de terror favorita, sin olvidar que para que tenga el mayor efecto hay que verla por la noche, y disfrutar la horrible sensación sabiendo que estamos seguros en nuestras casas.

- García, Laura y Beatrix G. De Velasco, "El miedo, una emoción para la supervivencia", *Ciencia UNAM*, DGDC-UNAM, 2020, México: https://ciencia.unam.mx/
- Olguín Lacunza, Michel y Diana Rojas García, "El cine de terror nos prepara para una situación de peligro", *Gaceta UNAM*, DGCS-UNAM, 2017, México.
- "El miedo, una alarma mental para proteger nuestra integridad", Facultad de Psicología: www.humanidadescomunidad.unam.mx/el-miedo-una-alarma-mental-para-proteger-nuestra-integridad/

Esteban Santacruz Martínez es maestro en ciencias y profesor de fisiología animal en la carrera de biología en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Investiga sobre la comunicación entre los sistemas inmunitario y nervioso, en un contexto de ritmos biológicos.

Marcos Francisco Rosetti Sciutto es doctor en ciencias e investigador en el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM. Estudia los mecanismos de decisión y el desarrollo de pruebas para entender mejor los aspectos conductuales afectados por psicopatologías del neurodesarrollo.

LECTURA 19. PALEOGENÓMICA: ¿volverán los dinosaurios?

PALEOGENÓMICA:
¿volverán los dinosaurios?

Por **Gerardo Martínez Avilés y Federico Sánchez Quinto**

Foto: Bjoern Wylezich/Shutterstock

Analizar el ADN de organismos del pasado no sirve solo para revivir especies antiguas (si acaso sirve para eso): también es un camino para entender mejor a nuestra especie y adaptar la atención médica a poblaciones específicas.

En 1977 el paleontólogo estadounidense Gerard Case invitó a su amigo Charles Pellegrino a ver unos insólitos fósiles que había encontrado en Nueva Jersey. Eran unos trozos de ámbar que habían estado enterrados cerca de 95 millones de años y que contenían cuerpos de mosquitos en perfecto estado de conservación. Charles Pellegrino era un escritor de imaginación desbordada, y el descubrimiento de su amigo lo puso a pensar. Pellegrino escribió que si las células de los mosquitos habían soportado el paso del tiempo dentro del ámbar, quizá lo mismo podría haber ocurrido con su ADN. Más aún, tal vez del vientre de los insectos podría extraerse material genético de su última cena. Y considerando los organismos de aquella época, ese ADN podía ser de dinosaurio. Dando aún más vuelo a su imaginación, Pellegrino conjeturó que, con tecnología adecuada, ese material genético podría usarse para revivir dinosaurios y otras especies extintas.

Las ideas de Pellegrino inspiraron al novelista Michael Crichton, autor de *Parque Jurásico*, pero también generaron controversia en la comunidad científica de principios de los años 80. En aquel entonces se pensaba que la molécula de ADN de un

fósil se degradaba con el tiempo. Pero incluso si el ADN pudiera preservarse, las técnicas disponibles en esa época no permitían extraerlo ni descifrarlo. Pellegrino especuló que en menos de 30 años se contaría con la tecnología adecuada para manipular e investigar material genético antiguo. Tuvo razón: hoy en día hay un campo de la ciencia que se dedica a reconstruir y analizar información genómica de especies antiguas, y si bien no ha logrado revivir un dinosaurio (y quizá nunca lo haga), ha permitido obtener mucha información sobre la vida pasada y presente conservada en una cápsula de tiempo natural. El campo que estudia el ADN de organismos antiguos se conoce como *paleogenómica*.

La molécula de la información

Los seres vivos somos sistemas de enorme complejidad en los que una gran cantidad de funciones y procesos se llevan a cabo de manera coordinada. Gran parte de la información necesaria para la operación de tales procesos se encuentra codificada en el ADN. El ADN está hecho de cuatro componentes básicos, llamados nucleótidos, que contienen distintas bases nitrogenadas: adenina (A), timina (T), citocina (C) y guanina (G). Estos nucleótidos se encuentran repartidos en secuencia a lo largo de toda la estructura de doble hélice del ADN. Con las cuatro bases nitrogenadas pueden escribirse las instrucciones para realizar las funciones del organismo.

Considerar el ADN una molécula portadora de información tiene sus ventajas. Una de ellas es que podemos identificar los mensajes codificados en el ADN como genes. Un gen puede tener desde cientos hasta miles de pares de nucleótidos y su función principal es codificar información para fabricar proteínas. Leer el código genético no es fácil. Entre otras cosas, exige poder descifrar la función de cada gen. Solo el 25 % del ADN contiene información codificada en genes. El resto tiene funciones estructurales, de regulación y hasta funciones desconocidas. La información genética de todos los seres vivos del planeta está codificada en el mismo alfabeto de cuatro letras.

En la Tierra todos somos parientes en cierto grado. Los seres humanos, por ejemplo, compartimos el 60 % de nuestros genes con la mosca de la fruta. El porcentaje aumenta conforme consideramos especies evolutivamente más cercanas entre sí. Los científicos pueden comparar las secuencias genómicas de diferentes organismos (lo que se conoce como genómica comparativa). Conociendo las similitudes y las diferencias en los genomas de distintos organismos se puede inferir qué mecanismos evolutivos han actuado tanto en la conservación de características comunes, como en las divergencias genéticas entre los seres vivos. Los estudios de genética comparativa no están restringidos a organismos vivientes: las mismas técnicas pueden usarse para estudiar el material genético de organismos que vivieron en el pasado de la Tierra.

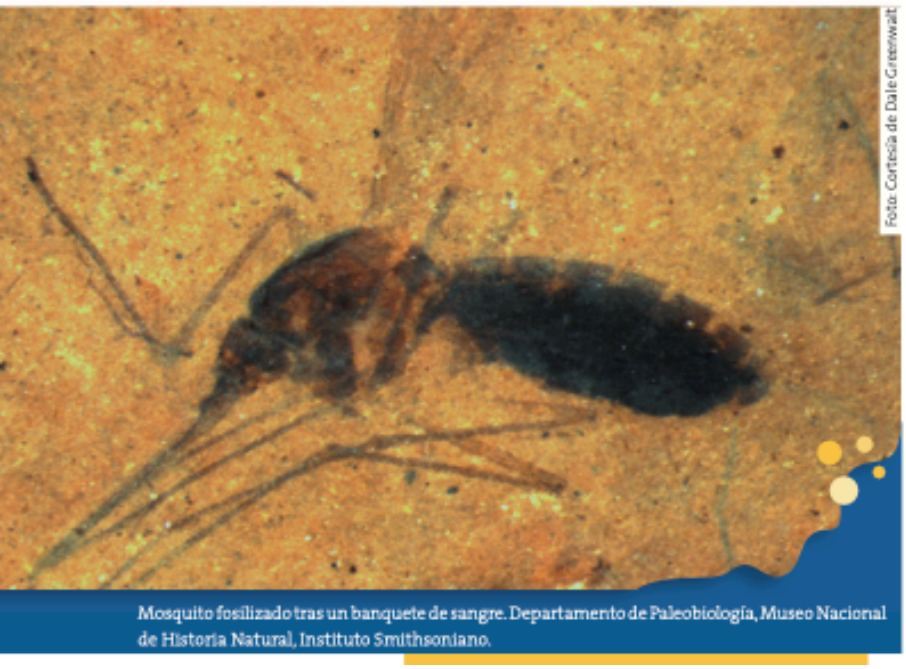


Foto: Cortesía de Dale Greenwalt

Mosquito fosilizado tras un banquete de sangre. Departamento de Paleobiología, Museo Nacional de Historia Natural, Instituto Smithsoniano.

Cápsulas de tiempo

En 1984 Russell Higuchi y Allan C. Wilson, de la Universidad de Berkeley, California, sabían de la existencia de una especie equina extinta conocida como *quagga*. Las quaggas se extinguieron hace poco más de 100 años por influencia humana. Algunos museos y zoológicos contaban con especímenes disecados muy bien conservados, de los que tal vez era posible extraer material genético. Sus colegas del Museo de Historia Natural de Maguncia, Alemania, les hicieron llegar muestras de tejido suave de una quagga disecada que había muerto en un zoológico hacia 140 años. A partir de la muestra fue posible por primera vez en la historia obtener ADN de una especie extinta. El análisis del material genético de la quagga sugirió una respuesta a un problema que había dividido a la comunidad científica: saber si las extintas quaggas eran evolutivamente más cercanas a la cebras o a los caballos. En un estudio publicado en 2005 en la revista *Biology Letters*, el equipo de Jennifer Leo-

nard, Nadin Rohland y sus colaboradores, del Instituto Smithsoniano en Washington, determinó que las quaggas son más bien parientes de las cebras. Todo indica que la línea evolutiva de las quaggas se separó de la de las cebras hace entre 120 000 y 290 000 años, en el Pleistoceno. Después de la separación, las quaggas fueron perdiendo las rayas y comenzaron a parecerse (superficialmente) más a los caballos, lo que confundió a medio mundo.

Desde la obtención y secuenciación del ADN de las quaggas, hace poco más de 30 años, se ha avanzado mucho en la investigación paleogenómica. Sin embargo, las cosas no son tan sencillas como simplemente ir a los museos y tomar muestras de especies extintas. ¿Dónde podemos encontrar ADN antiguo? Casi cualquier lugar en donde se puedan encontrar restos de células es buen candidato para extraer material genético antiguo. Pero a diferencia de lo que ocurre con una quagga disecada, el tejido blando de un organismo tiende a descomponerse en condiciones naturales. Por eso los mejores lugares para encontrar ADN antiguo bien conservado son los tejidos o estructuras orgánicas que resisten el paso del tiempo. Hasta la fecha ha sido posible recuperar ADN antiguo a partir de huesos, dientes, pelo, tejido momificado, semillas, sedimentos y coprolitos (literalmente, popó petrificada). Si los restos son muy antiguos, el estudio es un poco más complicado.

ADN antiguo

Los científicos que al principio se opusieron a las ideas de Charles Pellegrino tenían un poco de razón: la molécula de ADN se degrada con el tiempo. El material genético de los organismos vivos se encuentra en constante mantenimiento y reparación dentro de las células con la ayuda de mecanismos regulados por enzimas. Una vez que el organismo muere, dichos mecanismos dejan de funcionar y el ADN empieza a degradarse. El proceso depende de muchos factores, tales como la temperatura, el pH y el grado de exposición al ambiente. Por eso no hay un cálculo estandarizado y general que relacione la tasa de degradación con el tiempo transcurrido desde la muerte del organismo.

En un estudio publicado en la revista *Nature* en 2001 por el equipo de Michael Hofreiter, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, se estima que, en condiciones de salinidad fisiológica, pH neutro y una temperatura de 15 °C, el ADN de un organismo tardaría solo unos 100 000 años en

Quagga. Samuel Daniels, *African Scenery and Animals*, Londres.

deteriorarse hasta el grado de no poder estudiarse con las técnicas actuales. Pero dicha cifra puede variar si las condiciones de conservación son más o menos perjudiciales. Por ejemplo, en condiciones de frío extremo el ADN dura más.

El ADN más antiguo que se ha recuperado hasta el momento se extrajo de granos de polen encontrados en hielo del polo Norte que tiene una antigüedad de entre 800 000 y un millón de años. En lo tocante a mamíferos, se ha recuperado el genoma completo de los restos de un caballo del Pleistoceno atrapado en permafrost hace unos 700 000 años. En 2016 el grupo de Matthias Mayer, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, descifró una pequeña parte del genoma de un homínido de 430 000 años de antigüedad cuyos restos fueron encontrados en la Sima de los Huesos, España. Si bien el equipo solo pudo recuperar el 0.1 % del genoma, se trata de los restos de homininos (parientes evolutivos de humanos y chimpancés) más antiguos que han podido ser estudiados con las técnicas de la paleogenómica. Es buen momento para reconsiderar las ideas de Pellegrino y de *Parque Jurásico*. Los dinosaurios se extinguieron hace 65 millones de años. Ahora bien, los procesos de degradación hacen extremadamente difícil recuperar ADN de mucho más de un millón de años: simplemente se degrada todo. Podemos decir que revivir un dinosaurio no se encuentra

dentro de las posibilidades de la ciencia ni hoy, ni probablemente nunca.

Contaminación genética

Probablemente el debate más importante desencadenado por el descubrimiento de los huesos de los neandertales en 1856 ha sido su grado de parentesco con los seres humanos modernos. ¿Son los neandertales nuestros antepasados? Por medio de estudios paleontológicos se sabe que los seres humanos llegaron a Europa más o menos en la misma época en la que desaparecieron los neandertales. ¿Fueron estos eliminados por los humanos, o se mezclaron ambas especies? Dada la antigüedad de los hechos y la dificultad de obtener evidencia completa, dicha pregunta mantuvo entretenidos a antropólogos y paleontólogos durante mucho tiempo. El ADN antiguo ha sido clave para resolver el debate.

El científico sueco Svante Pääbo, en ese momento asociado a la Universidad de Múnich, Alemania, es experto en extracción de ADN antiguo. Él había clasificado secuencias de momias egipcias, de mamuts congelados y de un famoso "hombre de hielo", llamado Ötzi, de unos 5000 años de antigüedad, encontrado en los Alpes, en la frontera entre Austria e Italia. Junto con su becario Matthias Krings, Pääbo concentró su búsqueda de ADN antiguo fuera del núcleo celular para aumentar las probabilidades de recuperar material genético del mismo ejemplar de hombre de Neandertal que dio nombre a la especie. Para ello, los dos investigadores buscaron ADN en unos orgánulos celulares conocidos como mitocondrias, que se encuentran dispersos por toda la célula y cuya función es generar la energía celular. Cada mitocondria contiene una cadena de ADN que consta solamente de unos 16 600 pares de nucleótidos. Pero a diferencia del genoma del núcleo, del que cada célula contiene dos copias, existen de 500 a 1000 mitocondrias con su propio genoma en cada célula. El hecho de que muchos de los estudios de evolución humana se hubieran centrado en ADN mitocondrial dio ventaja al equipo de Pääbo y Krings para poder hacer comparaciones del ADN mitocondrial de los neandertales con la correspondiente molécula de humanos modernos.

Un problema al que se enfrentó el equipo fue la contaminación. Los análisis de Pääbo y Krings eran tan sensibles que podían detectar cualquier muestra de ADN presente en el ambiente. Diariamente nuestro cuerpo desprende células de piel muerta, desparramando ADN. Para asegurar que estos estudios no se vieran afectados por el problema de la contaminación, un grupo de control dirigido por Mark Stoneking, de la Universidad de Pensilvania, replicó el procedimiento. Si los dos laboratorios obtenían los mismos resultados con las mismas muestras, entonces era razonable concluir que el análisis genético correspondía realmente a los neandertales y no a los investigadores.

Las pruebas fueron un éxito. Ambos equipos obtuvieron 379 pares de nucleótidos idénticos, con diferencias sustanciales con el ADN de los humanos modernos. Sus resultados fueron publicados en 1997 en la revista *Science*. Desde entonces se ha avanzado mucho en el conocimiento de la relación de los neandertales con el ser humano moderno (véase *¿Como ves?* Núm. 141).

Durante sus estudios de doctorado en la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona, España, uno de los autores de este artículo, Federico Sánchez, junto con su equipo de colaboradores, estudió la historia evolutiva de los neandertales, caracterizando su diversidad genética, su estructura social y los procesos de mestizaje con los seres humanos. El equipo encontró que, si bien la estructura social de los neandertales era muy similar a la de los *Homo sapiens*, la diversidad genética de los neandertales representaba solamente la tercera parte de la que se encuentra en los seres humanos que fueron sus contemporáneos. Esto quizá hizo a los neandertales mucho más susceptibles a los cambios —especialmente climáticos— que ocu-

Foto: cortesía de Federico Sánchez Quinto

Un laboratorio de ADN antiguo.

rrieron durante el Pleistoceno. Pero el destino de los neandertales sigue siendo motivo de debate.

Reescribir la prehistoria

En los últimos años se ha echado mano de la paleogenómica para arrojar algo de luz sobre las añejas preguntas de quiénes somos y de dónde venimos. Después de sus estudios en España, Federico se unió al equipo de Mattias Jakobsson durante una estancia posdoctoral en la Universidad de Uppsala, Suecia. El equipo usó datos genómicos de individuos prehistóricos para descifrar la historia poblacional y el impacto demográfico de la llegada de la agricultura a Europa. Todo parece indicar que la agricultura llegó mediante migraciones graduales desde Oriente Próximo. A lo largo de su ruta, los agricultores se mezclaban con las poblaciones de cazadores-recolectores que habían habitado esas zonas durante miles de años, aunque a veces las desplazaban.

Federico también dedicó parte de su investigación a determinar el parentesco y la continuidad genética de varias generaciones de individuos agricultores enterrados en tumbas megalíticas por medio de estudios de ADN de los restos. Los resultados apuntan a un posible sistema patrilineal jerárquico multi-generacional, un comportamiento social que hasta hace poco se había supuesto que comenzó mucho tiempo después, hasta la Edad de Bronce. La paleogenómica puede darnos muchas pistas que nos hacen replantearnos lo que creíamos saber de nuestro pasado.

El pasado, presente y futuro de nuestra salud

Todas las poblaciones humanas tienen una historia. Por ejemplo, los mexicanos de hoy somos el resultado de una serie de procesos de mestizaje de poblaciones indígena, española y en menor medida africana, entre otras, que se han estado mezclando desde la conquista hasta hoy. Muchas enfermedades o predisposiciones médicas tienen una base en los genes, por lo que conocer la estructura genética de la población puede brindarnos información muy valiosa y ayudarnos a implementar estrategias de salud pública adaptadas a las necesidades particulares de los mexicanos. Actualmente, Federico es investigador en el Instituto Nacional de Medicina Genómica, donde investiga la historia demográfica de la población de México. El objetivo de su investigación es entender mejor las bases genéticas de enfermedades complejas.

Lyuba, un mamut de 42 000 años de edad recuperado en el permafrost ruso.

Estudiar el ADN de poblaciones ancestrales no solo nos abre una ventana para estudiar el pasado: en los últimos años ha sido también una poderosa herramienta para entender mejor quiénes somos en el presente. Sin embargo, la paleogenómica es una disciplina joven. Lo mejor está por venir.

- "Paleogenómica, análisis del ADN", Cuadernos de Cultura Científica, https://culturacientifica.com/2016/07/14/paleogenomica-analisis-del-adn/.
- Nieves-Colón, María, Kelly Blevins, Miguel Ángel Contreras-Sieck y Miriam Bravo López, "Paleogenómica y bioarqueología en México", *Cuicuilco Revista de Ciencias Antropológicas*, INAH, vol. 28, núm. 81, México, 2021, https://revistas.inah.gob.mx/index.php/cuicuilco/article/view/17129.

Gerardo Martínez Avilés es licenciado en física por la UNAM y doctor en astronomía por el Observatorio de Niza, Francia. Se dedica a leer, escribir y cuando puede, a viajar.

Federico Sánchez Quinto cursó la licenciatura en ciencias genómicas en la UNAM y realizó sus estudios de maestría y doctorado en la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona. Actualmente es investigador en ciencias médicas en el Instituto Nacional de Medicina Genómica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Perelman, C. (2023, abril) Secuelas del Covid: Lo que (aún no) sabemos. ¿Cómo ves? Revista de divulgación de la cienciade la UNAM [en línea], No. 293. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/293/secuelas-del-covid-lo-que-aun-no-sabemos
- Flandes, A. (2021, mayo) Agua en marte. ¿Cómo ves? Revista dedivulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 270. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/270/agua-en-marte
- Razo R. y Oropeza T. (2022, abril) La mente errante. ¿Cómo ves? Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 281. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/281/la-mente-errante
- Galindo T. (2021, agosto) Augurios celestes y la capitulación de Tenochtitlan ¿Cómo ves? Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea]. No. 273. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/273/augurios-celestes-y-la-capitulacion-de-tenochtitlan
- Régules S. (2022, agosto) Relatos de un hoyo negro. ¿Cómo ves? Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 285. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/285/retrato-de-un-hoyo-negro-30
- Régules S. (2022, diciembre) La mirada del telescopio espacial James Webb. ¿Cómo ves? Revista dedivulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 289. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/289/la-mirada-del-telescopio-espacial-james-webb
- Cárdenas G. (2023, enero) Fentanilo: Adictivo y letal ¿Cómo ves? Revista de divulgaciónde la ciencia de la UNAM [en línea], No. 290. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/290/fentanilo-adictivo-y-letal
- González M. (2023, febrero) Susurros del universo bajo tierra: el Snolab. ¿Cómo ves? Revistade divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 291. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/291/susurros-del-universo-bajo-tierra-el-snolab
- Murray T., (2022, julio) Los límites del planeta. ¿Cómo ves?Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 284. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/284/los-limites-del-planeta
- Córdoba G. y Pérez S. (2023, julio) Relaciones tóxicas. La vida sexual de los insectos. ¿Cómo ves? Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 296. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/296/relaciones-toxicas-la-vida-sexual-de-los-insectos
- Martín R., (2022, junio) Más cerca de la fusión nuclear. ¿Cómo ves? Revistade divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 283. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/283/mas-cerca-de-la-fusion-nuclear
- Murray T. (2023, mayo) Nada peor que el humor. ¿Cómo ves? Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 295. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/295/nada-peor-para-el-humor
- González M. y Rivera R. (2022, marzo) Sangre de colores: desde humanos hasta lagartijas ¿Cómo ves? Revista dedivulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 280. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/280/sangre-de-colores-desde-humanos-hasta-lagartijas

- Fernández C., Mendoza H. y Correa J. (2023, marzo) Avatares químicos. En busca de nuevos fármacos. ¿Cómo ves? Revista de divulgación de laciencia de la UNAM [en línea], No. 292. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/292/avatares-quimicos-en-busca-de-nuevos-farmacos
- Régules S., (2022, mayo). "Planeta" es una palabra errante ¿Cómoves? Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 282. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/282/planeta-es-una-palabra-errante
- Manjarrez A. (2023, mayo) Plegando proteínas. ¿Cómo ves?Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 294. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/294/plegando-proteinas
- Flandes A. (2022, noviembre) Los retos de apolo y artemisa. ¿Cómoves? Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 288. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/288/los-retos-de-apolo-y-artemisa
- Santacruz M. y Rosetti S. (2022, octubre) Terror a medianoche ¿o a mediodía? ¿Cómo ves? Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 287. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/287/terror-a-medianoche-o-a-mediodia
- Martínez A. y Sánchez Q. (2022, septiembre) Paleogenómica: ¿Volverán los dinosaurios? ¿Cómo ves?Revista de divulgación de la ciencia de la UNAM [en línea], No. 286. Disponible en https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/286/paleogenomica-volveran-los-dinosaurios