



ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

DESASTRES

El impacto de las tormentas severas

Logros y retos ante desastres por sismos

¿Qué tan peligrosos pueden ser los volcanes?

Los efectos del confinamiento en la educación escolar

El coral que nunca existió



CONSEJO DIRECTIVO
julio 2020 - julio 2023

Presidenta

Estela Susana Lizano Soberón

Vicepresidente

José Antonio Seade Kuri

Tesorero

Dante Jaime Morán Zenteno

Secretarios

María del Jesús Rosales Hoz

Pedro Salazar Ugarte

Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Centro-Occidente: María Patricia Arias Rozas

Sección Centro-Sur: María del Carmen Cisneros Gudiño

Sección Noreste: Oliverio Santiago Rodríguez Fernández

Sección Noroeste: Alfredo Ortega Rubio

Sección Sur-Sureste: Soledad María Teresa Hernández Sotomayor

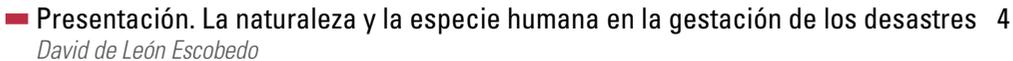
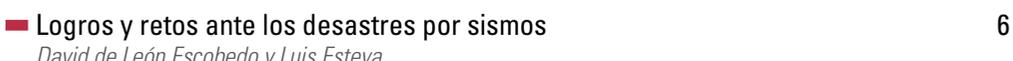
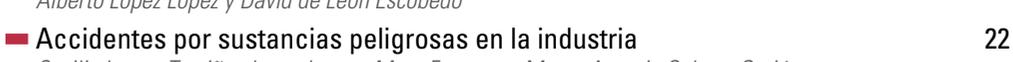
ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

octubre-diciembre 2021 volumen 72 número 4

 Desde el Comité Editorial 3 <i>Alonso Fernández Guasti</i>
--

Desastres

 Presentación. La naturaleza y la especie humana en la gestación de los desastres 4 <i>David de León Escobedo</i>
 Logros y retos ante los desastres por sismos 6 <i>David de León Escobedo y Luis Esteva</i>
 El impacto de las tormentas severas 14 <i>Alberto López López y David de León Escobedo</i>
 Accidentes por sustancias peligrosas en la industria 22 <i>Cecilia Izcapa Treviño, Juana Lorena Mora Fonseca y Marco Antonio Salazar Gutiérrez</i>
 Comunidades amenazadas por deslizamiento de laderas 26 <i>Leobardo Domínguez Morales y David de León Escobedo</i>
 ¿Qué tan peligrosos pueden ser los volcanes? 38 <i>Servando de la Cruz Reyna</i>
 El riesgo de transportar sustancias químicas 46 <i>Cecilia Izcapa Treviño, Rubén Darío Rivera Balboa y Araceli Arista Narciso</i>

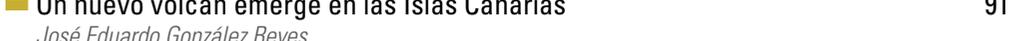
Novedades científicas

 ¿Es posible encontrar agua en el manto terrestre? 54 <i>Juan Daniel Pérez Orozco, Giovanni Sosa Ceballos y José Luis Macías Vázquez</i>
 El coral que nunca existió 62 <i>Pedro Medina Rosas</i>
 Combustibles solares 69 <i>Arturo Velasco Hernández, Sandra Andrea Mayén Hernández y Rodrigo Alonso Esparza Muñoz</i>

De actualidad

 Los efectos del confinamiento en la educación escolar 78 <i>Inés Dussel</i>
--

Desde las redes

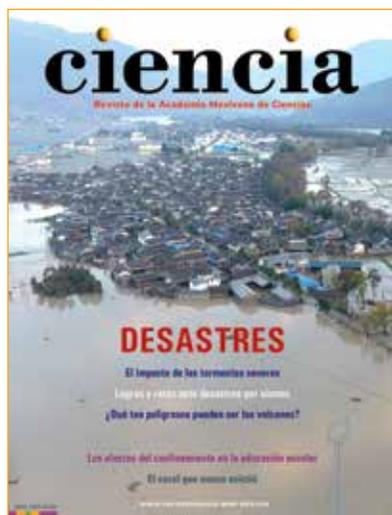
 ¿Crónica de una extinción anunciada? 88
 Plantas zombis 89
 Golpe a Júpiter 90
 Un nuevo volcán emerge en las Islas Canarias 91 <i>José Eduardo González Reyes</i>

In memoriam

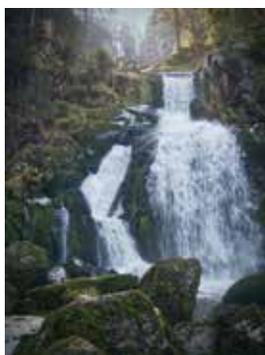
 Ricardo Tapia Ibarquengoytia 92 <i>por Clorinda Arias</i>
--

Noticias de la AMC

93



Portada: Pixabay.



Separador: Pixabay.

ciencia, volumen 72, número 4, correspondiente a octubre-diciembre de 2021, editado y distribuido por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Academia Mexicana de Ciencias. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa de la Academia Mexicana de Ciencias. Certificado de Reserva de Derechos al uso exclusivo del título 04-2001-072510183000-102 expedido el 25 de julio de 2001 por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Certificado de Licitud de Título y Contenido 17371 expedido por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. ISSN 1405-6550. Editor responsable: Francisco Salvador Mora Gallegos. Formación: Intidrinero, S.A. de C.V., tel.: 55-5575 5846. Correspondencia: Academia Mexicana de Ciencias, A. C., atención: Revista Ciencia, Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México, tel.: 55-5849 4903, fax: 55-5849 5108, rciencia@unam.mx, <http://www.amc.mx>.

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias
octubre-diciembre 2021 volumen 72 número 4

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Alonso Fernández Guasti

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero

Raúl Ávila

Ana Cecilia Noguez

Raymundo Cea

Deborah Dultzin

Alonso Fernández Guasti

Ronald Ferrera

Gerardo Gamba

Adolfo Guzmán

Juan Pedro Laclette San Román

Miguel Ángel Pérez de la Mora

Carlos Prieto de Castro

Sergio Sánchez Esquivel

Alicia Ziccardi

Editora

Rosanela Álvarez

Corrección de estilo y enlace con autores

Paula Buzo

Social Media

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Intidrinero, S.A. de C.V.

Ilustradora

Ana Viniestra, pp. 7, 15, 26-27, 39, 79, 83

Pixabay: pp. 18, 20, 40, 44, 53

Depositphotos: pp. 4, 13, 19, 21, 23, 47, 51, 73, 76, 80, 84, 85, 86

Shutterstock: 60, 62

Red

Walter Galván Tejada

Academia Mexicana de Ciencias, A.C.

Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N,

Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México

tel.: 5849 4903, fax: 5849 5108

www.revistaciencia.amc.edu.mx



@CienciaAMC

 **ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS**
CONACYT DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Este número de la revista *Ciencia* ha sido posible gracias al patrocinio del Instituto de Investigaciones Jurídicas y de la Coordinación de la Investigación Científica de la UNAM.



Coordinación de la
Investigación Científica UNAM

Desde el Comité Editorial

Les damos la bienvenida a este número de la revista *Ciencia*, en el que hablamos sobre algunos desastres que los fenómenos naturales –como los sismos, las tormentas o las erupciones volcánicas– pueden provocar, o bien aquéllos producidos por la humanidad –por ejemplo, debido al derrame de sustancias químicas peligrosas–. En la serie de artículos que conforman la *Sección temática* encontramos respuestas a preguntas como: ¿qué causa las tormentas y cuáles son sus impactos sobre la infraestructura y la economía?, ¿qué tan peligrosos pueden ser los volcanes?, ¿cuál es la mejor manera de protegerse durante un sismo?, ¿cuáles son las herramientas para predecir los deslizamientos de tierra y cómo salvaguardar a las comunidades en riesgo?

Es imposible evitar las tormentas, los temblores o las erupciones volcánicas, pero sí se pueden prevenir los daños que generan. Con el apoyo de la investigación científica, el análisis y la interpretación de diversas señales es posible estimar de manera más o menos precisa la ruta y la intensidad de un huracán, la probabilidad de una erupción volcánica o el deslizamiento de una ladera. La mejor manera para evitar cualquier daño provocado por fenómenos naturales incluye un amplio conocimiento de sus causas, un sistema oportuno de alerta, una serie de ejercicios de simulacro y otras medidas de protección civil que se revisan en el presente número.

Estas páginas también nos invitan a reflexionar: ¿qué tanto colaboramos los seres humanos al desarrollo de fenómenos naturales que provocan desastres? Por ejemplo, en todo el mundo se ha incrementado la pérdida de vidas y de bienes materiales debido a los efectos de fenómenos climáticos extremos que se han atribuido al calentamiento global provocado por la emisión de los gases de tipo invernadero. Asimismo, en los deslizamientos de tierra –que en México causan cuantiosos decesos y daños materiales– está involucrada la actividad humana por haber realizado excavaciones, sobrecargas, deforestación y desagües mal planeados. Por otra parte, prácticamente todos los productos de uso cotidiano dependen de la industria que utiliza, almacena y transporta sustancias químicas que pueden ser peligrosas. En estas actividades, un incidente causado por error humano o por la falla del equipo tecno-

lógico puede provocar desastres como los accidentes carreteros, el incendio de instalaciones industriales, o bien las fugas y derrames de líquidos y gases peligrosos. Es trágico que en nuestro país los fuegos artificiales sean causa de desastres que involucran explosiones y grandes pérdidas. ¿Cómo evitar esos accidentes y sus efectos dañinos?

El artículo que aparece en la sección *De actualidad* está relacionado con la pandemia de COVID-19 y habla sobre los efectos del confinamiento en la educación escolar. Una de las consecuencias más impactantes ha sido el cierre de los planteles escolares que obligó a “hacer escuela” de manera improvisada por medio de las tecnologías computacionales. Durante la pandemia, los estudiantes han tenido que superar el estrés de las nuevas condiciones y desarrollar mucha paciencia y autonomía para resolver las tareas que ocupan casi todo su tiempo. Sin duda, la experiencia educativa en el confinamiento dejará huellas en las nuevas generaciones que se han visto obligadas a estudiar en un contexto de nuevas amenazas y dificultades.

La sección de *Novedades científicas* aborda temas diversos e interesantes. Por ejemplo, se estima que la cantidad de agua en el manto terrestre (la porción entre la corteza y el núcleo externo de nuestro planeta) es equivalente a cinco veces la de los océanos, siempre y cuando se pudieran unir todos los hidroxilos para formar agua. Otro artículo relata de manera muy amena la expedición científica realizada hace 60 años en un barco emblemático; a bordo iba un explorador que describió una especie nueva de coral, la cual, con el paso de los años, se descubrió que ya había sido descrita: un caso de sinónimo taxonómico. En tanto, una alternativa para reducir el cambio climático está en la obtención de combustibles solares a partir de CO₂, mediante el fenómeno de fotocatalisis, proceso que actualmente se estudia en diversas instituciones de nuestro país.

Finalmente, los miembros del Comité Editorial expresamos nuestra pena por la muerte del Dr. Ricardo Tapia, director de esta publicación de 1997 al 2000.

Esperamos que disfruten la lectura de este número.

ALONSO FERNÁNDEZ GUASTI
Director

David de León Escobedo, editor huésped



Presentación

La naturaleza y la especie humana en la gestación de los **desastres**

En muchos casos, los desastres producidos por fenómenos naturales son inevitables, pero hay otros eventos en los que la especie humana contribuye de manera importante, ya sea por falta de conocimiento o de sentido de solidaridad, con lo cual se incrementan las consecuencias o el tiempo de afectación. Sin embargo, aun cuando algunos acontecimientos de este tipo sean inevitables, como en el caso de los sismos, se pueden preparar estrategias para mitigar sus efectos.

De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), en ocasiones los seres humanos participamos en la construcción del riesgo, cuando, por errores o por la falta de una adecuada gestión de mitigación, provocamos que las consecuencias de un desastre sean mayores o se extiendan más, en comparación con situaciones para las que se planea, se previene y se trabaja de manera coordinada para reducir los efectos adversos de un evento peligroso. Por ello, resulta esencial que nos informemos, aprendamos y actuemos con sentido de responsabilidad para incrementar la efectividad y eficacia de las acciones de prevención.

Como parte de lo anterior, el presente número de la revista *Ciencia* pretende llamar la atención sobre las características de diversos desastres, algunos derivados de eventos naturales y otros generados por los seres humanos, con el objetivo de mejorar su entendimiento y –sobre todo– poner en relieve lo que las personas y las comunidades podemos hacer para amortiguar el nivel de las tragedias. Entre los ejemplos abordados se incluyen desastres producidos por eventos naturales como sismos, tormentas, deslizamientos de laderas y volcanes, así como accidentes por el manejo y transporte de sustancias peligrosas. No obstante, no se tratan los desastres económicos o financieros (como la gran depresión) ni tampoco los biológicos (como las pandemias, fugas o escapes de productos petroleros o el calentamiento global y otros fenómenos de degradación ambiental).

Cada uno de los artículos, más allá de las particularidades de sus enfoques, se ha dirigido a fomentar la preparación y prevención, de manera que nuestros lectores podrán identificar las áreas de oportunidad para que, como individuos y como pueblos, podamos participar en el fortalecimiento de la cultura de prevención y

preparación, anticiparnos al desastre y contribuir a mitigar los saldos que, en términos de fallecimientos y pérdidas económicas, se presentan después de que ocurren los eventos que devienen en desastres.

En algunos artículos sólo se aborda el aspecto de ocurrencia del evento de peligro, mientras que en otros se discuten las características de vulnerabilidad y el riesgo implícitos, específicamente para ciertas localidades del país. Asimismo, en algunos de los trabajos se identifican las implicaciones de protección civil, en tanto que otros presentan detalles de tipo geoespacial que los hacen susceptibles para el desarrollo de mapas y herramientas científicas y cartográficas que incluyen tecnologías de información y comunicación. En algunos temas se comentan aspectos de alerta y en otros se discuten las innovaciones tecnológicas que están surgiendo en México y en el mundo para avanzar en el pronóstico y la mitigación en cada uno de los temas. En todos los casos, los autores han aportado los elementos del estado del arte y de la práctica actual que inciden en el tratamiento moderno de cada tipo de evento y la exploración de los aspectos que aún representan un reto para la investigación e implementación de políticas públicas, según cada tipo de peligro.

Agradezco a los especialistas que han colaborado como autores de los artículos, por el tiempo y entusiasmo que han dedicado. Todos comparten el sentido de urgencia para que la sociedad se informe y participe de una forma amplia en la construcción de la cultura de la autoprotección en torno a los diferentes tipos de peligros que se tratan en cada artículo. También estamos agradecidos con los editores de la revista *Ciencia*, por la oportunidad de abordar estos temas y ayudar a que se difunda en la comunidad la información que permita crear mayor conciencia y agudizar el sentido de preparación para enfrentar los peligros con mejores elementos.

Esperamos que este esfuerzo agregue nueva vitalidad a las iniciativas que ya existen por robustecer las capacidades de la sociedad frente a diversos desastres; y que, en el corto, mediano y largo plazo, nuestro país haga frente a los eventos peligrosos con una actitud más racional y madura que permita tomar mejores decisiones y el efecto de mitigar los desastres que, desafortunadamente, se seguirán presentando en el futuro. Si la lectura de este número logra generar un espíritu de no bajar la guardia, y de querer seguir aprendiendo para responder mejor a los retos que presentan los peligros, se habrá cumplido el objetivo de este trabajo.



Logros y retos ante los desastres por sismos

En México y en el mundo, los desastres producidos por sismos de gran intensidad se han mitigado con el apoyo de la investigación científica; sin embargo, aún hay desafíos por atender. Sin duda, en nuestro planeta seguirá temblando, por lo que debemos mantener la guardia en alto, con estrategias permanentes de actualización y políticas eficientes de prevención y control de riesgos sísmicos.

Introducción

En muchas ocasiones, los sismos han generado grandes desastres tanto en México como en otros lugares del mundo (Pérez Campos, 2018), lo cual incluye las diversas consecuencias respecto a las pérdidas humanas (véanse las Tablas 1 y 2) y también económicas, como son las caídas del producto interno bruto, el endeudamiento que compromete el apoyo para las próximas generaciones y la distracción de recursos financieros que de otra forma podrían haberse utilizado para el desarrollo y crecimiento (véase la Figura 1).

Tabla 1. Datos de algunos de los mayores desastres por sismos en el mundo.

Año	Lugar	Fallecimientos	Magnitud
1138	Aleppo, Siria (Sbeinati y cols., 2005)	230 000 (aprox.)	Desconocida
1556	Shaanxi, China	830 000 (aprox.)	8
1976	Tangshan, China	255 000 (aprox.)	7.8
2004	Sumatra, Indonesia	227 000 (aprox.)	Temblor 9.1 y tsunami

Tabla 2. Datos de los mayores desastres por sismos en México.

Año	Lugar de la fuente	Fallecimientos	Magnitud
1957	Guerrero	54	7.9
1985	Michoacán	> 10 000	8.1, réplica 7.9
1995	Colima	49	8
2017	Puebla	370	7.1





Figura 1. Destrucción causada por el terremoto de magnitud 7.8 en Bhaktapur, Nepal, en 2015 (fotografía: ABC Ciencia y Reuters).

Peligro sísmico

La probabilidad de que ocurra un sismo.

El elevado nivel de **peligro sísmico** en varias regiones de nuestro país reclama una constante atención, preparación y actualización por parte de diferentes instituciones públicas, autoridades, asociaciones y sociedades profesionales, organismos de supervisión, entre otros, relacionados todos con la planeación, diseño, construcción, inspección, mantenimiento y operación de obras; para ello, en especial, la ingeniería sísmica está más involucrada que en otras ramas de la ingeniería.

En los países que tienen zonas de alto peligro sísmico (como Estados Unidos de América, Japón, Chile y México, entre muchos otros) la industria de la construcción se enfrenta a la encrucijada de lograr un balance entre los niveles de seguridad establecidos como aceptables –dependiendo del peligro sísmico estimado en el sitio de interés– y la necesidad de mantener un nivel de economía plausible para que la inversión pública y privada en las construcciones siga resultando atractiva para seguir en la vía de resolver las necesidades de vivienda, trabajo y esparcimiento de la población. La estimación del peligro sísmico debe entonces tomar en cuenta tanto la información estadística directa disponible para el sitio de interés como la que se derive de modelos matemáticos sobre la posible actividad futura de las fuentes sísmicas

cercanas, las cuales sean capaces de generar sismos con intensidades significativas. A partir de esta información, tomando en cuenta el objetivo de lograr el balance entre los niveles de seguridad y los impactos económicos, se determina el **periodo de retorno** de la intensidad sísmica que se adoptará para el diseño y se establecen los criterios y factores de seguridad necesarios para mantener a un nivel suficientemente bajo la probabilidad de colapso del sistema en caso de que se vea sometido a un temblor de gran magnitud. Al evaluar los niveles de seguridad para un valor dado de la intensidad sísmica, deberán tomarse en cuenta las incertidumbres en las características detalladas del movimiento del terreno que puedan afectar las respuestas dinámicas de las construcciones.

La historia reciente de eventos sísmicos ocurridos en México ha sido muy significativa para la actualización de las estimaciones del peligro y del **riesgo sísmico**: el llamado temblor del Ángel de la Independencia en 1957, el terremoto de 1985 y los sismos de la década de 1990 nos habían hecho pensar que los temblores que contribuían significativamente al peligro sísmico en la Ciudad de México tenían su epicentro en la vecindad de la costa del Pacífico. Sin embargo, con los más recientes eventos de 2017 se reconoció la importancia de los **temblores intraplaca**

Periodo de retorno

Tiempo medio entre ocurrencias de dos sismos con magnitud igual o mayor que un valor dado.

Riesgo sísmico

Incluye el peligro sísmico, la vulnerabilidad de las construcciones y el costo de las consecuencias por el daño o falla de la construcción.

Temblores intraplaca

Sismos que se generan dentro de una placa tectónica.

con epicentros cercanos a las grandes poblaciones, así como los temblores con focos poco profundos (véase la Figura 2).

Desde hace algún tiempo, los especialistas se comenzaron a dar cuenta de que se pueden generar grandes pérdidas económicas sin que necesariamente un sismo sea de gran magnitud, sin que haya muchas muertes o sin que las construcciones experimenten un colapso total. Uno de estos eventos fue el sismo de Northridge, California, en 1994. Con una magnitud de 6.7, provocó 33 muertes, además de pérdidas equivalentes a 40 billones de dólares, por lo que hasta la fecha se distingue como el que mayor impacto ha tenido en la industria de los seguros en Estados Unidos de América. El primer motivo fue que el movimiento sísmico se generó en una falla que no era conocida; además, la mayoría de los daños en las construcciones ocurrieron en las juntas de los miembros de acero, sobre todo fallas de fractura frágil, que no estaban previstas en la versión de las recomendaciones para el diseño de estructuras de acero de entonces. Debido al número y localización de estos daños, fue necesario demoler y reconstruir un gran número de construc-

ciones; en otras, las reparaciones tomaron mucho tiempo. Esto derivó en un alto monto de pérdidas por la interrupción de operaciones productivas de las construcciones afectadas (como tiendas departamentales y hospitales).

Estrategias de mitigación

 La naturaleza transversal y multidisciplinaria del problema implica que ha crecido la importancia de mejorar la comunicación y el entendimiento entre las distintas ramas del proceso y la industria de la construcción, lo cual remarca la necesidad de generar alianzas y colaboraciones en los aspectos de planeación, diseño, construcción, supervisión y mantenimiento de obras (De León, 2018). Lo anterior es pertinente tanto para construcciones específicas con un desafío técnico especial como, en general, para mejorar nuestro entendimiento de los sismos y, en muchos casos, optimizar la eficacia marginal que se logra con una disciplina, pero que ignora a las demás. Por ejemplo, en los proyectos deben involucrarse especialistas en arquitectura, geotecnias, geofísica, economía,



Figura 2. Edificio de la colonia Condesa, Ciudad de México, dañado por el sismo de magnitud 7.1. en 2017 (fotografía: *El País*, Marco Ugarte, AP).

sociología, directores responsables de obra, etcétera. En el caso de la Ciudad de México, es fundamental la participación del Instituto para la Seguridad de las Construcciones y el seguimiento al proyecto del Consejo Consultivo Sobre Sismos, que promueve la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

El reto de dar a la sociedad una respuesta eficaz en las tareas posteriores a un sismo, más allá del protagonismo de quienes sólo desean recibir el crédito, pero que no contribuyen de un modo efectivo, sigue siendo un área de oportunidad en México. Las labores desinteresadas del voluntariado, para el rescate y la evaluación de edificios, necesitan de coordinación, capacitación y asesoría técnica para aprovechar mejor los talentos de quienes colaboran, así como un entrenamiento mínimo para uniformizar criterios en las tareas de dictamen de las instalaciones. La participación conjunta con especialistas en sociología también redundará en incrementar la eficacia de las acciones, sobre todo para apoyar a la población que debe abandonar sus casas en zonas en donde aún hace falta que la autoridad asegure el estado de derecho para la protección de los bienes de las personas. Sin duda, los aspectos de planeación, organización y

coordinación que se detallan más adelante abonan en pro de contar con una mejor capacidad de respuesta para beneficio de la sociedad ante la eventualidad de un sismo que provoque daños serios.

Los dilemas relativos a la vivienda, sobre todo en las zonas marginadas, donde resalta el grave problema socioeconómico que afecta a la mayor parte de la población, así como la laxa aplicación en ocasiones de las normas sobre el uso adecuado del suelo, los asentamientos en zonas de alto peligro, la falta de una autoconstrucción informada, entre otros factores, crean condiciones adversas para la mitigación del riesgo sísmico. Un problema aparte es el de las escuelas y los hospitales donde –de nuevo– las condiciones de marginación y pobreza del país, en conjunto con la falta de reglamentos de construcción adecuados, contribuyen a que los sismos encuentren a la sociedad desprotegida y provoquen daños serios o colapsos –con las consecuentes muertes–, además de un mayor atraso en el ya de por sí relevante déficit de instalaciones físicas para la educación y salud en México (véanse las Figuras 3 y 4).

No obstante, actualmente hay señales alentadoras, tanto del Instituto Nacional de la Infraestructura



Figura 3. Escuela dañada en Oaxaca por el sismo de 2017 (fotografía: Gobierno de Oaxaca).



Figura 4. Hospital General colapsado por el terremoto de 1985 (fotografía: USGS, Wikimedia Commons).

ra Física Educativa, ya que se cuenta con un reglamento nacional de construcción de escuelas, como del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), para la promoción de la estrategia de contar con hospitales seguros (en este caso se está impulsando un reglamento también nacional). Dichos esfuerzos deberán fortalecerse para alcanzar el éxito en materia de mitigación de riesgos sísmicos para este tipo de construcciones.

Adicionalmente, otra señal alentadora en materia de seguridad sísmica en México es la creación del Instituto de la Seguridad Estructural para las Construcciones en la Ciudad de México, que tiene la misión de garantizar la seguridad y calidad de las obras. En todos los municipios y estados del país deberían existir organismos similares.

Oportunidades para el control y la reducción de los desastres

 Algunos elementos que aportan al optimismo para enfrentar el reto de controlar y mitigar los desastres producidos por sismos son, entre otros:

- La frecuente actualización de los reglamentos, como el de la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2017), así como los manuales de construcción y los comités que les dan seguimiento.
- Como parte del punto anterior, la búsqueda de las mejores prácticas y el desaliento del uso de sistemas y materiales que han demostrado poca eficiencia para resistir a los temblores en nuestro país.
- La incorporación de experiencias y las lecciones que aún quedan por aprender por parte de las sociedades técnicas, el Colegio de Ingenieros Civiles y Arquitectos, además de organismos como el Cenapred, la Alianza para la Formación e Investigación en Infraestructura para el Desarrollo de México (Alianza Fiidem) y demás encargados de difundir, entre los profesionistas de la construcción, estudiantes e interesados, información y orientación en cuanto a no bajar la guardia y detallar la correcta aplicación de las normas, guías y conceptos que subyacen a la interpretación del peligro sísmico y el uso de los estándares

Reparación óptima
Estrategia que minimiza el valor presente del costo esperado de daños en el ciclo de vida.

- más adecuados para el diseño y la construcción en las zonas sísmicas de México.
- La introducción y socialización de aspectos novedosos –como la resiliencia, sustentabilidad, **reparación óptima**– que toman en cuenta el daño acumulado, la posible pérdida parcial o total de equipo u objetos importantes (como en un hospital o en un museo) y el valor del servicio u operación de la construcción durante su vida útil.

Tal vez la prevención y preparación conformen actualmente el eslabón más débil de la cadena de la protección civil, pues todavía falta mucho por hacer para lograr la optimización de inversiones, ya que es evidente que cada vez que ocurre un sismo significativo, independientemente de las pérdidas humanas producidas, cuesta más estar reconstruyendo y reparando construcciones que invertir en proveer de la seguridad sísmica necesaria.

En ese sentido, los simulacros deben tomarse con mayor seriedad e incorporar el ensayo de acciones de coordinación entre líderes de las dependencias ligadas al tema de la ayuda que se les brindaría a las víctimas. La capacitación de quienes ejecuten los trabajos de rescate y evaluación de la seguridad estructural en las construcciones es también un aspecto clave para el éxito del proceso. Y, ante todo, es necesario que se siga promoviendo la participación y cultura de preparación y autocuidado de las comunidades.

Además, una oportunidad que no debe soslayarse es la cobertura de las necesidades de formación: desde programas escolarizados en las instituciones de educación superior ubicadas en zonas sísmicas hasta ofertas de actualización rápida (como la iniciativa de aceleración del conocimiento de la Alianza Fii-dem, los programas de capacitación del Instituto de la Cámara de la Construcción, así como los cursos, simposios y congresos organizados por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural y la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, entre otras). Aunado a todo ello están las múltiples ventanas de oportunidad para la acción conjunta y colaboración internacional (por ejemplo, con el Earthquake Engineering Research Institute, el gobierno de Taiwán, la Asocia-

Disipadores de energía
Dispositivos de control para reducir los efectos de la respuesta dinámica de las estructuras.

ción Internacional de Ingeniería Sísmica, etcétera). Asimismo, de la colaboración con la industria de los seguros podrían derivarse alianzas importantes para impulsar la cultura de la cobertura contra sismos, al menos por parte de los sectores de la población con capacidad de contratarla.

Avances y retos de investigación en la ingeniería sísmica

■ La investigación realizada en México ha contribuido de manera relevante al desarrollo de criterios de diseño sísmico con un enfoque para la optimización del ciclo de vida de las construcciones, por medio de metas establecidas de confiabilidad y desempeño esperado, así como a partir del desarrollo de los primeros mapas de regionalización sísmica en el mundo (Esteva, 1967; Esteva, 2018; Rosenblueth, 1993; Rosenblueth y Esteva, 1966; Rosenblueth y Esteva, 1972).

Sin embargo, aún urge mejorar las normas de diseño estructural y los criterios de supervisión y control de calidad en muchas zonas sísmicas de diversos estados del país, algunas de ellas altamente marginadas. Otro reto es lograr la interacción eficiente entre la investigación y la práctica de los arquitectos, ingenieros estructurales y especialistas en geotecnia, así como entre colegios y asociaciones gremiales que no siempre comparten objetivos ni estrategias o acciones en el espacio de trabajo; así, es necesario enfatizar la misión de los profesionales involucrados en estos temas, con un enfoque de servicio social y no sólo de beneficios económicos personales. Estas distorsiones o dislocaciones del mercado de la ingeniería producen una falta de unidad en el gremio que lo debilitan para enfrentar los retos relacionados con los temblores; esto le ocurre a la ingeniería en general, pero a la ingeniería sísmica en particular. La falta de certificación profesional, que actualmente es voluntaria, reduce las posibilidades de tener una calidad adecuada y uniforme en los proyectos de las construcciones y deja a los deseos de los dueños la selección de la oferta de mejor calidad.

Mención aparte merece el tema de los **disipadores de energía**, que han sido valorados en investi-



gaciones científicas para mostrar sus ventajas (Sosa y Ruiz, 1992), pero que en la práctica aún se topan con la desconfianza de los usuarios y la costumbre de considerar sólo el costo inicial de los proyectos y no la reducción del costo futuro esperado por el desempeño de los disipadores en la vida útil de la construcción.

Conclusiones

 En México, como en todos los países con un elevado peligro sísmico, el reto es latente; pese a los avances y las señales alentadoras, no debemos bajar la guardia. La mejor actitud ante el hecho de que la amenaza seguirá siendo parte de nuestra vida es prepararse, seguir aprendiendo y ejercitar la mejora continua en las prácticas de planeación, diseño, operación, supervisión, mantenimiento y protección civil, entre otras vertientes transversales a la vida de la sociedad. Las alianzas entre organismos e instituciones relacionadas con la mitigación de desastres

sísmicos, el espíritu de colaboración desinteresada y la proactividad de todos en torno a la cultura de preparación ayudarán, sin duda, al logro de avances sólidos hacia la meta de que nuestra sociedad mitigue a niveles razonables el riesgo sísmico al que se encuentra expuesta.

David de León Escobedo

Universidad Autónoma del Estado de México.
daviddeleonescobedo@yahoo.com.mx

Luis Esteva

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
lestevam@iingen.unam.mx

Referencias específicas

- De León, D. (2018), "El papel de la ingeniería ante los sismos", *Ciencia*, 69(3):24-29.
- Esteva, L. (1967), "Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico", Tercer Simposio Panamericano de Estructuras, Caracas, Venezuela.
- Esteva, L. (2018), "Peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico", *Ciencia*, 69(3):30-35.
- Gobierno de la Ciudad de México (2017), *Normas técnicas complementarias para diseño por sismo*, México, Gobierno de la Ciudad de México.
- Pérez Campos, X. (2018), "Presentación. Los sismos", *Ciencia*, 69(3):6-7.
- Rosenblueth, E. (1993), "Diseño óptimo en ingeniería sísmica", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, México.
- Rosenblueth, E. y L. Esteva (1966), *On seismicity. Seminar on Applications of Statistics in Structural Mechanics, Civil and Mechanical Engineering*, Filadelfia, University of Pennsylvania.
- Rosenblueth, E. y L. Esteva (1972), "Reliability Basis for Some Mexican Codes Publication", *ACI Special Publication*, 31:1-42.
- Sbeinati, M. R., R. Darawcheh y M. Mouty (2005), "The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D.", *Annals of Geophysics*, 48(3):347-435.
- Sosa, A. y S. Ruiz (1992), "Análisis estructural y costos en edificios con aisladores sísmicos", *Ingeniería Sísmica*, 44:11-28.

Alberto López López y David de León Escobedo

El impacto de las tormentas severas

En el siguiente texto se describen las tormentas severas más comunes en México y el impacto que generan en obras de infraestructura. Esto incluye desde las causas y el origen de las tormentas, pasando por sus características, hasta la explicación de las consecuencias en términos de fallecimientos y pérdidas económicas.

Introducción

Desde inicios de la civilización, se ha tenido un gran interés por el viento. Cuando comenzó la aventura del dominio de los mares, los seres humanos se enfrentaron a las tormentas marinas que destrozaban sus embarcaciones construidas de forma empírica. Fue entonces cuando comenzaron a avanzar en el conocimiento para que éstas aprovecharan el viento. Así, los pueblos escandinavos, quienes florecieron durante el siglo VI, y posteriormente los vikingos, durante los siglos VII a XI, fueron los pioneros y expertos de la navegación en mar abierto. Ellos inventaron la quilla y perfeccionaron sus barcos con velas para impulsarlos con el viento. Más adelante, durante la Revolución Industrial del siglo XVIII, se inició la construcción de barcos de vapor a partir de un mayor interés por comprender la ocurrencia de las tormentas marinas con el fin de proteger a las embarcaciones. De ahí se empezó a estudiar el fenómeno de las tormentas de manera sistemática.

El primero en estudiar los fenómenos meteorológicos fue Aristóteles, alrededor del año 340 a. d. n. e., quien incluyó en su libro *Meteorologica* observaciones acerca del origen de los fenómenos atmosféricos y celestes. En el siglo XV Leonardo Da Vinci inventó un anemoscopio mecánico para medir la intensidad del viento y su dirección. Durante el siglo XVII, Galileo Galilei, Evangelista Torricelli, Blaise Pascal, René Descartes y Robert Hooke fueron los precursores del desarrollo de instrumentos para la medición de algunos parámetros meteorológicos. De hecho, el nacimiento de la meteorología como una ciencia genuina natural se definió a partir de la invención de instrumentos de medición como el termómetro, el barómetro y el higrómetro, entre otros.

En la actualidad, la meteorología se define como el estudio de la atmósfera y sus fenómenos. La atmósfera de la Tierra es una capa fina de aire compuesto de gases,



principalmente nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2), con una pequeña cantidad de otros gases, como vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2). A medida que se desarrollaron mejores instrumentos, hasta llegar a los satélites de ahora, la meteorología fue progresando de manera importante. Asimismo, los conceptos de circulación en la atmósfera y movimientos de las tormentas se han hecho más claros, por lo que el estudio del viento comenzó a tener auge en el conocimiento sobre el movimiento de las masas de aire en la atmósfera. Esta circulación puede describirse como la superposición de flujos independientes, caracterizados por diferentes escalas de dimensión y de tiempo, que pueden ir desde metros hasta kilómetros y de minutos hasta horas o días.

El ecuador es la región más cercana al Sol y, por ende, la más caliente. A partir de allí se genera la circulación global del viento (véase la Figura 1), que en las demás zonas de la Tierra se rige por el efecto Coriolis; esto es, el movimiento del aire causado por la rotación del planeta. Dicho efecto determina que el viento sople del noreste al suroeste en el hemisferio norte y del sureste a noroeste en

el hemisferio sur (Ahrens y Henson, 2016; Jáuregui, 1969).

El movimiento de los vientos se centra en las latitudes conocidas como células Hadley (entre 30° de latitud norte y sur, excluyendo la Zona de Calma Ecuatorial, que está entre las latitudes 10° y -10°), células de Ferrel o de longitud media (30° a 60° latitud norte y sur) y células polares (60° a 90° latitud norte y sur). El aire caliente que proviene del ecuador se desplaza y, gracias a los cambios de estaciones, el conjunto de las células y las temperaturas generan un sistema complejo de movimiento por todo el globo. Gracias a estos ciclos el clima se estabiliza.

Para analizar la circulación, los movimientos de las masas de aire se han clasificado mediante una escala horizontal. En meteorología, se han definido tres grupos principales: microescala, mesoescala y macroescala (esta última también llamada escala sinóptica). La microescala incluye movimientos de menos de 20 km y una escala de tiempo de menos de una hora. La escala sinóptica incluye movimientos de más de 500 km y su escala de tiempo es de dos días o más. La mesoescala está definida por escalas

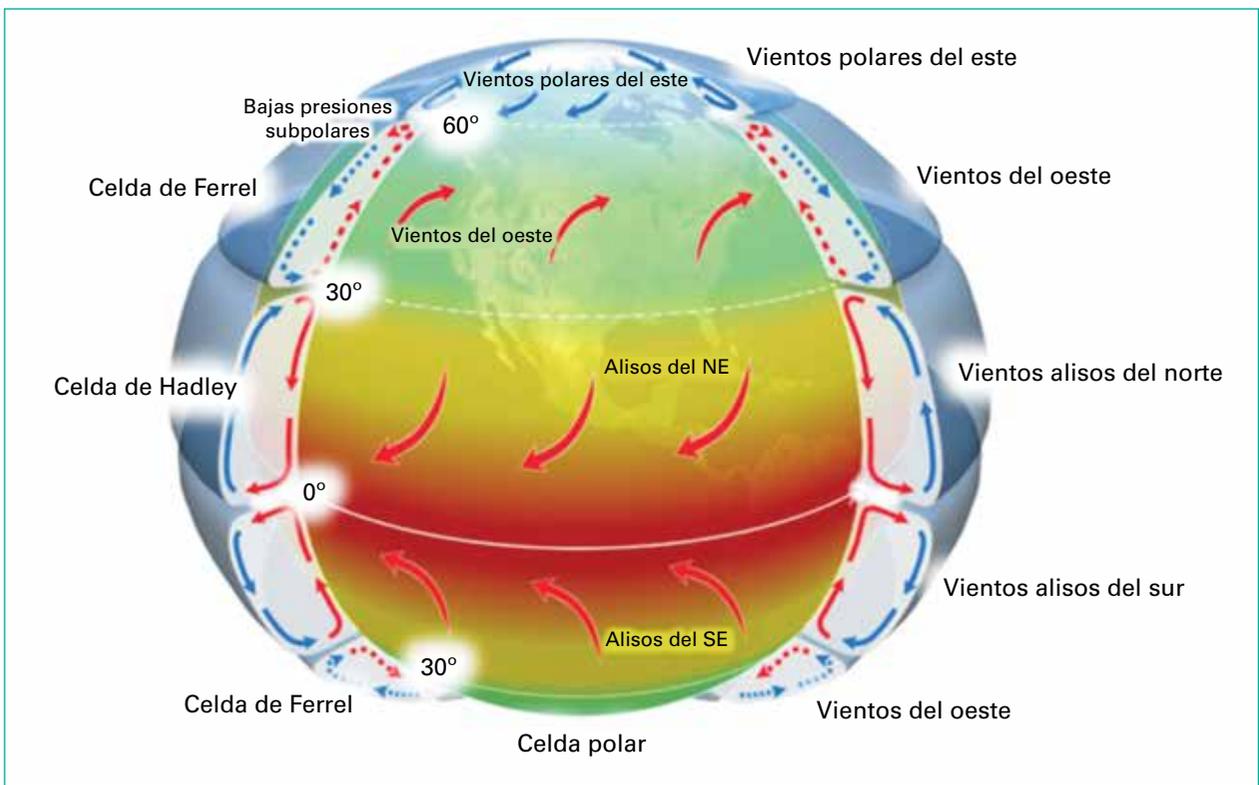


Figura 1. Circulación general de los vientos en la atmósfera.

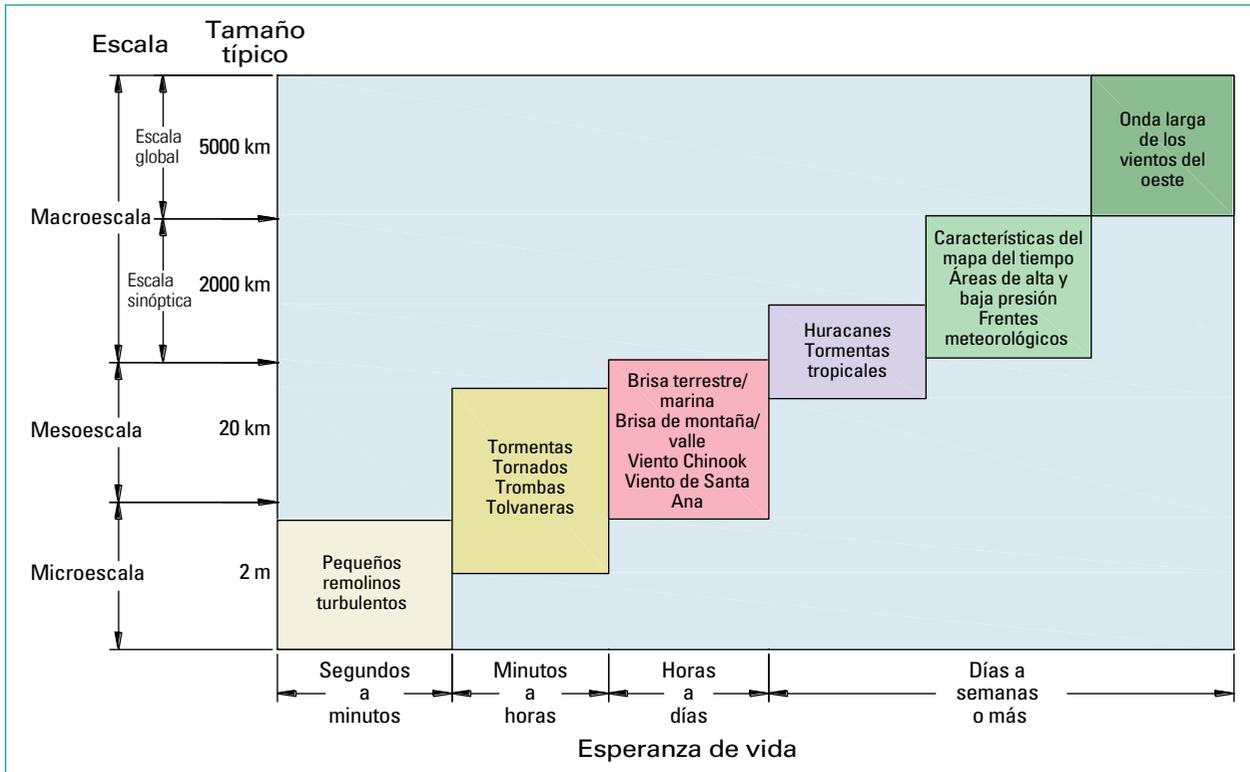


Figura 2. Escalas del movimiento en la atmósfera.

intermedias con respecto a las anteriores. La Figura 2 muestra en forma gráfica la dimensión y duración de la circulación en la atmósfera (Ahrens y Henson, 2016). Los diferentes fenómenos meteorológicos que ahí se presentan se denominan tormentas; cuando la velocidad del viento alcanza intensidades fuertes, éstas son las que amenazan a las poblaciones y las estructuras por su exposición.

Las tormentas severas en México

Como peligro o amenaza natural, el viento se caracteriza por múltiples parámetros climatológicos e hidrometeorológicos. Es necesario comprender las relaciones entre estos dos conjuntos de parámetros para desarrollar medidas de mitigación de los impactos que ocasionan los vientos fuertes.

De manera general, el viento es consecuencia de las diferencias en la presión atmosférica, atribuidas a la variación de la temperatura, la cual a su vez es producida por un desigual calentamiento por los rayos solares en las diversas zonas de la Tierra y de la atmósfera. La dirección del viento depende de la dis-

tribución y evolución de los centros de igual presión; el viento se desplaza de los centros de alta presión (anticiclones) hacia los de baja presión (depresiones) y su intensidad es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente de presiones. En su movimiento, el viento se ve alterado por diversos factores, tales como el relieve y la fuerza de Coriolis. A su vez, las diferencias de temperatura producen variaciones de densidad en el aire, por lo que éste se mueve para compensar las variaciones buscando el equilibrio. No obstante, el equilibrio nunca se alcanza, dado que continuamente se crean nuevas variaciones y, por lo tanto, el viento siempre existe, aunque en ocasiones es imperceptible. En la superficie, el viento viene definido por dos parámetros: la dirección en el plano horizontal y la intensidad de su velocidad.

Las tormentas que producen vientos fuertes se denominan tormentas severas, las cuales pueden generar daños materiales importantes, así como muertes. Las tormentas más comunes en México son:

- Vientos sinópticos o estacionales y tormentas.
- Ciclones tropicales.

- Tornados.
- Tormentas de corrientes descendentes.

A continuación, se describen las características más importantes de estas tormentas severas.

Vientos sinópticos y tormentas

Los vientos de tipo sinóptico más comunes en México son los vientos alisios. Esta palabra proviene del verbo latino *alis*, usada en el siglo XVIII por los franceses para expresar una naturaleza cordial, sensible, amable y de carácter liso. Los vientos alisios son aquellos que, aunque soplan de manera persistente y abundante, no en todo momento tienen la misma magnitud. Aunque no soplan de manera violenta, en algunos casos son más o menos extenuados y otras veces vigorosos, condición que dependerá de la estación del año y según la ubicación. En verano, los vientos alisios son más frecuentes e intensos que durante el invierno. Por lo regular, se desplazan entre los trópicos, de 30° a 35° de latitud con respecto al ecuador.

La dirección que toman estos tipos de vientos va desde las altas presiones subtropicales hacia las ba-

jas presiones ecuatoriales, por lo que los vientos alisios pertenecen a la circulación de Hadley, sistema mediante el cual se traslada el calor desde las regiones ecuatoriales con dirección a las zonas subtropicales, donde el aire caliente es reemplazado por uno más frío dentro de los espacios de las latitudes superiores. En el momento en que los vientos alisios se encontraran dentro de ambos hemisferios, se produciría una zona de convergencia intertropical, que es una región del globo terrestre donde interaccionan los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur.

Otro tipo de fenómeno meteorológico son las tormentas, que se caracterizan por la presencia de dos o más masas de aire que están a diferentes temperaturas. Este contraste térmico hace que la atmósfera se vuelva inestable y presente lluvias, vientos fuertes, relámpagos, truenos, rayos y a veces también granizo. Para que una tormenta se pueda formar es necesario que haya un sistema de baja presión cerca de otro de alta presión. El primero tendrá una temperatura baja, mientras que la del otro será cálida. Dicho contraste térmico y otras propiedades de las



masas de aire húmedo originan el desarrollo de movimientos ascendentes y descendentes que producen efectos como fuertes vientos y lluvias, sin olvidar las descargas eléctricas. Estos tipos de tormentas pertenecen a los complejos fenómenos convectivos de mesoescala, que son procesos de transporte producidos por el movimiento de un fluido, y se denominan tormentas severas cuando crean frentes de ráfagas de vientos intensos y peligrosos que pueden alcanzar los 95 km/h o más (Ahrens, 2012).

Ciclones tropicales

Los ciclones tropicales constituyen una clase especial de grandes sistemas de vientos y son tormentas de rápida rotación que se originan en los océanos tropicales, de donde extraen la energía necesaria para desarrollarse. Tienen un centro de baja presión y nubes que se desplazan en espiral hacia la pared que rodea al “ojo”, que es la parte central del sistema donde no hay nubes y las condiciones meteorológicas son, por lo general, tranquilas. Esta combinación notablemente complicada de procesos mecánicos, con procesos mixtos de temperatura y humedad, implica interacciones de los sistemas nubosos con los océanos y con las superficies terrestres sobre las que se mueven los ciclones tropicales.

Los ciclones tropicales se originan como resultado de un proceso de liberación de calor y humedad de los mares en las zonas tropicales y subtropicales. Un ciclón tropical es un sistema de tormenta no frontal que se caracteriza por un centro de baja presión, bandas de lluvia espiral y vientos fuertes; su giro es en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio sur y en sentido contrario en el hemisferio norte. Este fenómeno se produce cuando dos masas de aire de distintas características termodinámicas chocan; el espacio entre las dos masas de aire se llama sistema frontal. En el caso de un ciclón tropical, el sistema es alimentado por el calor liberado cuando el aire húmedo sube y el vapor de agua que contiene se condensa (sistema de tormenta de “núcleo caliente”). Para la generación o nacimiento de un ciclón tropical se requiere que la temperatura de la superficie del mar sea mayor a los 26 °C. Dependiendo de su ubicación y fuerza, los ciclones tropicales



se conocen como huracán (Atlántico occidental/Pacífico oriental), tifón (Pacífico occidental), ciclón (Pacífico meridional/océano Índico), tormenta tropical y depresión tropical (definida por la velocidad del viento) (Ahrens, 2012).

Tornados

Un tornado es una columna de aire que gira rápidamente formando un vórtice y sopla alrededor de un área pequeña de baja presión intensa con una circulación que llega al suelo. Es la perturbación atmosférica más violenta en forma de vórtice, resultado de una gran inestabilidad, provocada por un fuerte descenso de la presión en el centro del fenómeno y fuertes vientos que circulan alrededor. La circulación de un tornado está presente en el suelo como una nube en forma de embudo o como una nube de polvo o escombros. También existen vórtices de gran intensidad que se generan en el mar y son conocidos como trombas marinas.

Un tornado es la tormenta de viento más destructiva. Alcanza diámetros típicamente del orden de 300 m y se mueve con respecto al suelo con velocidades del orden de 30 a 100 km/h, en una distancia



de aproximadamente 15 hasta 50 km de largo antes de disiparse, por lo que se abre paso en un camino largo y estrecho de destrucción. Dependiendo del nivel de daños que producen los tornados, se han definido las escalas de Fujita y Fujita Mejorada (Ahrens, 2012), que ahora es la más utilizada.

Tormentas de corrientes descendentes

Otro tipo de tormentas severas que se han presentado en México, conocidas como chaparrón o reventón, son las corrientes de viento descendentes intempestivas. En inglés son denominadas *downburst*; cuando la extensión de los vientos alcanza hasta 4 km, dichas tormentas son llamadas *microburst*; si sobrepasan los 4 km se conocen como *macroburst*. Este tipo de tormentas se caracterizan por un descenso repentino de viento, lluvia y granizo; es decir, generan un movimiento descendente a muy alta velocidad de aire turbulento, en un área limitada, por un corto tiempo. Cerca del suelo se extienden desde su centro con altas velocidades horizontales. Los frentes de ráfagas que generan estas tormentas pueden ser tan intensos que llegan a tirar árboles, destruir anuncios, desprender cubiertas y causar da-

ños en estructuras; además, han sido la causa de varios accidentes aéreos (Ahrens, 2012).

■ Impactos en la infraestructura por tormentas severas

■ Un fenómeno natural es un cambio de la naturaleza que sucede por sí solo sin intervención directa antropogénica; por ello, los desastres no son naturales, pero los fenómenos sí lo son. Los desastres siempre se presentan por la actividad humana en el entorno.

En los últimos 35 años, en el mundo se ha mostrado un incremento sostenido de las pérdidas materiales y humanas debido a los efectos de fenómenos hidrológicos, hidrometeorológicos y climáticos. Dichas pérdidas están asociadas a la mayor incidencia y duración de eventos hidrometeorológicos y climáticos extremos (EHCE) y representan una amenaza para la sustentabilidad, tanto de las actividades humanas como de los ecosistemas. La creciente incidencia de los EHCE se ha atribuido al aumento de la temperatura y variabilidad de la precipitación, en respuesta al incremento de los gases de invernadero en la atmósfera (IPCC, 2014). Como elemento cen-

tral en la identificación de la influencia de los EHCE, se encuentra el efecto que estos fenómenos tienen en la infraestructura de una localidad, región o país. Dicha infraestructura es comúnmente representada por obras civiles, pero también incluye los recursos hídricos, agrícolas, energéticos y medioambientales.

En América Latina, de acuerdo con un análisis de la Comisión Económica para América Latina (Bello y cols., 2014), entre 1972 y 2010, de 88 desastres registrados en 28 países, se estimó que el costo total (costos de daños más costos de pérdidas) alcanzó los 213 000 millones de dólares (a precios de 2000), mientras que las muertes llegaron a 309 742 y se registraron 30 millones de personas afectadas. En México, el costo total de los cinco mayores desastres de carácter climatológico ascendió a 3 754 millones de dólares. En el sector de infraestructura, las pérdidas sumaron 601 millones de dólares, y se estima que en el subsector de energía los daños representaron 66% del costo de daños de infraestructura en todo México. En el sector productivo las pérdidas fueron de 1 443 millones de dólares, y para el subsector agropecuario se estiman en 17% del costo de pérdidas en el sector productivo. El claro incremento en los costos de los desastres evidencia la necesidad de cambiar las estrategias sobre el manejo de la infraestructura; para mayor información, este tipo de análisis estadísticos de los desastres que han ocurrido en el mundo son presentados por Guha y cols., 2016.

Alberto López López

Consultor.

alberto.lopp136@gmail.com

David de León Escobedo

Universidad Autónoma del Estado de México.

daviddeloneescobedo@yahoo.com.mx

Referencias específicas

- Ahrens, C. D. (2012), *Essentials of Meteorology: An invitation to the atmosphere*, 6.ª ed., Boston, Brooks/Cole Cengage Learning.
- Ahrens, C. D. y R. Henson (2016), *An introduction to weather, climate, and the environment*, 11.ª ed., Boston, Cengage Learning.
- Bello, O., L. Ortiz y J. L. Samaniego (2014), *La estimación de los efectos de los desastres en América Latina, 1927-2019*, serie Medio Ambiente, vol. 157, Santiago de Chile, CEPAL.
- Guha Sapid, D., R. B. Femke Vos y S. Ponserre (2016), *Annual Disaster Statistical Review 2016, The numbers and trends*, Lovaina la Nueva, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)-Institute of Health and Society (IRSS)-Université Catholique de Louvain - Brussels.
- IPCC (2014), *Assessment Report 5*, Ginebra, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jáuregui, O. E. (1969), "Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera", *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, II:209-236.



Cecilia Izcapa Treviño, Juana Lorena Mora Fonseca y Marco Antonio Salazar Gutiérrez

Accidentes por sustancias peligrosas en la industria

En casi todas las industrias se emplea una gran cantidad de sustancias químicas; sin embargo, cuando son manejadas sin contar con las medidas de seguridad adecuadas, pueden ocurrir accidentes que causen daños a la salud humana, al ambiente y a los bienes materiales. Por lo tanto, es importante analizarlos, determinar sus causas, establecer los eventos más frecuentes e identificar las sustancias que están involucradas.

Introducción

Las sustancias químicas contribuyen a mejorar la calidad de vida de la población, ya que se aprovechan en todos los ámbitos de la actividad humana. Su uso es generalizado en casi cualquier industria y en los procesos de manufactura. En México, el constante incremento de la actividad industrial, comercial y de servicios, por lo general, implica un aumento en el uso, almacenamiento y transporte de sustancias químicas, muchas de las cuales son peligrosas debido a que poseen características de toxicidad, inflamabilidad, explosividad, corrosividad y reactividad. En caso de que ocurra un accidente en el que se liberen estas sustancias, pueden generarse efectos nocivos para la salud humana, el ambiente y los bienes materiales.

Los eventos que pueden presentarse en un accidente son: fuga, derrame, incendio y explosión; éstos pueden ocurrir de manera aislada, simultánea o secuencial, y –además– tener distintos grados de severidad, dependiendo principalmente de las propiedades de las sustancias involucradas y de sus cantidades. Una fuga es la liberación de una sustancia en estado gaseoso (por ejemplo, gas LP); se presenta cuando hay un cambio de presión a la que está sometida la sustancia debido a la ruptura del recipiente que la contiene o de la tubería que la conduce. Por otra parte, un derrame es el escape de una sustancia que se encuentra dentro de un recipiente ya sea en estado líquido o sólido. En cambio, el incendio es un fuego que se manifiesta con desprendimiento de luz, calor, humo y gases. Por último, una explosión es la liberación repentina y violenta de energía en un tiempo muy corto.

A continuación, analizamos los accidentes industriales ocurridos en México entre 2003 y 2018, en lo correspondiente a su distribución en las entidades federativas, los tipos de eventos, las sustancias involucradas y las causas que los produjeron.

■ Registro de accidentes

■ En el periodo de 2003 a 2018 se registraron en total 1 155 accidentes en las industrias del país. Este registro fue elaborado a partir de los reportes de casos relevantes, proporcionados por el Centro de Comunicación y Operación de la Dirección General de Protección Civil del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), así como de noticias

publicadas en medios electrónicos digitales. Cabe señalar que no se incluyen los accidentes ocurridos en el transporte terrestre ni por las tomas clandestinas en ductos.

La Figura 1 muestra el porcentaje de accidentes para cada una de las entidades federativas del país. Las 10 que tuvieron el mayor número de accidentes industriales fueron, en orden: Veracruz, Estado de México, Guanajuato, Jalisco, Ciudad de México, Nuevo León, Tamaulipas, Sonora, Coahuila y Tabasco. En dichos estados se registraron 768 accidentes, que representan 66.50% del total; esto es lógico considerando que en ellos se concentra la mayor actividad industrial del país.

Del total de accidentes industriales, el evento que ocurrió en el mayor número de ocasiones fue el incendio, con 489 casos (42.34%), seguido de la fuga, con 238 (20.61%). En menor número se registró la combinación de explosión e incendio, con 53 accidentes (4.59%), como se observa en la Figura 2.

Por otra parte, la Figura 3 muestra las principales sustancias químicas peligrosas que estuvieron involucradas en los accidentes ocurridos durante el periodo estudiado. Éstas son: amoniaco, crudo (petróleo), gas natural, gasolina, gas LP, pirotecnia, diésel, ácido clorhídrico, solventes, combustóleo, y cloro, que representan 45.24% del total; el restante 54.76% corresponde a diversas sustancias, como



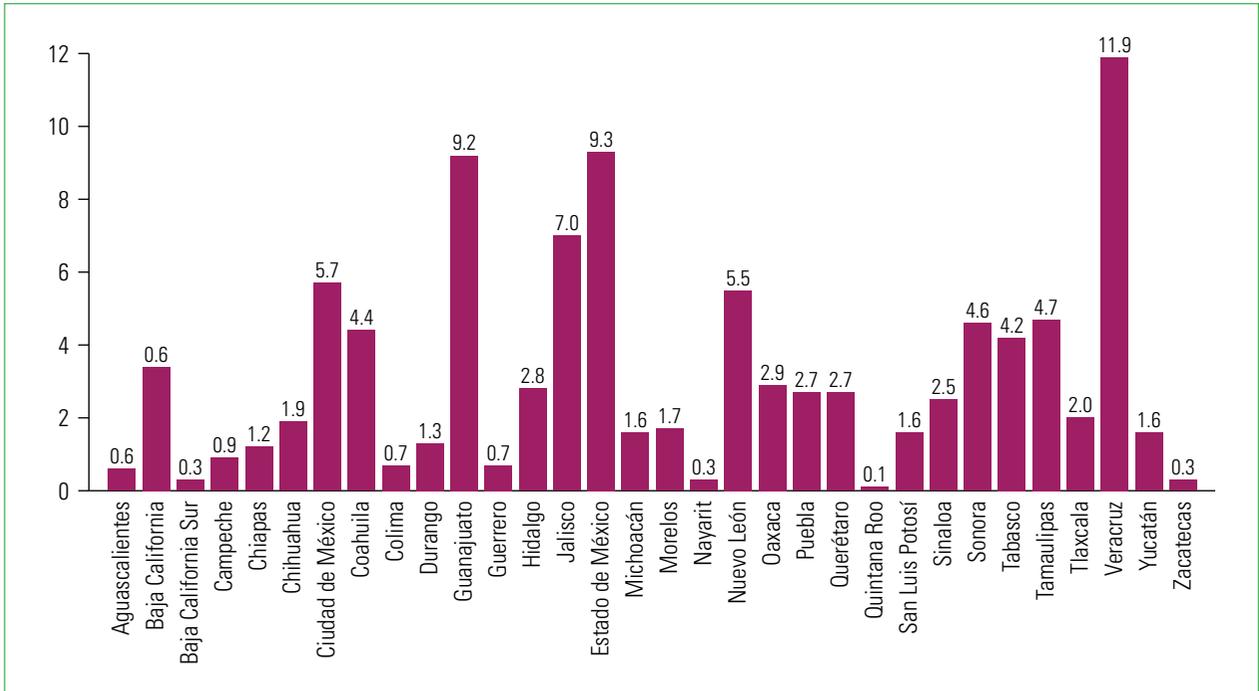


Figura 1. Porcentajes de los accidentes en la industria relacionados con el manejo de sustancias químicas peligrosas, entre 2003 y 2018, por estado.

el ácido sulfúrico, peróxido de hidrógeno y aceites, entre otros.

Causas de accidentes

Los accidentes son hechos no planeados ni controlados, por lo que pueden tener muy diversas causas. El error humano se define como la ejecución incorrecta o inapropiada al desempeñar una acción; en tanto, la falla de equipo se refiere al desempeño inadecuado de los instrumentos utilizados y se atribuye principalmente a la ausencia de mantenimiento. Sin embargo, en algunos casos es imposible conocer las causas o éstas son por la combinación de diferentes factores.

En el análisis realizado (véase la Figura 4), identificamos que los accidentes industriales se deben al error humano (con 13.33%) y a la falla en equipo (14.03%). La categoría de otras causas (16.19%) incluye: fenómenos naturales, corto circuito, falla en el proceso, acción intencional, entre otras. También cabe resaltar que para más de la mitad de los accidentes industriales (56.45%) se desconoce qué los originó. En México se realiza muy poca investigación de los accidentes, o bien, cuando sí se lleva a cabo, no se hace público el resultado por diferentes razones.

Conclusiones

Prácticamente todos los productos de uso cotidiano dependen en mayor o menor medida de la actividad industrial. En estos procesos, las sustancias químicas son transportadas, almacenadas y manipuladas en instalaciones industriales que implican la posibilidad de que ocurran accidentes, sin que esto pueda ser eliminado por completo.

En el análisis de los accidentes industriales ocurridos en México entre 2003 y 2018 observamos que

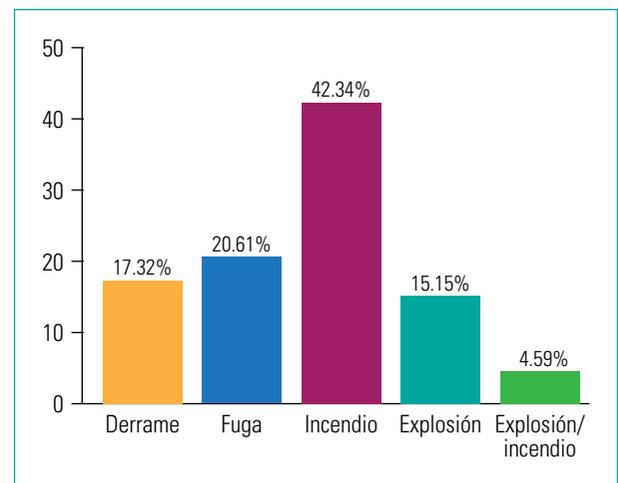


Figura 2. Porcentajes de los eventos registrados en instalaciones industriales en el país, de 2003 a 2018.

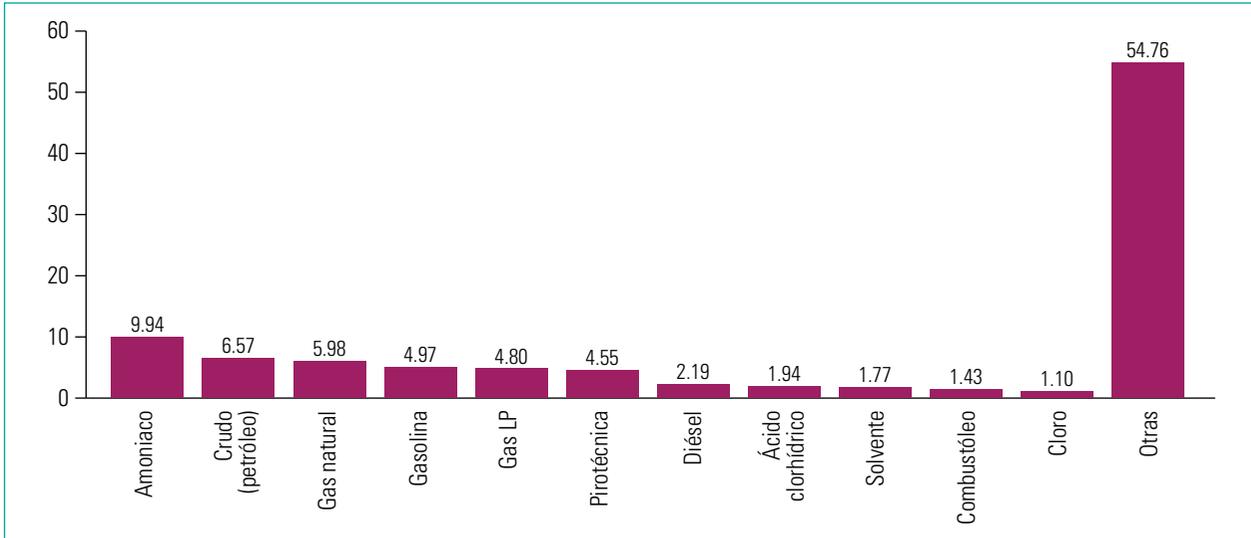


Figura 3. Porcentajes de las sustancias químicas peligrosas involucradas en los accidentes industriales ocurridos en 2003-2018.

un alto porcentaje (66.50%) se concentra en los estados con la mayor actividad industrial. El evento que ocurre con mayor frecuencia es el incendio, seguido de la fuga y del derrame, en los cuales principalmente están involucrados líquidos y gases inflamables, aunque para el caso de las explosiones se identificaron de manera significativa los artificios pirotécnicos. Con respecto a las causas de los accidentes, se determinó que las principales son el error humano y la falla de equipo.

Considerando lo anterior, para reducir el número de accidentes, es indispensable tener una mayor

efectividad en la aplicación de los controles y las medidas de seguridad en las instalaciones, procesos, procedimientos y actividades industriales. Además, se debe incrementar y mejorar la capacitación del personal para incidir sobre los factores que hacen que sea el error humano una de las principales causas de los accidentes. Otro aspecto importante es que en las instalaciones industriales se lleven a cabo acciones de mantenimiento preventivo para evitar la falla de los equipos, y así disminuir el número de accidentes. Por último, las consecuencias de un posible accidente también pueden reducirse mediante la planeación y la preparación, en este caso, con un enfoque en el desarrollo de planes y procedimientos de emergencia.

Cecilia Izcapa Treviño

Centro Nacional de Prevención de Desastres.
cit@cenapred.unam.mx

Juana Lorena Mora Fonseca

Centro Nacional de Prevención de Desastres.
jlmoraf@cenapred.unam.mx

Marco Antonio Salazar Gutiérrez

Centro Nacional de Prevención de Desastres.
masalazar@cenapred.unam.mx

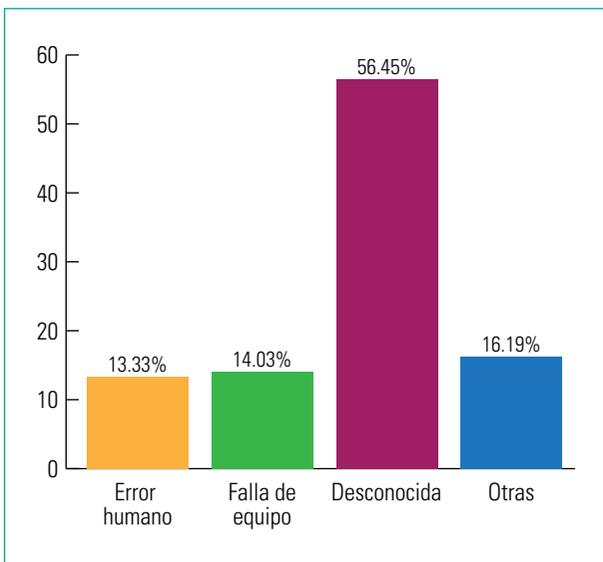


Figura 4. Porcentajes de las causas de los accidentes industriales, de 2003 a 2018.

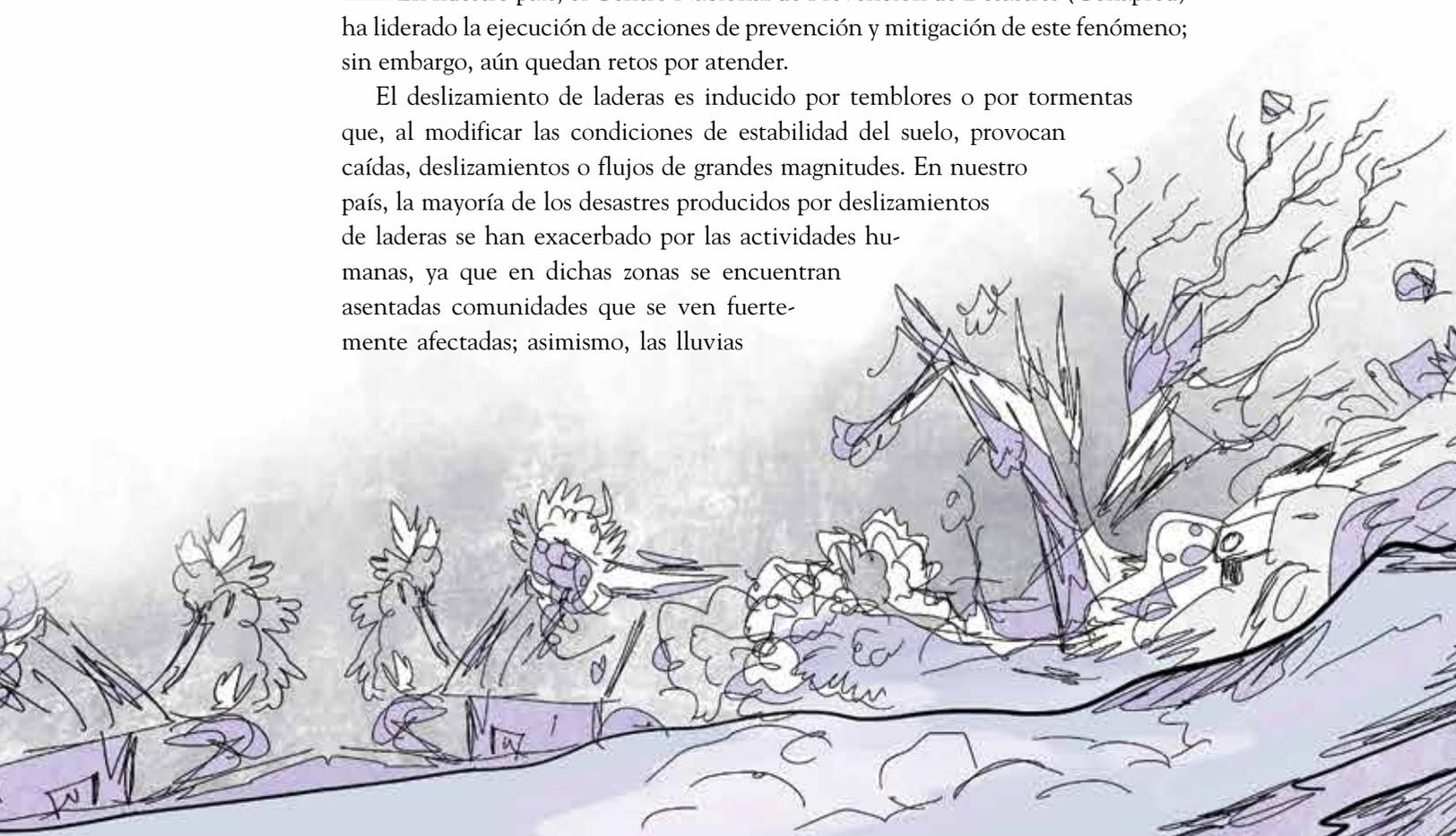
Comunidades amenazadas por deslizamiento de laderas

En este artículo se presentan algunos avances y retos con respecto a la protección y la resiliencia de las comunidades susceptibles de experimentar desastres por el deslizamiento de laderas. Asimismo, se analiza el fenómeno a partir de la mecánica y las herramientas que se han desarrollado para predecirlo, sobre todo, ante la presencia de lluvias intensas. Se incluyen recomendaciones de protección civil para las comunidades amenazadas.

Presentación

La inestabilidad de las laderas ha producido graves desastres tanto en México como en otros países, con pérdidas humanas y daños materiales cuantiosos. En nuestro país, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) ha liderado la ejecución de acciones de prevención y mitigación de este fenómeno; sin embargo, aún quedan retos por atender.

El deslizamiento de laderas es inducido por temblores o por tormentas que, al modificar las condiciones de estabilidad del suelo, provocan caídas, deslizamientos o flujos de grandes magnitudes. En nuestro país, la mayoría de los desastres producidos por deslizamientos de laderas se han exacerbado por las actividades humanas, ya que en dichas zonas se encuentran asentadas comunidades que se ven fuertemente afectadas; asimismo, las lluvias



intensas, en ocasiones asociadas con huracanes, provocan cambios rápidos que debilitan la estructura resistente del suelo, lo que desemboca, en poco tiempo, en el movimiento de la masa de suelo que previamente se encontraba en la ladera. Cuando la masa de suelo es grande y cuando el movimiento encuentra o termina de crear un **cauce** suficiente, se inicia un flujo que, dependiendo de la pendiente, adquiere una velocidad que puede resultar en el arrastre de cascajo y otros objetos, así como en la destrucción de viviendas a su paso, por lo que, en muchas ocasiones, pierden la vida las personas ubicadas en las cercanías de la ladera o en el paso del flujo con los objetos arrastrados.



Cauce
Concavidad del terreno, natural o artificial, por donde corre una corriente de agua.

Antecedentes

Todos los años en las zonas montañosas de México ocurren numerosos casos de inestabilidad de las laderas que, en ocasiones, llegan a afectar de manera muy severa a las comunidades y vías de comunicación. Históricamente, los estados de Puebla, Guerrero, Veracruz, Oaxaca y Chiapas son donde más casos de inestabilidad de laderas se han presentado. Ello se debe a varios factores de carácter geológico, geotécnico, geomorfológico, climático y antropogénico; un aspecto importante también es su ubicación geográfica, ya que grandes extensiones de sus territorios se encuentran en las vertientes del golfo de México y del Pacífico, por lo que están expuestos al embate de ciclones tropicales y frentes fríos. Por lo tanto, no es raro que sean dichos estados los que más recursos han ejercido del Fondo de Desastres Naturales (Fonden), mediante solicitudes de declaratorias de emergencia o de desastre.

Muchos deslizamientos en México han impactado de manera importante a la población, en su mayoría detonados por lluvias intensas y prolongadas, aunque no se descarta la influencia de la actividad humana en estos casos, debido a cortes, excavaciones, sobrecargas, deforestación, fugas de agua, etcétera. Por otra parte, desde hace algunas décadas se ha planteado que el cambio climático aumentará de forma considerable las precipitaciones, por lo que es

factible que también se incrementen los eventos de deslizamiento de laderas.

Entre los casos más relevantes que se han documentado en el país durante los últimos 30 años, ya sea por las pérdidas humanas que ocasionaron, por los daños materiales que produjeron o por la masa de suelo que se deslizó, se encuentran los flujos de lodo, rocas y escombros acontecidos en Acapulco, Guerrero (véase Figura 1), la madrugada del 9 de octubre de 1997, debido a las lluvias generadas por el huracán Paulina. Además de cuantiosas pérdidas económicas, dejaron un saldo de alrededor de 147 personas fallecidas, 41 desaparecidas y miles de damnificadas (Bitrán, 2001; Villegas, 2005). Dos años después, el 5 de octubre de 1999, un temporal de lluvias muy intensas, generadas por la interacción de la depresión tropical núm. 11 y el frente frío núm. 5, detonó un deslizamiento y flujo de suelos, rocas, árboles y escombros en la ladera noreste de la ciudad de Teziutlán, en Puebla, de alrededor de 7 000 m³ (véase la Figura 2), lo que cobró la vida de 110 personas (Mendoza y Noriega, 1999).



Figura 1. Flujos de roca y escombros detonados por las lluvias intensas generadas por el huracán Paulina, en Acapulco, Guerrero, el 9 de octubre de 1997 (tomada de: <https://www.el-soldeacapulco.com.mx/local/a-21-anos-del-huracan-pauline-acapulco-aniversario-guerrero-lluvias-1112841.html>).

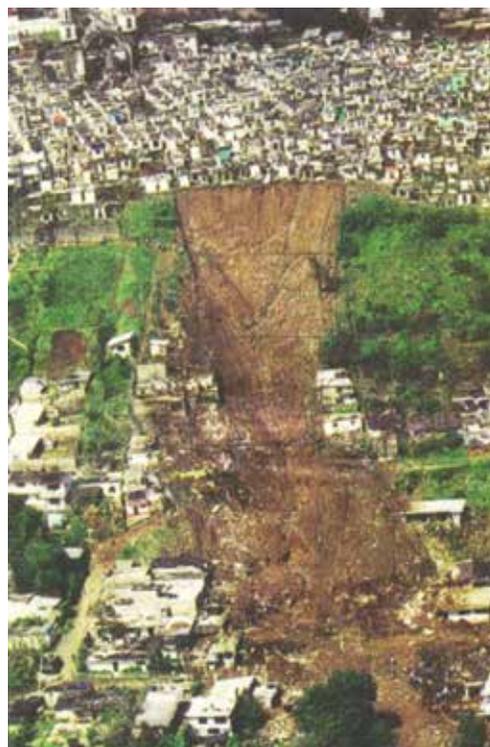


Figura 2. Deslizamiento y flujos de suelos y escombros detonados por las lluvias generadas por la depresión tropical núm. 11 y el frente frío núm. 5 en la ciudad de Teziutlán, Puebla, el 5 de octubre de 1999 (Mendoza y Noriega, 1999).

Algunos años después, tras un temporal de lluvias intensas acaecidas a finales de octubre y principios de noviembre de 2007, debido a los frentes fríos núm. 4 y núm. 5, que originaron una de las peores inundaciones en Tabasco, se produjo un megadeslizamiento y caída de rocas de aproximadamente 55 millones de metros cúbicos. En un instante se obstruyó el cauce del río Grijalva, que en ese punto tenía aproximadamente 280 m de ancho y 25 m de profundidad, a la altura del poblado Juan de Grijalva (véase la Figura 3), perteneciente al municipio de Ostuacán, en Chiapas. Si bien las lluvias fueron extraordinarias, de alrededor de 1 000 mm entre el 28 y el 30 de octubre, el día en que sucedió el deslizamiento, el 4 de noviembre de 2007, no estaba lloviendo, por lo que el evento fue atribuido a la combinación de factores geológicos, geotécnicos e hidrológicos.

Más recientemente, tras las fuertes lluvias producidas por la interacción de los huracanes Ingrid, en el Atlántico, y Manuel, en el Pacífico, en la segunda semana de septiembre de 2013, se presentaron cientos de deslizamientos de diferente magnitud (con volúmenes de algunos metros hasta miles de metros cúbicos) en los estados de Oaxaca, Veracruz y Guerrero. El más destructivo ocurrió el 16 de septiembre, de aproximadamente 25 000 m³ (véase la Figura 4), que sepultó a poco más de un tercio de la comunidad La Pintada, municipio de Atoyac de Álvarez, en Guerrero, y provocó la muerte de 71 personas (Domínguez y cols., 2014).

En México, por medio de las declaratorias de emergencia y de desastre del Fonden, así como de las solicitudes de apoyo del Sistema Nacional de Protección Civil (Sinaproc), el Cenapred ha desarrollado un procedimiento estandarizado de acopio de información y de estudio de casos que se convierten en desastres (Domínguez y cols., 2015), para integrar una base de datos no sólo de los efectos producidos por dichos fenómenos, sino también de las causas que los detonaron. La información disponible se limita a los casos de mayor trascendencia que requieren de la asistencia técnica de especialistas y la aplicación de recursos por parte de los municipios, los estados o la federación. Es por ello que otros fenómenos de igual o menor impacto que no son reportados por



Figura 3. Deslizamiento y caída de roca en la margen derecha del río Grijalva, sucedido el 4 de noviembre de 2007, a la altura de la comunidad Juan de Grijalva, municipio de Ostuacán, Chiapas.



Figura 4. Deslizamiento y flujos de lodo, rocas y escombros detonados por las lluvias intensas debidas a la interacción de los huracanes Ingrid y Manuel, en septiembre de 2013.

los municipios, estados o dependencias del gobierno, como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), no figuran en los registros del Cenapred (Domínguez y cols., 2015).

Antecedentes en otros países

En el mundo, son varios y variados los casos de inestabilidad de laderas que se han documentado, por lo que, para fines ilustrativos, mencionaremos aquéllos de mayor impacto, según los mismos factores considerados en el resumen nacional.

De acuerdo con los registros del Servicio Geológico de Estados Unidos de América,¹ entre los deslizamientos más catastróficos del siglo XX está el sucedido en la zona central de Tayikistán (antes

¹ Véase: <www.usgs.gov/natural-hazards/landslide-hazards>.

URSS), el 10 de julio de 1949, cuando un sismo de magnitud 7.5 detonó cientos de deslizamientos que causaron la pérdida de alrededor de 20 000 vidas humanas (Wesson y Wesson, 1975). El caso más relevante se presentó en la provincia de Khait (véase la Figura 5), donde se registraron dos derrumbes que se convirtieron en un masivo flujo de rocas, suelos y arenas (**loess**) que arrasaron dos comunidades y cobraron la vida de aproximadamente 4 000 personas (Evans y cols., 2009).

Loess
Material sedimentario formado sobre todo por polvo muy fino de roca arcillosa o calcárea.

Un caso similar se registró en el poblado de Yungay, departamento de Áncash, Perú, tras un terremoto de magnitud 7.7, sucedido el 31 de mayo de 1971, que originó decenas de deslizamientos y derrumbes. El más devastador ocurrió en el flanco norte del Nevado de Huascarán, el cual generó una avalancha de rocas, hielo y nieve que impactó a las comunidades de Yungay y Ranrahirca (véase la Figura 6) y provocó la pérdida de alrededor de 25 000 vidas humanas (Cluff, 1971).



Figura 5. Vista panorámica del derrumbe y flujo de suelos y rocas detonado por el sismo de magnitud 7.5, el 10 de julio de 1949, que impactó a las localidades de Khait y Khisorak. Fotografías tomadas desde el lado opuesto del río Obi-Kabud, donde se aprecia el depósito de materiales producido por el deslizamiento.



Figura 6. Imagen panorámica y esquema del área afectada por la avalancha y el flujo de detritos detonados por el sismo de 7.7, el 31 de mayo de 1971 (Cluff, 1971).

Por otra parte, en 2010 se presentó un deslizamiento en Italia que, aunque no generó decesos, provocó que 2 300 personas tuvieran que ser evacuadas (Figura 7). Las lluvias intensas y la estructura geológica fueron factores que desembocaron en el deslizamiento (John, 2010). Asimismo, en 2019, ocurrió un deslizamiento en Bolivia que dejó tres desaparecidos y más de 40 casas destruidas (Figura 8). Las fuer-



Figura 7. Vista aérea del deslizamiento en Maierato, Italia, en 2010, desde el este.



Figura 8. Deslizamiento en Bolivia, 2019 (tomada de: <https://twitter.com/mindefbolivia/status/112333768317722144/photo/2>).

tes lluvias detonaron el deslizamiento del terreno y de las viviendas que, al parecer, fueron construidas sobre un relleno de basura, que también se deslizó (Strange, 2019).

La física del problema

Una ladera o un **talud** se vuelven inestables cuando se rompe o se pierde el equilibrio de una porción de los materiales que los componen (suelo, roca y vegetación). Las causas de esto son variadas y dependen de factores tanto naturales como humanos, por lo que anticipar su ocurrencia es una tarea compleja y difícil de determinar.

En 1776 Charles A. Coulomb hizo uno de los primeros intentos para modelar matemáticamente el comportamiento mecánico de una ladera o un talud. A partir de los principios básicos de la resistencia de materiales y del entendimiento de la forma en que suceden las fallas en las excavaciones y **terraplenes**, postuló que la falla del terreno obedece a fuerzas que se desarrollan en la potencial superficie de falla o de deslizamiento. De esta manera, propuso que la resistencia de los suelos en el momento de la falla podría representarse mediante la siguiente ecuación: $\tau = c + \sigma \tan \phi$, donde τ es la resistencia al **esfuerzo cortante** de los suelos; c es la cohesión de los suelos o rocas; σ es la presión efectiva en la potencial superficie de falla, y ϕ es el ángulo de fricción entre las partículas de suelos o rocas.

Posteriormente, tomando como base los conceptos de resistencia al esfuerzo cortante de Coulomb y la definición de Wolmar Fellenius del factor de seguridad (FS, véase más adelante), en 1950 Karl Terzagui concluyó que la falla de laderas y taludes se debía a dos factores fundamentales: internos o condicionantes y externos o desencadenantes; estos factores están relacionados, directa o indirectamente, con los esfuerzos cortantes actuantes y resistentes que se desarrollan en la potencial superficie de falla o de deslizamiento.

Los factores internos dependen del origen y de las propiedades de los suelos que componen la ladera, así como de su distribución espacial y, de manera muy particular, de la presencia de agua, la cual ejerce

presiones positivas o negativas dentro de la masa de suelo; las presiones positivas provocan una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos y rocas. El agua, ya sea por lluvias o cualquier otra fuente, es la principal causa de la disminución de la resistencia de los suelos en la potencial superficie de falla (Mendoza y Domínguez, 2006).

De acuerdo con Karl Terzagui, los factores externos son aquellos sistemas ajenos a la ladera que perturban su estabilidad; esto se debe a que usualmente producen un incremento de los esfuerzos cortantes actuantes, aunque de manera indirecta pueden provocar un cambio en la resistencia al esfuerzo cortante del material que compone el talud. Los factores externos son originados ya sea por fenómenos naturales, tales como las lluvias intensas y prolongadas, como por sismos fuertes y la actividad volcánica, o bien por las actividades humanas (Mendoza y Domínguez, 2006).

Según los registros históricos, la principal causa de los deslizamientos en México es la lluvia, por el efecto que tiene en la saturación del terreno, en el aumento del peso volumétrico del suelo y, de manera más trascendente, en la reducción de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos (por efecto de la **presión de poro**). Por lo tanto, el monitoreo de las precipitaciones resulta trascendental para conocer la intensidad o la cantidad de lluvia acumulada que se requiere para que en una zona o región determinada se detone un deslizamiento. Los valores límite o máximos de lluvia que originan deslizamientos son conocidos como umbrales; su determinación, a partir de casos documentados, es de gran relevancia para fines de prevención de desastres relacionados con este tipo de fenómenos.

Al respecto, la forma más simple de estimar los aspectos que intervienen en el grado de estabilidad de una ladera descansa en el concepto de factor de seguridad (FS), propuesto en 1922 por Wolmar Fellenius. Este parámetro adimensional resulta de dividir las fuerzas que se oponen a la falla de la ladera o talud –también conocidas como fuerzas resistentes (F_R)– entre las que tienden a producir la falla –conocidas como actuantes (F_A)–. Matemáticamente, se representan mediante la ecuación:

Talud

Inclinación o pendiente del terreno; puede ser natural o formado por el ser humano.

Terraplenes

Volúmenes de tierra con los que se rellena un terreno para levantar su nivel.

Presión de poro

Presión que ejerce el agua subterránea atrapada en el suelo o en la roca.

Esfuerzo cortante

Esfuerzo interno de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico.

$$FS = \frac{F_R}{F_A}$$

Las F_R se determinan a partir de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos o de las rocas que componen las laderas (véase la Figura 9a). Por su parte, las F_A dependen principalmente del peso de los materiales que componen la ladera, así como de sus características geométricas y volumétricas. También influye el peso de las construcciones y cualquier sobrecarga adicional impuesta por las actividades humanas o por acciones dinámicas, como las producidas por eventos sísmicos (véase la Figura 9b). Ambos factores pueden ser modificados por la presencia o ausencia de agua contenida en los poros del subsuelo.

Para determinar los valores de las F_R se requieren estudios puntuales de mecánica de suelos y pruebas geotécnicas de campo con extracción de muestras de suelo; además, se debe llevar a cabo el levantamiento topográfico del terreno y la medición de la presión de poro en el sitio determinado. La resistencia al esfuerzo cortante de los suelos depende principalmente de las condiciones geológicas y climáticas de una región, lo cual varía en el espacio y en el tiempo. Como hemos mencionado, las F_R se pueden determinar mediante pruebas de campo o de laboratorio, en tanto que las F_A por peso propio y por cargas aplicadas se determinan con suficiente precisión a partir de las condiciones geométricas y pesos volumétricos. Con esta información es posible realizar análisis cuantitativos de

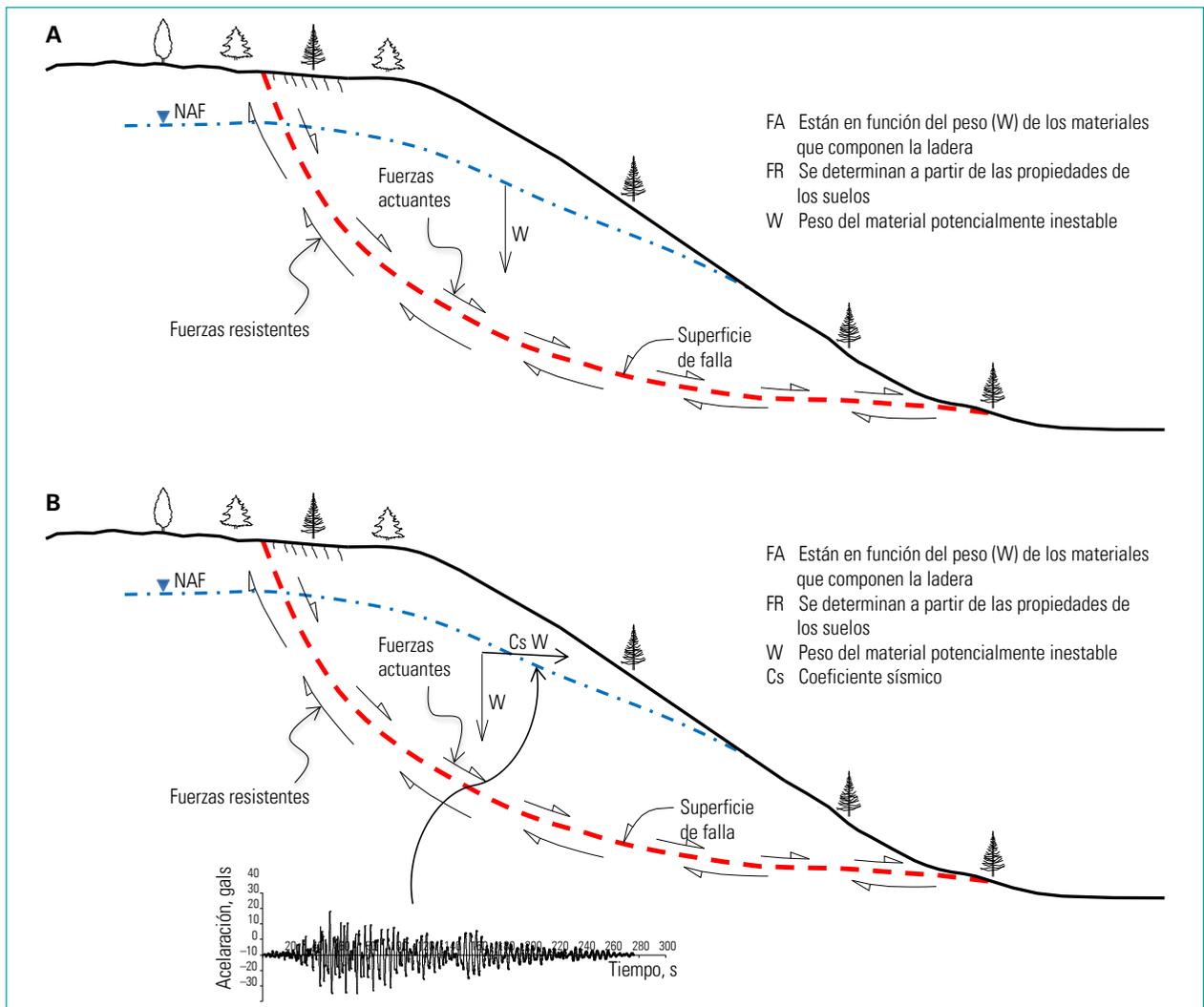


Figura 9. Ilustración de la mecánica de deslizamientos.

estabilidad, en los que se determina el FS global para cada caso.

En el Cenapred se desarrollaron diversos trabajos que han derivado en acciones para identificar, prevenir y mitigar las posibles causas de los deslizamientos en diferentes lugares de México, así como para prevenir a las personas y a las autoridades para que puedan implementar estrategias con el objetivo de salvaguardar sus vidas y pertenencias.

Aspectos esenciales de la mitigación y la prevención

Modelos y métodos para analizar la inestabilidad de las laderas (sin incertidumbre)

Si bien los eventos naturales como los sismos y las lluvias son inevitables, su impacto se convierte en un desastre cuando la población no está preparada para enfrentarlos o reducirlos. La estabilización de laderas o de taludes es una práctica muy frecuente en la construcción de caminos, carreteras, líneas de transmisión, túneles, puentes y desarrollos habitacionales. Su consideración debe influir en la viabilidad de proyectos constructivos e inversiones, a partir de lo que determinen las personas especialistas en geología, geotecnia, geomorfología, geofísica, topografía y otras disciplinas de las ciencias de la tierra. Gracias al desarrollo de la tecnología, el diseño de obras y los análisis de estabilidad se han facilitado; sin embargo, la selección del método o métodos de estabilización o de reforzamiento requiere del conocimiento a profundidad de la física del problema, así como la comprensión de las causas y las variables que intervienen en los procesos de inestabilidad.

A partir de la definición del concepto de factor de seguridad, pero ahora en términos de la resistencia media al esfuerzo cortante (τ_f) y el esfuerzo cortante medio (τ) que actúa en la potencial superficie de falla, se estableció la siguiente ecuación: $FS = \tau_f / \tau = \text{fuerzas resistentes} / \text{fuerzas actuantes}$. Por lo tanto, para que una ladera falle, es necesario que $\tau_f = \tau$, por lo que $FS = 1$. Cuando más aumenta τ o disminuye τ_f , las posibilidades de que se presente la falla de una ladera se incrementan.

Por lo tanto, las obras de mitigación o de estabilización que se deben implementar en las laderas y los taludes deben buscar aumentar las fuerzas resistentes, o bien disminuir las fuerzas actuantes. Para ello, se recurre a métodos de análisis para modelar cada técnica y, luego de un análisis costo-beneficio, establecer cuál es la mejor técnica de estabilización para determinados tipos de suelos, morfología del terreno y factores externos que tienden a producir la falla.

Impacto de las incertidumbres

Otro aspecto que agrega complejidad a los esfuerzos de análisis, modelación y predicción del comportamiento de las laderas es la incertidumbre en las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, en las características de intensidad y duración de lluvia y en la forma en que el agua se infiltra en el suelo y altera la estructura de las presiones de poro; éstos son algunos de los parámetros que determinan el equilibrio de fuerzas que, a la postre, derivan en la inestabilidad de la ladera. Desde la probabilidad y estadística se aportan elementos técnicos para aproximar el modelo que permite analizar tanto las condiciones iniciales como las de escenarios subsecuentes en los que el agua incrementa la susceptibilidad a la inestabilidad de la ladera. Estos parámetros se pueden modelar como variables aleatorias cuya distribución probabilista puede aproximarse mediante pruebas geotécnicas de laboratorio o estudios previamente reportados en la literatura para sitios similares al de la ubicación de la ladera.

Este tipo de técnicas permite que, en vez de que el resultado sea un número discreto, se pueda tener la distribución de probabilidad del factor de seguridad. Esta medida permite la versatilidad de usar simplemente el valor medio o usar percentiles, mayores de 50%, que implícitamente contengan un margen conservador adicional al que tendría el valor medio. Así, en las laderas donde las consecuencias de falla o de deslizamiento sean mayores que en otros casos, se podrían tomar decisiones con base en percentiles de 70, 80 o 90, y así el margen conservador dependerá de la gravedad de las consecuencias de falla. Lo anterior, en cierta forma, equivale a tomar decisiones exigiendo un factor de seguridad mayor a 2, 3 o 4, en

vez de la práctica convencional de solamente pedir que el factor de seguridad sea mayor que 1.

Efecto detonante de las lluvias

En otros lugares del mundo se han realizado diversos estudios que consideran el efecto de la lluvia sobre la pérdida de estabilidad en las laderas. Por ejemplo, un grupo de investigadores de Italia (Sorbino y Nicotera, 2013) estudió la predicción probabilista de fallas en laderas inducidas por lluvia mediante un modelo basado en la mecánica de la falla.

Recientemente, en un trabajo patrocinado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (De León, 2018), se incorporaron aspectos probabilísticos implícitos en la variabilidad de las propiedades del suelo y en las características de las lluvias (intensidad y duración) para establecer una priorización en la atención a la posible inestabilidad, a partir del cálculo de la probabilidad de falla de la ladera y considerando la magnitud de las pérdidas esperadas como consecuencia de la falla. Uno de los productos de este estudio fue la generación de métricas para priorizar la gravedad de la inestabilidad entre varias laderas críticas. Durante el proyecto se realizaron trabajos de campo en varios sitios, que consistieron en el levantamiento topográfico y la recuperación de muestras de suelo. Uno de los lugares analizados fue la barranca de Mapalco, en Santa María Nepopualco, del municipio de Huejotzingo, en Puebla. En esta barranca ya habían ocurrido derrumbes y la



Figura 10. Barranca de Mapalco, Santa María Nepopualco, municipio de Huejotzingo, en Puebla.

profundidad era de más de 50 m, como se observa en la Figura 10.

La importancia de considerar el efecto de la lluvia radica en la reducción drástica de la resistencia del suelo ante las fuerzas que tienden a provocar el deslizamiento o la inestabilidad de la ladera. El volumen de agua que se infiltra al suelo incrementa rápidamente la susceptibilidad al deslizamiento y, por lo general, no da mucho tiempo para evacuar a las personas que se encuentran cerca del sitio ni para poner a salvo sus pertenencias. De ahí que la intensidad y duración de la lluvia tenga mucho que ver en la posibilidad de que pronto ocurra el deslizamiento, sobre todo cuando el suelo es blando y la pendiente de la ladera hace más propicio el fenómeno del deslizamiento. Por ello, es de extrema pertinencia considerar la resistencia del suelo, que se ve reducida ante la presencia (corta o prolongada) de humedad; en general, los suelos parcial o totalmente saturados tienen menor resistencia que los suelos secos. Además, el peso de la ladera (y en consecuencia el ángulo de inclinación y la geometría) influye en la magnitud de las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento.

La complejidad antes descrita hace que algunos especialistas llamen a este fenómeno el peligro geo-hidro-meteorológico, pues se deben tomar en cuenta éstos y otros factores para tratar de pronosticar la susceptibilidad a la inestabilidad y los niveles de consecuencias del deslizamiento. Una de las formas para analizar la estabilidad de las laderas es mediante paquetes de cómputo que facilitan el cálculo de la estabilidad de taludes.

Estrategias de mitigación

Avances en el Cenapred

Otros factores que contribuyen a incrementar la susceptibilidad y el riesgo son de tipo antropogénico (como las prácticas de arrojar aguas de deshecho en asentamientos arriba de la ladera, la tala inmoderada, los incendios forestales, entre otros). Para cambiar esta tendencia se requiere un mayor trabajo de concientización entre la población y las autoridades, ya sea para administrar mejor el territorio, o bien

para conocer y aplicar medidas que permitan proteger a las comunidades a partir de una colaboración continua. Con ello se podrán evitar prácticas que vulneren su seguridad, gracias a un trabajo conjunto y coordinado que privilegie la gestión de riesgos, desde la planeación de los asentamientos humanos hasta la identificación de las etapas tempranas de los procesos de inestabilidad, mediante la detección oportuna de las señales o rasgos precursores de deslizamientos. O bien, en su defecto, se debe lograr el convencimiento para evacuar a la población (con las medidas correspondientes de protección a los bienes de los individuos) en el momento en que fuera indispensable. Esto forma parte de los retos del Sistema Nacional de Protección Civil, enmarcados en la cultura de la autoprotección y la generación de confianza con las comunidades.

La transversalidad del tema con otros relativos al uso del suelo y el control de la deforestación, en algunos casos, resulta evidente. Por ejemplo, para la prevención y el control de los incendios forestales, la permisividad de algunas autoridades resulta esencial al dejar que las comunidades se asienten en zonas claramente identificadas como riesgosas. Los incendios que ocurrieron recientemente en México dan cuenta de la interrelación entre el peligro del incendio y el peligro de deslizamientos en zonas donde, sin vegetación que pueda contribuir a proteger la ladera o su vecindad, se incrementa la susceptibilidad a la inestabilidad cuando llegan las lluvias.

El reto de lograr comunidades resilientes en México

Dadas las enormes pérdidas humanas y económicas que se producen en nuestro país por los desastres asociados a este fenómeno, resulta altamente conveniente trabajar primero para evitar o mitigar los desastres y, en segundo lugar, para tener comunidades resilientes que logren una recuperación rápida si el deslizamiento ocurre. Para ello, se deben mejorar las acciones de mitigación (cortes de laderas, instalación de refuerzos como barras o mallas, drenajes, etc.), los sistemas de alerta oportuna, los ejercicios de simulacro de deslizamientos y la comunicación en un trabajo conjunto con las comunidades afectadas, entre otros esfuerzos de prevención.



Avalancha de tierra y lodo en la colonia Las Colinas de Santa Tecla, durante el terremoto de enero de 2001 en El Salvador. Fuente: Wikipedia.

De manera importante, conviene reforzar la coordinación y el trabajo conjunto entre instituciones y dependencias. Un ejemplo de ello es la reactivación, el 2 de julio de 2019, del Comité Técnico de la Estrategia Nacional de Mitigación del Riesgo por Inestabilidad de Laderas, conocido como comité técnico de Miladera (Cenapred, 2019). Así, se amplía la participación con especialistas de la Comisión Federal de Electricidad, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, la Comisión Nacional Forestal, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, la Comisión Nacional del Agua, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes,



Deslizamiento de tierra en Cuzco, Perú, en 2018. Fuente: Ministerio de Defensa del Perú, <https://www.flickr.com/photos/ministeriodedefensaperu/39935939755/in/dateposted/>

la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el Servicio Geológico Mexicano, la Universidad Autónoma del Estado de México, el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa y la Universidad Nacional Autónoma de México, entre otras instituciones.

Adicionalmente, es altamente recomendable promover la formación especializada de profesionales en las instituciones de educación superior de nuestro país, especialmente en los estados donde se presenta con frecuencia este tipo de fenómeno.

Conclusiones

En el contexto de los avances y las iniciativas recientemente formuladas, se aprecia que hay un espacio para el optimismo, ya que los retos y las oportunidades pueden alcanzarse mediante la cooperación, coordinación y el compromiso por la seguridad y el bienestar de las comunidades expuestas al peligro de



Daños causados por deslave en Atoyac de Álvarez, Guerrero; por lluvias provocadas por el huracán "Manuel", septiembre de 2013, Fuente: <https://www.flickr.com/photos/presidenciamx/14298740643/in/album-72157644450963367/>

los deslizamientos de laderas. La cooperación y las alianzas pueden potenciar la carrera hacia la mitigación de desastres que tienden a ocurrir cada temporada de lluvias, a partir de aprovechar los talentos y experiencias en varias instituciones. La coordinación permite optimizar los recursos para reducir repeticiones y traslapes en esfuerzos individuales y de grupos que, por no comunicarse, limitan la eficacia de las acciones. En tanto, el compromiso de todos coadyuva al logro de metas, con velocidad razonable, al tiempo que se evitan protagonismos y burocracias. Todo esto fomenta el desarrollo de productos y acciones que contengan el mayor valor y calidad, con mediciones objetivas y un seguimiento adecuado para proteger a las comunidades que están amenazadas.

Los autores agradecen el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), mediante su Programa de Problemas Nacionales, para la realización del proyecto de investigación de cuyos resultados se deriva parte del presente trabajo.

Leobardo Domínguez Morales

Centro Nacional de Prevención de Desastres.
ldm@cenapred.unam.mx

David de León Escobedo

Universidad Autónoma del Estado de México.
dleon@uaemex.mx

Referencias específicas

- Bitrán, D. (2001), *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99*, Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, t. I, México, Secretaría de Gobernación/Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Cluff, L. S. (1971), "Peru earthquake of May 31, 1970. Engineering geology observations", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(3):511-533.
- Domínguez, L., A. Castañeda, A. González y R. Espinasa (2014), *Informe sobre la inestabilidad de laderas ocasionada por el huracán Ingrid y la tormenta tropical Manuel en Guerrero, Veracruz y Oaxaca en 2013*, México, Cenapred.
- Domínguez L., A. Castañeda y V. D. Castillo (2015), "Inventario Nacional de Inestabilidad de Laderas: Formato con macros para la captura y ordenamiento de información georreferenciada", *Informe de Proyecto Anual de Trabajo (PAT) 2014*, México, Secretaría de Gobernación/Coordinación de Protección Civil/Cenapred.
- De León, D. (2018), "Métrica de vulnerabilidad de taludes críticos sujetos a lluvias extremas", XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Campeche, México.
- Evans, S. et al. (2009), "Landslides triggered by the 1949 Khait earthquake, Tajikistan, and associated loss of life", *Engineering Geology*, 109:195-212.
- John, J. (2010), *Landslide Occurances at Maierato, Italy. An Engineering Geological View* (tesis de maestría), Universidad de Pennsylvania, Filadelfia.
- Mendoza, M. J. e I. Noriega (1999), "Deslizamientos de suelos y rocas en Teziutlán, Puebla, provocados por las intensas lluvias de inicios de octubre de 1999", *Informe del Cenapred a la Coordinación General de Protección Civil*, México, Secretaría de Gobernación.
- Sorbino, G. y M. V. Nicotera (2013), "Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides", *Engineering Geology*, 165:105-132.
- Strange, H. (2019), "Dramatic footage shows Bolivian landslide sweeping away houses", *CNN*. Disponible en: <https://edition.cnn.com/2019/05/01/americas/bolivia-la-paz-landslide-scli-intl/index.html>, consultado el 3 de agosto de 2021.
- Villegas, C. (2005), "Recuperando el paraíso perdido. El proceso de reconstrucción en la ciudad de Acapulco", en V. Acosta (ed.), *La construcción social de riesgos y el huracán Paulina*, México, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social.
- Wesson, V. K. y R. L. Wesson (1975), "Odyssey to Tadzshik—an American family joins a Soviet seismological expedition", *U. S. Geological Survey Earthquake Information Bulletin*, 7(1):8-16.

¿Qué tan peligrosos pueden ser los volcanes?

En el presente artículo se reflexiona sobre la peligrosidad de los volcanes, con énfasis en el Popocatepetl y el volcán de Colima, mediante una serie de posibles preguntas del público que se responden de manera ágil, sencilla e interesante. Se hace ver que, pese a que un volcán se mantenga aparentemente inactivo, tiene el potencial de generar erupciones peligrosas.

En ámbitos diferentes al académico, al iniciar una conversación con una persona antes desconocida, cuando surge el tema de las profesiones, es frecuente que siga una larga pausa acompañada de una mirada escéptica cuando uno menciona que se dedica a la vulcanología. Si se consigue convencer al interlocutor de que no es una broma y que de alguna manera es posible ganarse el sustento intentando entender cómo funcionan los volcanes y lo que son capaces de hacer, entonces surge una serie de preguntas que por lo general no tienen respuestas breves, precisas, únicas ni claras.

Por ello, intento presentar aquí algunas de las preguntas más comunes y lo que pudiera ser una respuesta razonable, en el entendido de que, por la inaccesibilidad de los sistemas volcánicos activos, muchos de los argumentos involucrados al describir procesos volcánicos son especulativos y sujetos a ajustes conforme se adquiere más y mejor información sobre lo que ocurre bajo esas estructuras, capaces de producir el fenómeno de la naturaleza más impresionante en nuestro planeta: las erupciones volcánicas.

¿Qué es un volcán?

Un volcán es el resultado de una o varias erupciones. Una erupción volcánica es la salida a la superficie de rocas a temperaturas elevadas, con frecuencia superiores a la del punto de fusión de las rocas, acompañadas de gases y materiales fragmentados por efecto del ascenso del magma hacia la superficie. Magma es la roca que, por efecto de algún proceso a profundidades del orden de decenas a centenas



de kilómetros, se ha fundido. Como la roca fundida es una mezcla de minerales, gases y líquidos, por lo general más ligera que la región de donde se deriva, el magma tiende a ascender. Un volcán es la estructura que se forma por la acumulación de los productos emitidos por las erupciones; si la salida de esos productos es por el mismo sitio, pueden construirse grandes edificios volcánicos (volcanes centrales) a lo largo de repetidas erupciones.

Aunque en algunas regiones oceánicas el magma puede salir en forma relativamente libre a la superficie (en este caso, el fondo del mar) desde su zona de origen profunda a lo largo de extensas fisuras, en las áreas continentales es más común que el magma tienda a acumularse en las partes superiores de la corteza terrestre, en “cámaras” o reservorios ubicados a profundidades moderadas (más o menos entre 2 y 15 km), que son estructuras complejas de fracturas y grietas invadidas por el material fundido. Durante el proceso de ascenso a la “cámara magmática” y durante su residencia allí, el magma evoluciona químicamente por efecto de las interacciones con la roca circundante, y por las menores presiones y temperaturas existentes a esas profundidades moderadas, por lo que se van formando complejas mezclas cuyas propiedades fluidas pueden tener rangos muy amplios de comportamiento. Cuando a causa de esa evolución, o por la introducción de nuevo magma, se genera una sobrepresión en el reservorio, el mag-

ma puede reanudar su ascenso. Si éste llega a la superficie, tendremos una erupción magmática; si sólo se acerca lo suficiente para sobrecalentar los mantos acuíferos, puede producirse una explosión freática.

En el caso de una erupción magmática, el tipo e intensidad de la erupción dependen en gran medida de la tasa de ascenso del magma. Si ésta es lenta y los gases disueltos tienen tiempo de separarse, al salir a la superficie el magma ya ha perdido una buena parte de esos volátiles y puede fluir como un material análogo al vidrio fundido, al que se denomina lava. Esto es una erupción efusiva. En cambio, si la velocidad de ascenso es alta, o si el magma es muy viscoso, los volátiles no tienen tiempo de separarse del magma y al acercarse a la superficie forman una gran cantidad de burbujas en el interior del fluido a gran presión. Si el volumen de las burbujas excede cierto valor crítico, el magma pierde su cohesión y puede fragmentarse y estallar con gran violencia, lo que produce una erupción explosiva. Este proceso puede extenderse en el tiempo, conforme nuevo magma asciende hasta la región de fragmentación y genera una explosión continua que puede tener consecuencias devastadoras. Así, las erupciones pueden ser efusivas, (cuando producen flujos de la lava) o explosivas (cuando el magma se fragmenta violentamente y forma la ceniza volcánica).

■ ¿Se pueden predecir las erupciones volcánicas?

■ Una erupción mayor, sea efusiva o explosiva, implica la liberación de grandes cantidades de energía. Esta energía debe acumularse primero bajo el volcán. Los procesos de acumulación y la proximidad a un proceso de liberación de esa energía generan ciertas señales que pueden ser detectadas con la instrumentación adecuada. Uno de los aspectos que más se ha desarrollado en el campo de la vulcanología en las últimas décadas es la modelación de los procesos de ascenso y fragmentación del magma.

Asimismo, se han logrado avances considerables en la tecnología de detección y en las capacidades de reconocimiento de las señales precursoras que pueden anteceder a las erupciones. Las señales precursoras pueden ser de distintos tipos:



- Sísmicas, originadas por los movimientos del magma bajo el volcán, por la invasión de volátiles líquidos y gaseosos en grietas, por la formación de burbujas en el magma y, en términos generales, por la fractura de rocas debido a los esfuerzos inducidos por la intrusión de magma.
- Deformaciones del edificio volcánico, por las mismas causas, que son medibles por métodos geodésicos.
- Geoquímicas, relacionadas con cambios en la composición de los productos volcánicos o influenciados por la actividad, por ejemplo, del agua de manantiales o emisiones de gas, que pueden ser analizadas en laboratorios equipados.
- Geológicas, determinadas por medio del análisis de la composición y mineralogía de los productos volcánicos, como lavas, cenizas, etcétera.
- De percepción a distancia, principalmente, mediante imágenes en bandas visibles e infrarrojas obtenidas con cámaras instaladas en observatorios, aeronaves o satélites.

El análisis e interpretación de todas estas señales puede permitir una identificación positiva de los procesos de acumulación y proximidad de liberación de energía en un volcán activo, y de allí obtener un pronóstico o estimación más precisa de la probabilidad de erupción. Sin embargo, no se ha logrado un grado de precisión en el pronóstico que permita llamarlo predicción. Esto se debe a una dificultad inherente al proceso volcánico y nuestras limitaciones para observarlo en forma directa.

Como se mencionó antes, los procesos de gestación de una erupción ocurren en regiones dentro o bajo la corteza, a las cuales no podemos tener acceso directo; tan sólo se pueden detectar en la superficie algunas de las señales originadas por el proceso. Esto conlleva una seria dificultad, que genéricamente se denomina incertidumbre epistémica. Lo anterior significa que únicamente podemos inferir lo que está ocurriendo a profundidad, ya que no es posible el acceso directo, y el problema es que las combinaciones de señales que recibimos en la superficie pueden ser generadas por una multitud de diferentes interacciones de procesos y condiciones en la profundidad.

En términos generales, se podría reducir el grado de no-unicidad de las posibilidades, pero la complejidad de los procesos involucra un número mayor de variables y parámetros desconocidos que el número de señales que podemos reconocer desde la superficie.

Entonces, se recurre a una metodología que fue planteada en la ciencia moderna desde la primera mitad del siglo XX, descrita principalmente por Karl Popper en *La lógica de la investigación científica* (2008): ante una incertidumbre epistémica, o ante una problema inverso con un alto grado de no-unicidad (cuando muchas explicaciones diferentes describen a un mismo proceso inaccesible), el proceder con los métodos inductivos tradicionales de la ciencia, que consisten en la generalización de resultados parciales y que son de gran valor en los problemas directos, puede ser sumamente peligroso y llevar a conclusiones incorrectas en problemas inversos. Una posible solución consiste en abordar el problema siguiendo criterios de demarcación; esto significa que, en lugar de intentar describir o confirmar la naturaleza del proceso interno del volcán o de desarrollar modelos que los describan a partir de los (generalmente insuficientes) datos disponibles, lo indicado es aplicar un procedimiento que descarte aquellos procesos, configuraciones o modelos que no satisfacen o expliquen la totalidad de los datos que se recaban en la superficie. Al analizar ordenadamente cada uno de los grupos de datos disponibles (sísmicos, geodésicos, geoquímicos, térmicos, visuales, y otros), se proponen diferentes causas que expliquen las observables, que pueden ser apoyadas o descartadas desde la perspectiva de cada tipo de parámetro observado. De esta forma, la multiplicidad de los posibles procesos y de sus consecuencias se reduce.

Aplicar estas metodologías requiere de una inversión importante de equipo humano e instrumental especializado, dedicado a la función de vigilar continua y persistentemente a los volcanes que se sospecha puedan producir una erupción mayor. La experiencia global muestra que en los sitios de riesgo volcánico donde se utilizan estos métodos se ha logrado un alto número de pronósticos exitosos que han motivado acciones preventivas para proteger a la población. Algunos ejemplos son: Pinatubo, en



Figura 1. Uno de los domos de lava que se ha emplazado en el interior del cráter del volcán Popocatepetl.

Filipinas, 1991; Soufriere Hills, en Monserrat, 1997; o bien la reciente actividad del Popocatepetl, especialmente durante su marcado incremento en 2000 y 2001.

Si el Popocatepetl hiciera una erupción mayor... ¿desaparecería la Ciudad de México?

De ninguna manera. Como en el caso de los sismos, las erupciones pueden tener diferentes magnitudes e intensidades; si bien estos conceptos tienen un significado diferente en el caso de los volcanes. En el ámbito volcánico, la magnitud describe la cantidad (masa o volumen) de magma emitido durante una erupción; en tanto que la intensidad se refiere a la tasa de emisión de los materiales volcánicos. La combinación de estos factores determina el poder destructivo de una erupción. Se puede citar el ejemplo de la erupción del volcán de Colima en 1913, que fue de magnitud moderada, pero de intensidad alta. En contraste, la erupción del Parícutín, que se extendió desde su nacimiento en 1943 hasta 1952, fue de mayor magnitud, pero de mucho menor intensidad.

El estudio de erupciones pasadas permite estimar las tasas a las que se han presentado las erupciones de diferentes tamaños a lo largo de tiempo, y de allí calcular sus probabilidades de ocurrencia. Ese estudio arroja un resultado que no es sorprendente, ya que se presenta en diferentes fenómenos naturales: existe una relación inversa entre el tamaño de las

erupciones y la frecuencia con que se presentan. En otras palabras, las erupciones menores y moderadas son más frecuentes y probables que las grandes erupciones. En forma análoga, en una región determinada, los sismos pequeños son mucho más abundantes que los grandes terremotos.

Las evidencias de erupciones extremas del Popocatepetl ocurridas en los últimos 25 000 años (Sosa-Ceballos y cols., 2012; Siebe y cols., 2017) indican que durante erupciones extremas han llegado a caer considerables lluvias de ceniza, arena y fragmentos de pómez (ya fríos) hasta acumular varios centímetros sobre el valle de México. Esto ocurre si las condiciones del viento lo favorecen, en el caso de que durante el desarrollo de la erupción soplen vientos relativamente fuertes hacia el noroeste del volcán en un amplio rango de altitudes. Por lo tanto, se requiere la probabilidad combinada de una erupción extrema con un viento propicio para que ocurra una caída de ceniza del orden de 10 cm de espesor depositado en una región determinada, a distancias de 60 a 80 km del volcán, lo cual, si bien no mejoraría para nada las condiciones en las zonas urbanas de la capital mexicana, está muy lejos de causar la destrucción o desaparición de la ciudad. Su impacto en ciertos aspectos podría compararse con el de una granizada muy intensa, con el añadido de las propiedades erosivas de los fragmentos volcánicos de cualquier tamaño. Cabe señalar que éste no sería el caso de las regiones en el entorno del volcán marcadas en los “Mapas de peligros del volcán Popocatepetl”

(disponible en español y en náhuatl)¹ en las que los efectos de manifestaciones asociadas a erupciones mayores, como flujos piroclásticos y flujos de lodo, entre otros, requerirían tomar medidas de evacuación para proteger a la población.

■ **¿El Popocatépetl y el volcán de Colima están conectados?**

■ Tanto el Popocatépetl como el volcán de Colima han tenido actividad eruptiva en las últimas décadas. Ambos volcanes son del mismo tipo continental, pero cada uno con sus reservorios magmáticos propios e independientes. Si bien la zona de génesis que alimenta a ambos reservorios puede tener una fuente regional común (la subducción de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana), los recipientes magmáticos que controlan los procesos eruptivos de cada volcán se encuentran a pocos kilómetros (menos de 10) de la superficie. Como la distancia horizontal entre los volcanes excede 500 km, es mucho más razonable pensar que los magmas viscosos en ambas cámaras busquen su camino hacia la superficie, y no a lo largo de una distancia horizontal cien veces mayor, por lo que es difícil concebir la existencia de un conducto que una a ambos volcanes.

Existen, sin embargo, estructuras volcánicas “conectadas”, que pueden cubrir distancias de decenas

¹ Véase: «<http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/357-CARTELMAPASDEPELIGROSDDELVOLCNPOPOCATPETL.PDF>»

de kilómetros. Esto ocurre cuando hay un sistema magmático profundo dominado por magmas de menor viscosidad que alimenta a numerosos centros eruptivos. En estos casos, más bien puede hablarse de un solo edificio volcánico con numerosos sitios de salida de magma. Estas estructuras son más abundantes en el ambiente oceánico, por ejemplo, en Islandia y muchas otras zonas de *rift*, o en algunos volcanes de tipo hawaiano.

■ **¿Es posible que el volcán Xitle vuelva a hacer erupción?**

■ Ubicado al sur de la ciudad de México, el Xitle es parte de un campo volcánico monogenético, lo que significa que es un volcán alimentado directamente desde un sistema magmático profundo, situado en el manto terrestre, bajo la corteza, que busca varias salidas hacia la superficie. Cada salida es un volcán que nace, se mantiene en erupción por varios años (por lo general menos de 10) y se extingue. Cuando el sistema magmático del campo volcánico está listo para una nueva erupción, le es más fácil buscar un nuevo camino a la superficie que reactivar alguno de los conos existentes. Así, nace otro volcán monogenético. El Xitle forma parte del campo volcánico Chichinautzin, que comprende cerca de 220 conos monogenéticos ubicados entre el valle de México y los valles de Cuernavaca y Toluca. Otros volcanes monogenéticos conocidos son el Paricutín (1943-1952) y el Jorullo (1759-1774), que forman parte del



Figura 2. El volcán Xitle (cono más oscuro) visto desde la zona arqueológica de Cuicuilco. En el fondo, el Ajusco, un volcán más antiguo.

campo volcánico de Michoacán-Guanajuato, en el que se pueden contar más de 1 000 conos de ese tipo. En resumen, por su naturaleza, es más fácil que nazca otro volcán en algún lugar del campo volcánico monogenético, a que uno de ellos, como el Xitle, vuelva a hacer erupción y repita la inundación por flujos de lava de Cuicuilco y las zonas aledañas.

¿Qué tan alto es el riesgo volcánico en México?

Para contestar esto, hay que distinguir entre dos conceptos diferentes: peligro y riesgo. En el caso de un volcán en particular, el peligro se define como la probabilidad de que ocurra algún tipo de actividad en un intervalo de tiempo determinado, y que una manifestación volcánica particular, como un flujo de ceniza o un flujo de lodo, se presente en un sitio específico en ese intervalo. Así, puede decirse que, en un lugar (digamos, una barranca que pudiera canalizar flujos de ceniza caliente desde un cráter activo hasta una región determinada), el peligro es más alto que en otro sitio que, aunque cercano, esté elevado o protegido por barreras topográficas. Esto sig-

nifica que, si se trata de un volcán con una alta tasa eruptiva, la probabilidad de que el sitio de la barranca pueda ser alcanzado por flujos es más alta. Si se cuenta con datos precisos de las erupciones pasadas, es posible establecer cuantitativamente la función de peligro.

Por otro lado, el riesgo conlleva un concepto adicional: la vulnerabilidad de los sitios amenazados por un volcán. Así, un volcán con alta probabilidad de hacer erupciones mayores frecuentes, pero ubicado en un lugar desierto, es de alto peligro, pero de bajo o nulo riesgo. De forma recíproca, un volcán con una tasa baja eruptiva, donde rara vez se presentan manifestaciones volcánicas de carácter destructivo, pero que está rodeado por una alta densidad de población, es de alto riesgo, aunque de peligro moderado o bajo, como es precisamente el caso del Popocatepetl y de otros grandes volcanes centrales de México, como el Citlaltépetl o el Nevado de Toluca. En contraste, el volcán de Colima puede considerarse como de relativamente alto peligro, pero de relativamente menor riesgo, ya que hay una menor vulnerabilidad de la población en su entorno.



En el mundo hay cerca de 1300 volcanes que han tenido erupciones en los últimos 10000 años, de los cuales hasta 60 o 70 llegan a producir nuevas erupciones cada año. Es probable que en cualquier momento haya unas 20 erupciones en marcha en diversos lugares del planeta. En esos términos, considerando que México representa 1.7% de la población mundial y que tiene cerca de 1% de la actividad volcánica global, puede decirse que es un país de riesgo intermedio. Países con más alto riesgo serían, por ejemplo, Indonesia, Ecuador o Filipinas.

■ ¿Puede alguno de los grandes volcanes de México producir una erupción mayor?

■ Ya las han producido y pueden volver a ocurrir. Los grandes edificios, como el volcán de Colima, el Popocatepetl, el Pico de Orizaba, el Nevado de Toluca y otros más, se han construido de los productos acumulados de numerosas erupciones. Con frecuencia, los productos de erupciones efusivas (lavas) se alternan con los de erupciones explosivas (productos fragmentados), por lo que se forman estratos bien definidos. Estos estratovolcanes pueden tener vidas largas en las que durante decenas o centenas de miles de años los episodios eruptivos se alternan con periodos de inactividad. Por ello, se denominan volcanes activos aquellos que, aunque se encuentren en un periodo de reposo, sin actividad externa aparente, mantienen el potencial de producir erupciones de cualquier tipo. Tanto el volcán de Colima como el Popocatepetl, el Pico de Orizaba y cerca de una decena de volcanes más en México se consideran activos en ese sentido.

En el siglo XX en México tuvimos seis erupciones importantes: el volcán de Colima (intensa en 1913 y moderada de 1960 al presente), el Popocatepetl (1919-1927 y 1994-presente, ambas moderadas) y el Chichón (muy intensa en 1982). Esta última produjo el peor desastre volcánico de la historia de

nuestro país. En el caso de volcanes monogenéticos, se han formado el Parícutín (1943-1952) y –en el siglo XVIII– el Jorullo (1759-1774), ambos en el campo volcánico de Michoacán-Guanajuato, donde se mantiene la posibilidad del nacimiento de un nuevo volcán.

En conclusión, los volcanes han producido erupciones desde las primeras etapas de la formación de la Tierra, mucho antes de la aparición de la humanidad, y continuarán produciéndolas mientras habitemos este planeta. Lo importante es que la ciencia cada vez genera mejores herramientas para reducir sus efectos.

Servando de la Cruz Reyna

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
sdelacr@geofisica.unam.mx

Referencias específicas

- Grupo de trabajo para la actualización de los mapas de peligro del Volcán Popocatepetl (2016), “Mapas de peligros del volcán Popocatepetl”. Disponible en: «<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/357-CARTELMAPASDEPELIGROSDDELVOLC-NPOPOCATPETL.PDF>», consultado el 24 de agosto de 2021.
- Popper, K. (2008), *La lógica de la investigación científica*, 2.ª ed., Madrid, Tecnos.
- Siebe, C. *et al.* (2017), “The ~23,500 y 14C BP White Pumice Plinian eruption and associated debris avalanche and Tochimilco lava flow of Popocatepetl volcano, México”, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 333: 66-95.
- Sosa-Ceballos, G., J. E. Gardner, C. Siebe y J. L. Macías (2012), “A caldera-forming eruption ~14,100 14C yr BP at Popocatepetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing”, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 213:27-40.

Cecilia Izcapa Treviño, Rubén Darío Rivera Balboa y Araceli Arista Narciso

El riesgo de transportar sustancias químicas

En México, el transporte de sustancias químicas y materiales peligrosos se realiza principalmente por carretera, donde se registraron 2 274 accidentes en el periodo de 2010 a 2016, principalmente en Veracruz, Estado de México y Sonora; el tipo de accidente más frecuente fue la volcadura, seguido del choque, mientras que los vehículos involucrados en el mayor número de accidentes fueron los unitarios y después los doblemente articulados.

Introducción

El transporte de sustancias químicas es inherente a cualquier sociedad con cierto desarrollo tecnológico, pues los procesos industriales dependen de un flujo ininterrumpido de estos materiales, que en algunas ocasiones son peligrosos. En México, el transporte de sustancias químicas se realiza principalmente por carretera y ferrocarril; al transporte por carretera se le conoce como autotransporte y al realizado por ferrocarril se le llama transporte ferroviario. De acuerdo con datos de 2020, la infraestructura carretera tiene 397 212 km, por los cuales transitan 124 164 unidades (total de unidades motrices y unidades de arrastre) que transportan alrededor de 64 millones de toneladas de materiales peligrosos.

Todo tipo de actividad está sujeta a que sucedan eventos no deseados; sin embargo, aunque los accidentes en el autotransporte de sustancias químicas peligrosas son eventos que ocurren con poca frecuencia en comparación con el número de unidades que transitan, cuando sucede una liberación de estas sustancias se pueden generar impactos o afectaciones de consideración, con efectos para el ambiente, las propiedades y la economía, así como para las personas que están cerca del sitio del accidente o en los vehículos involucrados.

Por ello, el análisis de los accidentes en el autotransporte de sustancias peligrosas es importante, ya que proporciona a las autoridades, productores, empresas transportistas y otros involucrados, la información necesaria para elaborar, establecer e implementar estrategias y acciones para que esta actividad se realice de manera segura. A continuación, se presentan los resultados del análisis de los accidentes en el autotransporte de sustancias peligrosas para el periodo de 2010 a 2016 en México.



Número de accidentes

La Policía Federal (División de Seguridad Regional), el Sistema de Emergencias en Transportación de la Industria Química (SETIQ), el Centro Nacional de Comunicación y Operación de Protección Civil (Cenacom) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) recopilan información sobre los accidentes con sustancias químicas peligrosas que ocurren en las carreteras de México. A partir de esta información y con la obtenida de las noticias publicadas en medios electrónicos, elaboramos una base de datos que incluyó 2 274 accidentes ocurridos entre 2010 y 2016.

El registro de los accidentes permitió identificar las entidades federativas con el mayor número de accidentes, entre las que destacan Veracruz, Estado de México, Sonora, Guanajuato y Nuevo León, como se observa en la Figura 1.

Tipos de accidentes

Para su análisis, los accidentes con sustancias peligrosas en el autotransporte se clasificaron en siete ti-

pos: choque, salida del camino, volcadura, desprendimiento de semirremolque, incendio, atropellamiento y otros; en esta última categoría se incluyeron: fuga debido a falla en el tanque o accesorios, derrame debido a falla en el tanque o accesorios, caída de peatón, caída de carga, abandono del vehículo y reacción de la carga. Se observó que el tipo de accidente más frecuente es la volcadura, seguido del choque y la salida del camino (véase la Figura 2).

Cuando ocurre algún tipo de accidente, puede presentarse un evento químico; es decir, puede suceder una fuga, derrame, incendio o explosión. Del número total de accidentes en el periodo estudiado, 1 346 (59.2%) presentaron algún tipo de evento, 179 (7.9%) accidentes no presentaron algún evento y para 749 (32.9%) no se contó con información. El evento de mayor frecuencia fue el derrame (45.4%), seguido de los incendios (6%) y las fugas (5.3%).

Víctimas y vehículos involucrados

Un aspecto importante en los accidentes es la existencia de víctimas. Así, en 170 accidentes ocurrieron

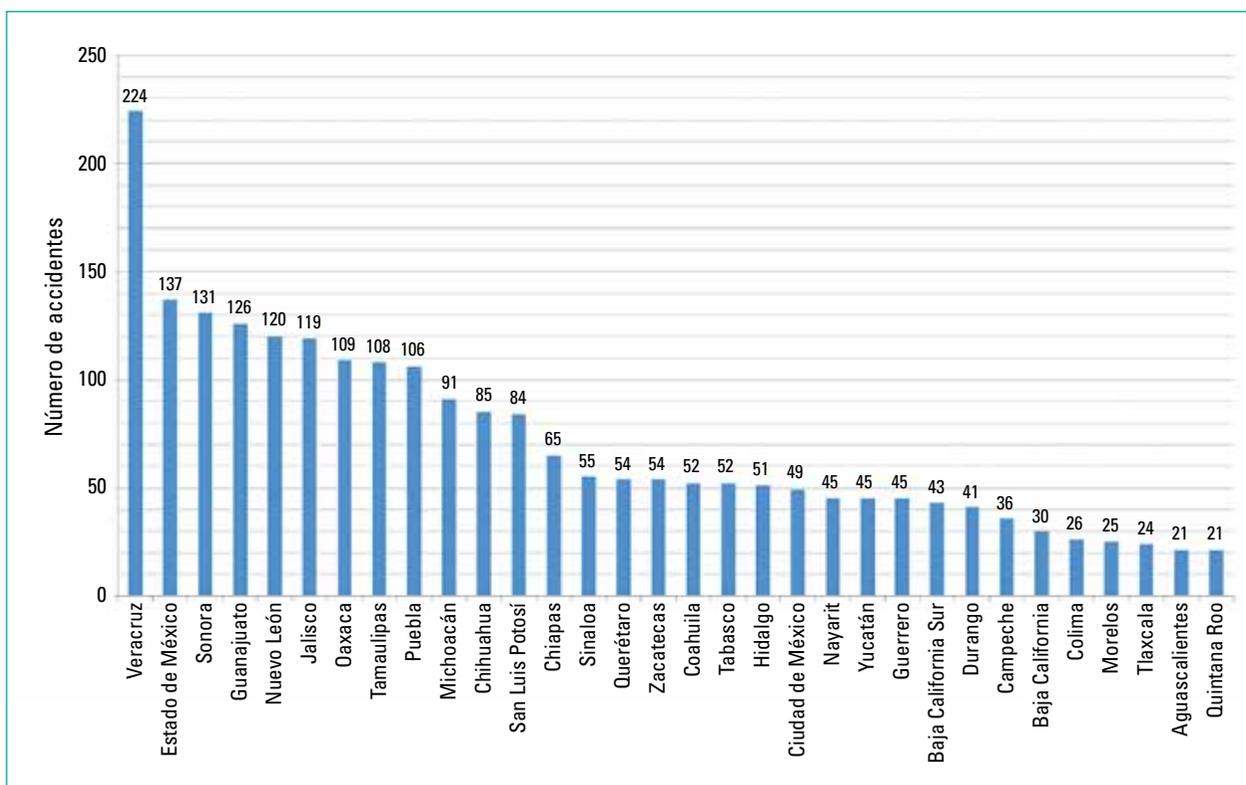


Figura 1. Número de accidentes en el autotransporte de sustancias y materiales peligrosos, por estado, para el periodo de 2010 a 2016.

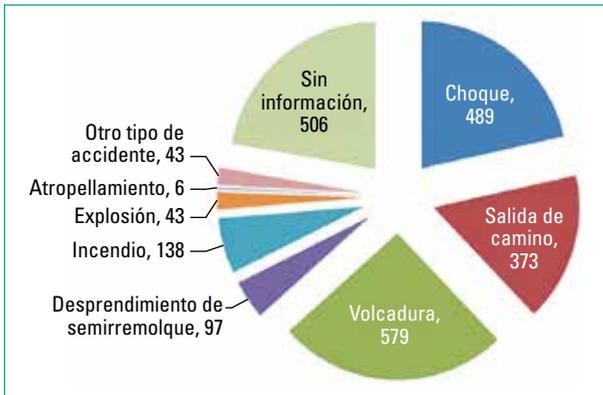


Figura 2. Número de accidentes en el autotransporte de sustancias y materiales peligrosos, por tipo de accidente, para el periodo de 2010 a 2016.

mueres y en 437 eventos resultaron personas lesionadas; de los anteriores, 79 accidentes presentaron simultáneamente muertes y lesionados (véase la Figura 3). El número total de muertes fue de 316 y el de lesionados fue de 1 070 en el periodo analizado.

Por otra parte, cabe considerar que en el autotransporte de sustancias peligrosas se emplean distintos tipos de vehículos, desde un vehículo unitario hasta los vehículos articulados, formados por una unidad motriz (tractocamión) a la cual se une o engancha una unidad de arrastre (semirremolque), o incluso dos (doble semirremolque), donde se lleva la carga. El tipo de vehículo involucrado en el mayor número de accidentes fue el unitario (35.8% de los casos), seguido por el vehículo doble articulado o con doble

semirremolque (27.4%) y después el tractocamión articulado o con un semirremolque (18.3%); para 18.5% de los accidentes no se tuvo información sobre el tipo del vehículo involucrado.

Causas de los accidentes

La identificación de las causas de los accidentes es un aspecto muy importante para establecer medidas preventivas, así como de vigilancia y control, todas encaminadas a disminuir el número de accidentes y sus consecuencias. En general, las causas de los accidentes pueden atribuirse al conductor, al vehículo, al camino o a los agentes naturales; son ejemplos de causas de accidentes, la imprudencia al manejar, el exceso de velocidad, la invasión de carril, las llantas en mal estado, fallas en los frenos, así como niebla y lluvia.

Las causas de accidentes atribuibles al conductor representaron 38.12% (868 accidentes) en el periodo analizado; de ellas, destacan el exceso de velocidad y la imprudencia. Por otra parte, las causas atribuibles al vehículo correspondieron a 8.58% (195 accidentes), debido principalmente a fallas en las articulaciones con los semirremolques y fallas en los frenos. Sin embargo, debe considerarse que en 51.28% de los casos (1 165 accidentes) no se contó con información para establecer la causa posible del accidente.

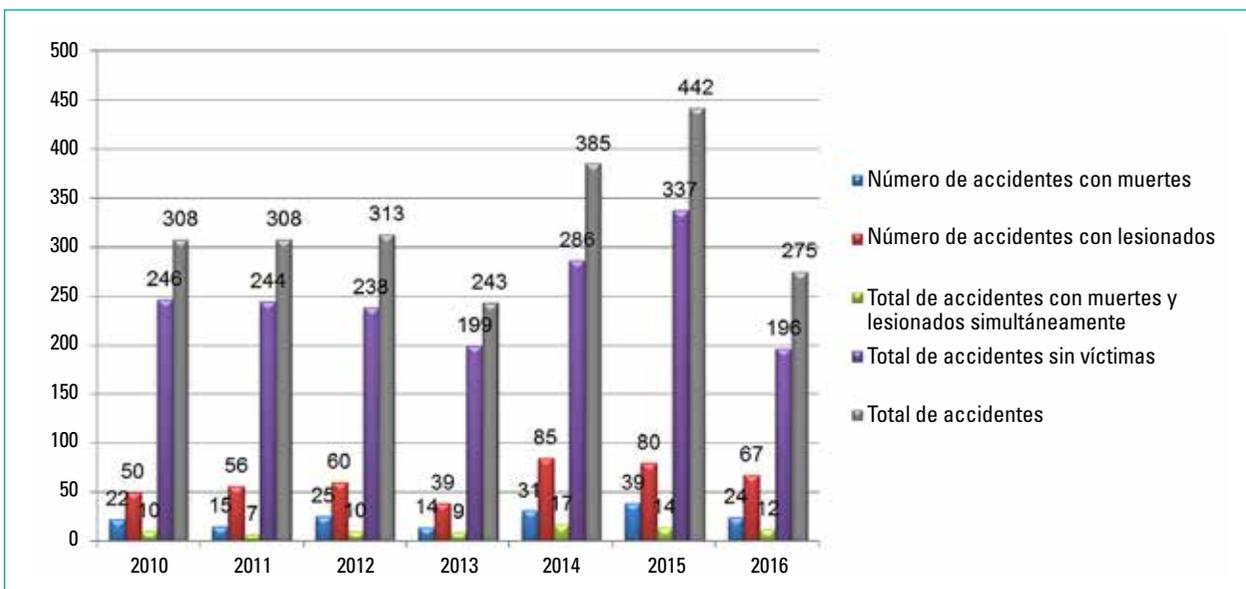


Figura 3. Número de accidentes en el autotransporte de sustancias y materiales peligrosos, con víctimas y sin víctimas, para el periodo de 2010 a 2016.

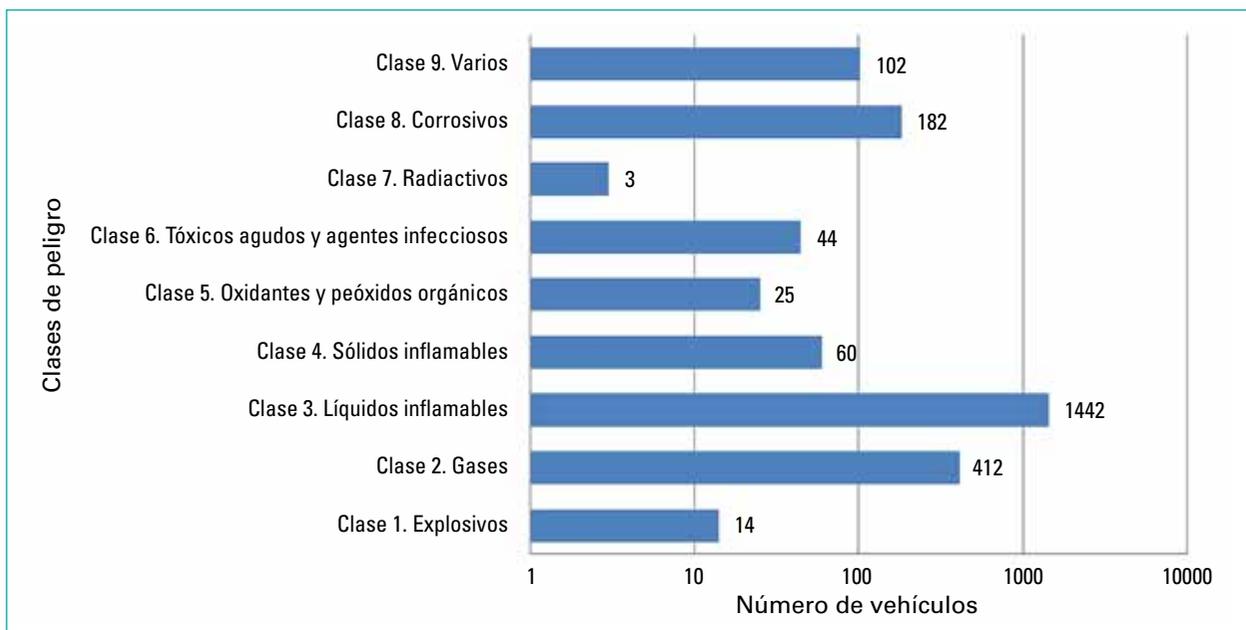


Figura 4. Número de vehículos involucrados en accidentes en el autotransporte de sustancias y materiales peligrosos, de acuerdo con la clase de riesgo, en el periodo de 2010 a 2016.

Clases de sustancias

Por consenso mundial, para el transporte de sustancias y materiales peligrosos, también llamadas mercancías peligrosas, se ha establecido una clasificación que consta de nueve clases de peligro. Adicionalmente, algunas de estas clases contemplan divisiones según el peligro que representan. Un ejemplo es la clase 2, correspondiente a gases, que posee tres divisiones: división 2.1 para gases inflamables, división 2.2 para gases no inflamables y no tóxicos, y división 2.3 para gases tóxicos; así, una sustancia ampliamente transportada, como es el gas LP, se clasifica en la división 2.1, correspondiente a los gases inflamables, debido a que a la temperatura de 20 °C y a la presión atmosférica existente a nivel del mar, esta sustancia se encuentra en estado gaseoso y es inflamable.

Considerando las nueve clases de peligro clasificamos las sustancias, materiales y residuos peligrosos involucrados en los accidentes para su análisis. Como se indicó anteriormente, en el periodo de 2010 a 2016 ocurrieron 2274 accidentes, de los cuales en 10 eventos se involucraron dos vehículos con materiales peligrosos, por lo que el total de vehículos en los accidentes fue de 2284. En la Figura 4 se presenta el número de vehículos accidentados de acuerdo con

la clase de peligro de la sustancia o material transportado. El mayor número de vehículos involucrados en accidentes, que también corresponde al mayor número de accidentes, transportaba sustancias de la clase 3, líquidos inflamables, seguido de la clase 2, gases, y de la clase 8, corrosivos.

Las sustancias químicas peligrosas involucradas en el mayor número de accidentes del autotransporte durante el periodo de estudio se presentan en la Tabla 1. El número total de accidentes registrados con las 13 sustancias químicas peligrosas seleccionadas fue de 1669, que corresponde a 73.4% del total de accidentes. Lo anterior sugiere que el enfoque en la vigilancia y atención de las causas que ocasionan los accidentes con estas sustancias peligrosas podría ayudar a disminuir los accidentes que ocurren en las carreteras del país.

Día y hora de los accidentes

Por último, se determinó el número de accidentes en el autotransporte de sustancias y materiales peligrosos por día de la semana y hora del día. Con ello, se observó que el número de accidentes incrementa de forma progresiva en los primeros días de la semana, alcanza su máximo el jueves, y luego disminuye el

Tabla 1. Sustancias peligrosas involucradas en el mayor número de accidentes, periodo de 2010 a 2016.

Clase o división	Sustancia peligrosa	Número de accidentes
3	Gasolina	392
3	Diésel	361
2.1	Gas LP	324
3	Destilados de petróleo	163
3	Combustóleo	153
3	Turbosina	95
8	Ácido sulfúrico	59
2.3	Amoníaco anhidro	31
3	Pinturas	27
8	Ácido clorhídrico	24
4.1	Azufre líquido	17
5.1	Nitrato de amonio, sólido	12
6.1	Cianuro de sodio	11
Total		1 669

viernes y el fin de semana. Asimismo, el mayor número de accidentes ocurre entre las 5:00 y 15:00 horas, con un punto máximo de las 9:00 a las 10:00 horas.

Guía y marco legal

Un aspecto importante por mencionar es el uso de la Guía de Respuesta en Caso de Emergencia, conocida como GRE o guía naranja, la cual es un poderoso recurso durante la atención de las emergencias que se presentan en el transporte de sustancias y materiales peligrosos. Esta guía se actualiza cada cuatro años y está dividida en cinco secciones señaladas en diferentes colores; en cada una se explican los procedimientos de atención básicos para los primeros respondientes ante una situación de incendio, explosión, derrame o fuga; asimismo, se describen los primeros auxilios, riesgos a la salud, distancias de acción protectora y aislamiento inicial, distancias a las que se debe evacuar a la población y recomendaciones del equipo de protección personal. Además, contiene información sobre señalización, explosivos, sustancias que reaccionan con agua, generación de gases tóxicos y distancias de sobrepresión en caso de explosiones con gas LP.

El marco legal que regula el transporte terrestre de sustancias es extenso y en él intervienen diferentes dependencias de la administración pública federal. El objetivo principal de contar con un marco legal es que la actividad se realice con un nivel adecuado de seguridad. La regulación, control y vigilancia del



autotransporte es responsabilidad de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, que ha publicado el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, así como 22 normas oficiales mexicanas, instrumentos en los cuales están contenidas las principales disposiciones relativas al diseño y la construcción de autotanques y contenedores cisterna, envases, embalajes y recipientes intermedios para granel, además de los lineamientos para la inspección de vehículos, señalización mediante carteles de las unidades destinadas al transporte, identificación de envases y embalajes con etiquetas y documentos e información de emergencia.

 **Conclusiones**

■ En México, la demanda y el uso de sustancias y materiales peligrosos se han generalizado y están en constante crecimiento. Su transporte por carretera es una actividad que requiere de estrictas medidas de seguridad, por lo que el marco legal aplicable tiene como propósito regular esta actividad para que se realice de manera eficiente y segura, con el objetivo de proteger a las personas que conducen las unidades de transporte, a la población que se encuentra cerca de las carreteras, al medioambiente y a los bienes materiales ante alguna posible afectación que resulte de un accidente.

En el análisis de los accidentes ocurridos de 2010 a 2016 se observa que la causa principal se atribuye al conductor, sobre todo por el exceso de velocidad y la imprudencia al manejar; después están las cau-

sas relacionadas con el vehículo. En este sentido, es necesario que las empresas transportistas pongan mayor atención en la capacitación y vigilancia del comportamiento de sus conductores, así como de los procedimientos de trabajo para tener un desempeño adecuado, además de la revisión de las condiciones físico-mecánicas de las unidades de transporte para lograr una disminución en el número de accidentes. Por otro lado, las instituciones y el personal de respuesta ante emergencias (Protección Civil, Cuerpo de Bomberos, etc.) deben estar preparados, capacitados y contar con los recursos y equipo de protección personal adecuados para atender los eventos que puedan ocurrir. Asimismo, la población en general debe conocer la manera en que se identifican a los vehículos que transportan sustancias y materiales peligrosos, y cuáles son las acciones de autoprotección pertinentes.

Cecilia Izcapa Treviño

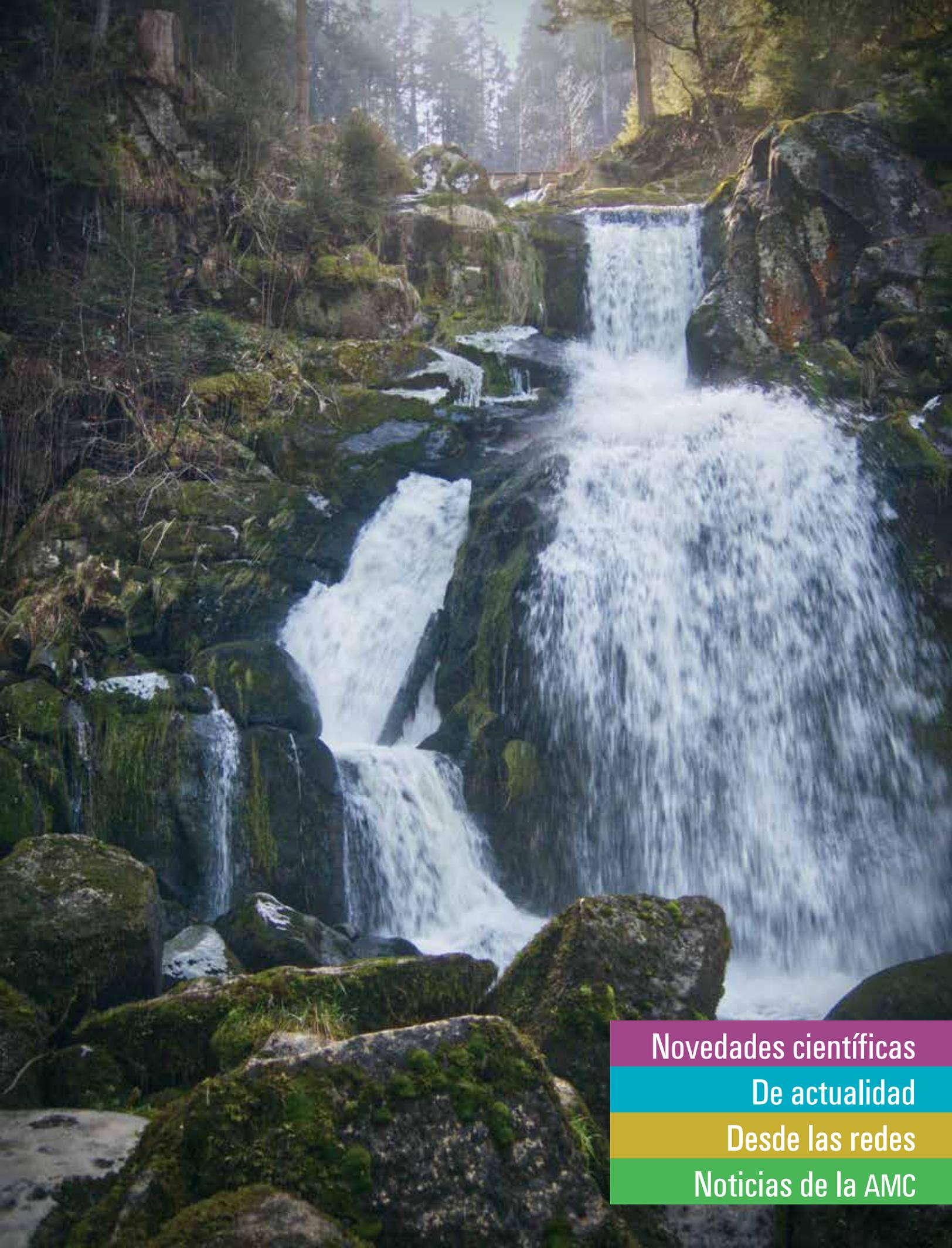
Centro Nacional de Prevención de Desastres.
cit@cenapred.unam.mx

Rubén Darío Rivera Balboa

Centro Nacional de Prevención de Desastres.
riba@cenapred.unam.mx

Araceli Arista Narciso

Petróleos Mexicanos.
aracelian@gmail.com



Novedades científicas

De actualidad

Desde las redes

Noticias de la AMC

¿Es posible encontrar agua en el manto terrestre?

El manto terrestre tiene “agua” en forma de hidroxilo (OH^-), alojado en la estructura molecular de minerales anhidros, específicamente en el manto superior y en la zona de transición. Las estimaciones de la cantidad de agua en el manto consideran que si todos los OH^- se pudieran unir y formar agua (H_2O), habría de una a cinco veces los océanos de la superficie terrestre.

El manto y la zona de transición

El manto es una porción del interior de la Tierra limitada en la parte superior por una capa delgada, que es la corteza, y debajo por un núcleo externo líquido formado principalmente por hierro y níquel. El espesor del manto es de 2900 km (véase la Figura 1). La temperatura es de 1000 °C cerca del límite con la corteza y de hasta 3700 °C en las zonas cercanas al núcleo externo. La presión llega a ser de 24 GPa (gigapascales), unas 237000 at (atmósferas), en la parte inferior del manto. La inmensa presión y las altas temperaturas hacen que las rocas del manto estén calientes y, en zonas profundas, estén parcialmente fundidas, lo que provoca un comportamiento plástico con variaciones en la viscosidad y densidad y, por lo tanto, éstas fluyen lentamente –en una escala de millones de años–.

Los estudios de geofísica (sismología) enfocados en el interior de la Tierra identifican varias capas que conforman el manto: el manto superior, una zona de transición y el manto inferior (véase la Figura 1). El manto superior abarca desde la superficie terrestre hasta los 410 km de profundidad. Dos subcapas dividen al manto superior con diferente densidad y viscosidad: la litosfera y la astenosfera. La primera abarca desde la superficie terrestre hasta los 100 km de profundidad, consta de roca sólida e incluye la corteza litosférica (corteza oceánica y continental) y el manto litosférico. La litosfera flota por encima de la astenosfera debido a su menor viscosidad, esto provoca un movimiento lento en las rocas de la litosfera y genera la actividad tectónica (sismos, formación de montañas y erupción de volcanes). Por otra parte, la astenosfera abarca desde los 100 hasta 410 km debajo

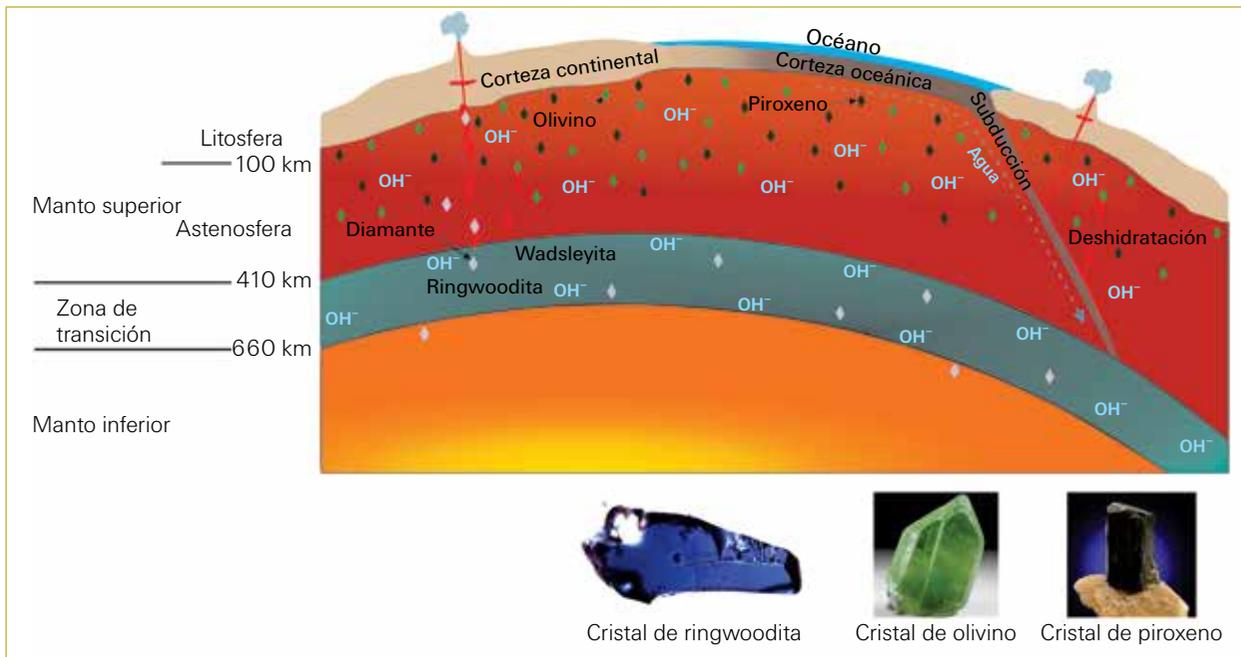


Figura 1. Se muestra la estructura del manto terrestre, con la ubicación y el espesor del manto inferior, la zona de transición y el manto superior. La zona de transición es abundante en hidroxilo; si se considera que 0.1% de esta zona es agua, habría tanta como en los océanos terrestres. La evidencia de agua en el manto se encuentra en minerales de ringwoodita incrustados en cristales de diamante, así como en minerales anhidros, como olivino y piroxeno (en el manto superior) con OH⁻ en su estructura molecular. En la parte inferior de la figura se muestran fotografías de cristales de ringwoodita (Joe Smyth, <www.mindat.org>), olivino y piroxeno (<www.minerals.net>).

de la superficie. La alta presión y la temperatura en esta zona generan rocas parcialmente fundidas que se comportan de forma dúctil o plástica.

Por debajo de la astenosfera está la zona de transición, donde el manto superior cambia gradualmente hasta el manto inferior. La zona de transición se localiza entre los 410 y 660 km debajo de la superficie. Las rocas en esta zona son densas debido a que sufren una transformación radical; no se funden ni desintegran a causa de la alta presión, sino que modifican su estructura cristalina.

Por debajo de esta zona, el manto inferior tiene una extensión de 660 a 2900 km debajo de la superficie. Ahí las rocas son más calientes que en el manto superior y la zona de transición; pero, aunque teóricamente el calor ablanda las rocas, la intensa presión mantiene al manto inferior en forma sólida.

■ El origen del agua en el manto

■ Diversas teorías explican el origen del agua en el manto. Una de ellas afirma que cuando la Tierra co-

menzó a formarse (hace unos 4500 millones de años) los minerales de hierro y níquel abandonaron el material fundido para formar el núcleo, y el material que se quedó rodeando al núcleo construyó el manto. Después de millones de años, el manto comenzó a enfriarse y el agua permaneció atrapada dentro de los minerales. El material fundido salió a la superficie en forma de lava por erupciones volcánicas; el agua que se encontraba en este material se **desgasificó**, lo cual provocó la formación de los océanos.

Existe otra teoría que relaciona el origen del agua en el manto con el proceso de subducción de placas. Las zonas de subducción son lugares donde dos placas tectónicas chocan una con otra. Una vez que se formaron los océanos, una placa tectónica densa (corteza oceánica), cargada de sedimentos marinos con agua, se desplazó por debajo de otra placa de menor densidad (corteza continental); cuando los minerales de la corteza que subduce entraron en el manto, sufrieron un proceso de deshidratación que permitió la entrada de agua y otros **volátiles**. De esta forma, toneladas de agua son transportadas al

Desgasificación

Escape de gases volcánicos hacia la atmósfera durante una erupción. Se libera dióxido de carbono, flúor, azufre, cloro y vapor de agua; este último es el gas más abundante en el proceso.

Volátiles

Gases disueltos en el líquido magmático. Cuando la presión disminuye, los volátiles se separan del líquido magmático y forman gases.

manto y retornadas a la atmósfera por el proceso de desgasificación por medio de erupciones volcánicas. Este ciclo —a escala geológica— es del orden de cientos de millones de años de duración.

la zona más profunda del manto también contiene agua; sin embargo, la ausencia de material físico de esta zona del manto no permite corroborarlo.

La presencia de agua en el manto tiene consecuencias petrológicas y volcánicas, pues rompe las estructuras de los minerales fácilmente, lo que afecta al proceso de fusión del manto (véanse la Figura 2 y el Recuadro 1). El material fundido o magma de este proceso asciende y eventualmente hace erupción en la superficie terrestre, y con ello forma volcanes. La fusión del manto ocurre durante millones de años a profundidades de entre 80 y 100 km. El descubrimiento de agua indica que el proceso de fusión del manto podría ocurrir en la zona de transición, debido a que el agua disminuye la temperatura de fusión. Así lo han demostrado estudios de laboratorio en rocas, puesto que para fundir un trozo de roca seca a una presión determinada se requieren aproximadamente 1000 °C, y si a esta misma roca se le agrega 0.1% de agua, la temperatura de fusión disminuye 100 °C.

■ **¿Dónde y en qué forma se encuentra el agua en el manto?**

Las diferentes zonas del manto contienen abundantes cantidades de agua, pero no en su forma común (líquida, sólida y gaseosa), sino atrapada en radicales de ion hidroxilo (OH^-) que forman parte de la estructura de los minerales característicos del manto superior, como el olivino y el piroxeno (Kovács, 2008), y en la zona de transición (véase la Figura 1), en minerales como ringwoodita y wadsleyita, que son minerales **polimorfos** de olivino, los cuales se han encontrado como **inclusiones** en diamantes (Schmandt y cols., 2014; Pearson y cols., 2014) a profundidades mayores de 610 km. La estructura del ensamble mineral del manto inferior sigue que

Polimorfos

Minerales que tienen la misma composición química, pero en condiciones diferentes de presión y temperatura cambian a una estructura cristalina diferente. El olivino modifica su estructura y se transforma en ringwoodita y wadsleyita.

Inclusiones

Pequeñas porciones líquidas, sólidas o gaseosas alojadas en un cristal. En este caso, se hace referencia a las inclusiones sólidas o diminutos cristales que fueron encapsuladas cuando cristalizó el mineral.

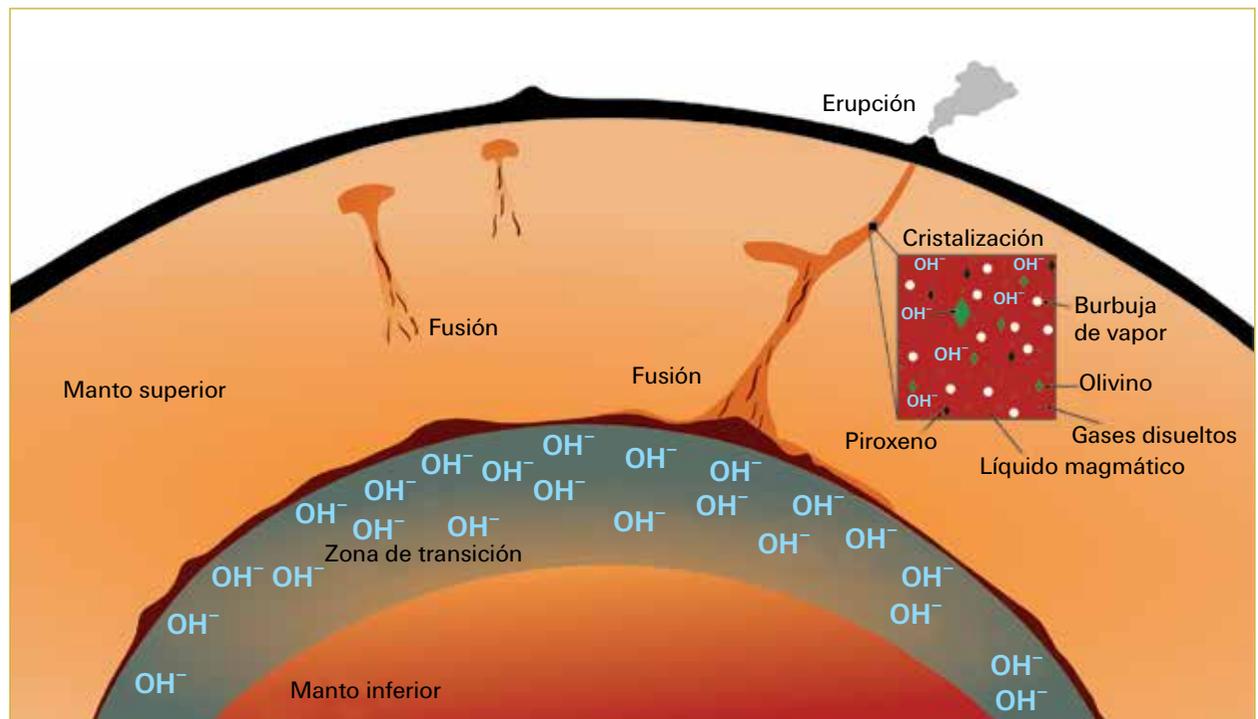


Figura 2. Fusión del manto e introducción de OH^- en los cristales de olivino y piroxeno del manto superior. El líquido magmático, producto de la fusión del manto, asciende a zonas someras del manto donde la presión y temperatura descienden, y ahí ocurre el proceso de cristalización. Durante la cristalización, el OH^- puede sustituir al Si^{4+} y entrar en la estructura molecular de los minerales olivino y piroxeno del manto superior. Los minerales salen a la superficie terrestre en las erupciones volcánicas y representan una pequeña muestra física del manto.

El líquido magmático, producto de la fusión en el manto, es una combinación de elementos químicos, entre los que destacan: silicio y oxígeno, aluminio, hierro, calcio, sodio, magnesio y potasio. El ascenso del líquido magmático (véase la Figura 2) hacia partes someras del manto, donde la presión y temperatura descienden, provoca que los átomos generen estructuras cristalinas complejas. El silicio y el oxígeno unidos por enlaces químicos forman una estructura conocida como tetraedro de silicio (véase el Recuadro 2). Cuando comienza el enfriamiento, los tetraedros se unen entre sí y se complementan con otros elementos químicos, para desarrollar minerales conocidos como silicatos. Por lo tanto, los minerales que cristalizaron de este líquido magmático, como olivinos y piroxenos, pueden tener concentraciones de hidroxilo en su estructura.

La clasificación de silicatos de acuerdo con la existencia de OH^- en su estructura molecular produce dos grupos: hidratados y anhidros. Los minerales hidratados tienen OH^- en su fórmula química y su concentración de agua es reportada en porcentaje en peso. En cambio, los minerales anhidros tienen trazas de OH^- y carecen de OH^- en su fórmula química (véase el Recuadro 3). Los piroxenos y olivinos que forman el manto, y sus polimorfos formados a alta presión y temperatura, son minerales anhidros y son los que contienen el mayor volumen de agua (en forma de OH^-) que existe en nuestro planeta.

La adición de OH^- en los minerales puede debilitar su estructura molecular o mantenerla estable. El hidroxilo es una molécula de agua incompleta que sólo necesita la adición de un protón para completarse y unirse a la estructura molecular en las condiciones en que cristaliza un mineral. Los enlaces de silicio-oxígeno (Si-O) que unen a los átomos en los silicatos pueden romperse debido a la presencia de agua, y el átomo de silicio puede quedar fuera de la estructura molecular. El espacio vacío que deja el catión de silicio (Si^{4+}) se reemplaza por hidrógeno: $\text{Si}^{4+} = 4\text{H}^+$, o bien una combinación de hidrógeno con otro átomo similar al silicio (radio iónico y carga iónica): $\text{Si}^{4+} = \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$, $\text{Si}^{4+} = \text{B}^{3+} + \text{H}^+$, $\text{Si}^{4+} = \text{Li}^{3+} + \text{H}^+$.

Recuadro 1. Fusión del manto y magma

La fusión del manto derrite parcialmente una roca sólida sometida a presión, y puede ocurrir por varios procesos: por un aumento de temperatura, por una disminución de la presión (las rocas, al descomprimirse, pueden fundirse, ya que aumentan su volumen y forma), o bien por la presencia de agua y otros volátiles (gases). El magma o material fundido consta de tres partes: una combinación de elementos químicos en solución –también llamado líquido magmático (forma líquida)–, cristales (forma sólida) y gases o volátiles (forma gaseosa).

Recuadro 2. Tetraedro de silicio

El tetraedro de silicio (SiO_4) tiene cuatro átomos de oxígeno y uno de silicio. Esta unidad representa la estructura cristalina base de los silicatos. Los silicatos o grupo de silicatos son una unión de varios tetraedros de silicio (véase la Figura 3). Cada tetraedro se une a otro en diferentes estructuras (anillos, cadenas simples y dobles o estructuras aisladas). Representan el mayor número de minerales existentes en la Tierra.

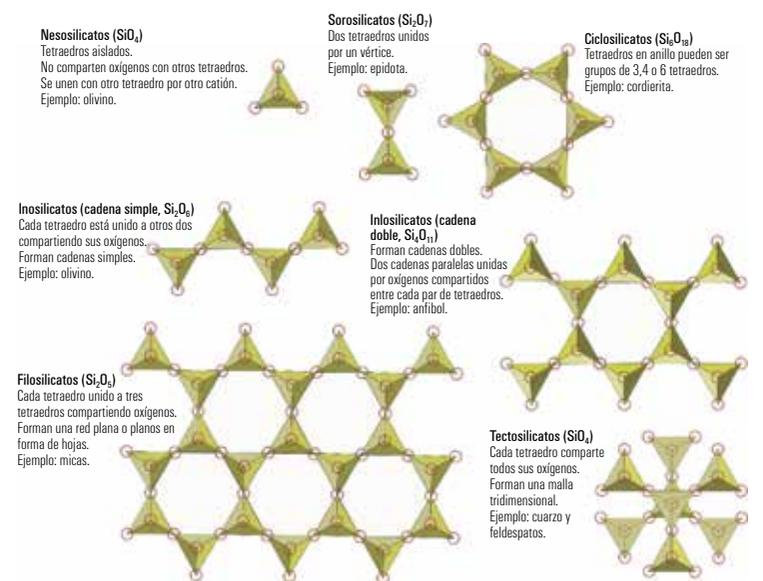


Figura 3. Grupo de los silicatos: tetraedros de silicio (triángulos color amarillo) y átomos de oxígeno (círculos color rojo). Estos minerales tienen como base estructural la unidad del tetraedro de silicio, la cual se repite y se une con otras al compartir electrones entre los oxígenos, lo que hace que se formen diferentes estructuras cristalinas: unidades aisladas, unidades dobles, anillos, cadenas simples, cadenas dobles, planos, así como estructuras tridimensionales. La composición química y propiedades físicas, mecánicas y eléctricas de cada silicato dependen de su estructura cristalina.

Recuadro 3. Fórmula química de olivinos y piroxenos

Las fórmulas químicas de los minerales anhidros carecen de hidroxilo (OH^-), como en el caso del olivino: $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$; y del piroxeno: $(\text{Ca, Mg, Fe, Mn, Na})(\text{Al, Fe, Mn, Cr, Ti})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$, pero contienen trazas de agua, al igual que la ringwoodita (Mg_2SiO_4) y la wadsleyita (Mg_2SiO_4) –estos últimos con mayores concentraciones de agua–; por lo tanto, algunos especialistas sugieren añadir el OH^- en las fórmulas químicas de estos minerales (Smyth y cols., 1991; Kovács y cols., 2010).

La técnica de infrarrojo en la identificación de OH^-

La técnica analítica que identifica el OH^- en las estructuras cristalinas de los minerales anhidros del manto es la espectroscopia de infrarrojo (véase la Figura 4). Mediante esta técnica se miden las vibraciones de los átomos unidos por enlaces químicos debido a la interacción con la luz de infrarrojo, la cual es parte del espectro de radiación electromagnética. Tres regiones espectrales dividen al espectro de infrarrojo entre longitudes de onda desde 33 hasta $12\,800\text{ cm}^{-1}$: infrarrojo lejano (de 33 a 400 cm^{-1}); infrarrojo medio (de 400 a $4\,000\text{ cm}^{-1}$), utilizado en componentes orgánicos e inorgánicos, como las mediciones de agua en minerales; e infrarrojo cercano (de $4\,000$ a $12\,800\text{ cm}^{-1}$).

El espectrómetro genera una luz infrarroja e interactúa con un cristal (mineral). Los átomos unidos por enlaces vibran a una frecuencia característica cuando son iluminados por la luz infrarroja; los enlaces en silicatos (Si-O) vibran a frecuencias entre $1\,500$ y $2\,100\text{ cm}^{-1}$, y los enlaces oxígeno-hidrógeno (O-H) vibran entre las frecuencias $3\,000$ a $3\,700\text{ cm}^{-1}$ (región OH). La luz de infrarrojo puede ser reflejada o absorbida por las vibraciones en los enlaces químicos. La absorción (cantidad de energía absorbida por la muestra) sirve para determinar el OH^- y las sustituciones con H^+ . Con esta técnica se obtiene un espectro que registra la cantidad de absorción de una muestra por cada longitud de onda; por lo tanto, cada especie de silicato genera un espectro diferente que lo identifica. Asimismo, los intercambios O-H por algún catión en la estructura del tetraedro de silicio también tienen una vibración diferente que produce en el espectro un pico de absorción en la región OH. El pico en una longitud de onda dada indica el elemento que está sustituyendo al silicio, y el área por debajo de ese pico indica la concentración de OH^- (véase la Figura 4).

Durante más de 30 años, las investigaciones con espectroscopia de infrarrojo han detectado numerosas sustituciones en la estructura molecular de los minerales anhidros. Las sustituciones más sencillas de explicar ocurren en minerales del manto como el olivino y el piroxeno:

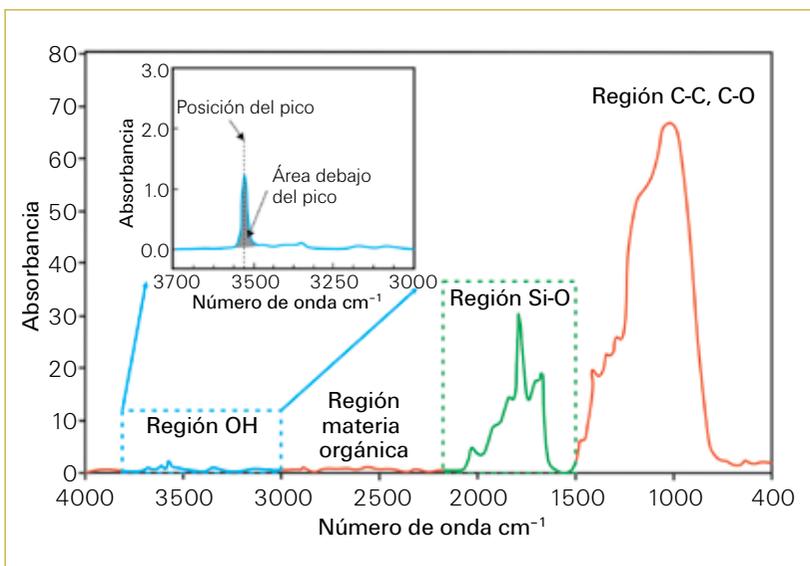


Figura 4. La región del espectro de infrarrojo se encuentra entre las longitudes de onda desde 400 hasta $12\,800\text{ cm}^{-1}$. Para determinar la presencia de OH^- en cristales se utiliza una porción de este espectro (infrarrojo medio: 400 a $4\,000\text{ cm}^{-1}$). La figura presenta el espectro en absorbancia de un cristal de olivino. En el espectro se pueden identificar distintas zonas: 1) la región relacionada a los enlaces carbono-carbono (C-C) o carbono-oxígeno (C-O) por lo general no es usada (500 a $1\,500\text{ cm}^{-1}$); 2) la zona en color verde está relacionada con los silicatos o enlaces silicio-oxígeno (Si-O) que tienen frecuencias de vibración entre $1\,500$ y $2\,100\text{ cm}^{-1}$; 3) la región donde se encuentran los enlaces con elementos como carbono, nitrógeno, oxígeno y carbono-hidrógeno (C-H) están relacionados a la materia orgánica presente en la muestra (de $2\,000$ a $2\,500\text{ cm}^{-1}$); y 4) en la región de color azul es donde se dan sustituciones oxígeno-hidrógeno (O-H) (región OH; de $3\,000$ a $3\,700\text{ cm}^{-1}$). Los intercambios de O-H por algún catión en la estructura del tetraedro de silicio tendrán una vibración característica en la región OH; el número de onda donde ocurre el pico indicará qué elemento está sustituyendo al silicio y el área por debajo (en gris) de ese pico será la concentración de OH^- .

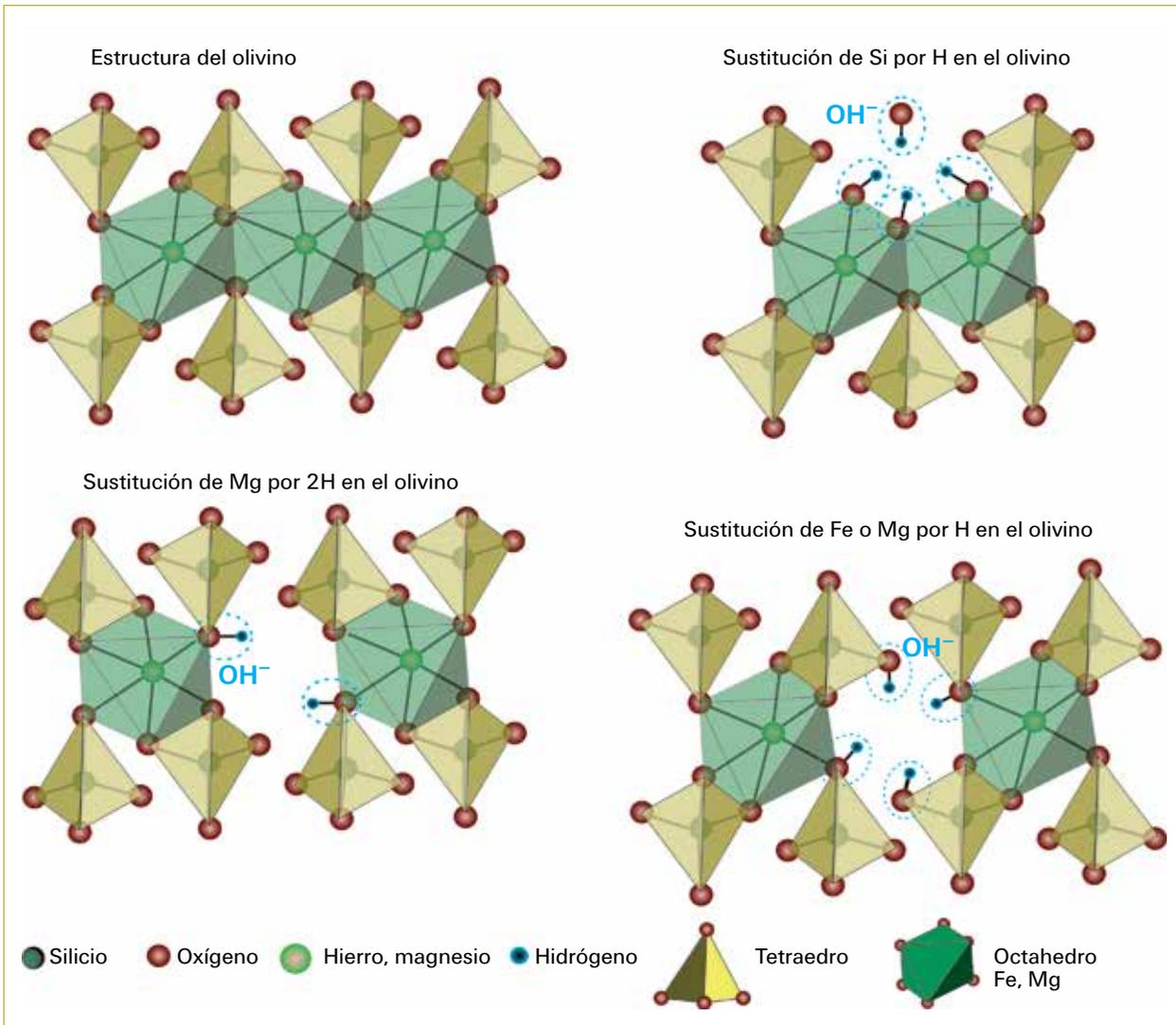


Figura 5. Estructura del olivino, formado por tetraedros aislados que están unidos por otros átomos, como el hierro y el magnesio. Estos átomos están rodeados por seis oxígenos, por lo que forman un octaedro. En la estructura cristalina del olivino ocurren sustituciones de H^+ complejas que resultan difíciles de imaginar; sin embargo, pueden ocurrir sustituciones por $Si^{4+} = 4H^+$, o alguno de los elementos de hierro o magnesio que forma un octaedro pueden ser reemplazados por $2H^+$ o $4H^+$ y, de igual forma, ocurrirá una compensación de carga en la cual se presentará el ion hidroxilo.

Las estructuras de tetraedros aislados desarrollan al olivino (véase la Figura 5), y éstos están unidos por otros átomos, como el hierro y el magnesio, rodeados por seis oxígenos en un octaedro.

Las estructuras de cadenas simples de tetraedros forman el piroxeno; los tetraedros comparten átomos de oxígeno entre sí formando una cadena, y los átomos de hierro o magnesio (octaedros) unen dos cadenas de tetraedros.

Aunque en el piroxeno ocurren sustituciones por hidroxilo (Skogby y Rossman, 1989), la estructura

simple del olivino permite ejemplificar las sustituciones complejas por OH^- (Kovács y cols., 2010) en las cuales el Si^{4+} puede ser sustituido por $4H^+$ (véase la Figura 5), así como también los átomos de hierro y magnesio pueden ser sustituidos por H^+ para generar los iones hidroxilo.

En México, diversos grupos de investigación han aplicado la espectroscopia de infrarrojo para caracterizar minerales y el contenido de agua en **inclusiones magmáticas**. Desde 2018, con el apoyo del proyecto GEMEX, el grupo de Petrología del Instituto

Inclusiones magmáticas

Dentro de los minerales, pequeñas burbujas que contienen gases y líquidos magmáticos que fueron atrapados cuando ocurrió la cristalización. Idealmente, representan la composición del líquido magmático del que provienen los minerales.

Recuadro 4. El agua en los minerales está en forma de OH⁻

Resulta imposible extraer y convertir el hidroxilo (OH⁻) de los minerales en agua líquida para el consumo humano. Aunque son millones y millones de cristales en el manto con OH⁻ en su estructura molecular, es energéticamente inviable extraer el agua de los cristales, además de que no tenemos acceso a porciones abundantes del manto.



de Geofísica, Unidad Michoacán, de la Universidad Nacional Autónoma de México, fue el primero en Latinoamérica en usar esta técnica analítica para detectar OH⁻ en cristales anhidros (cuarzos y feldespatos) de depósitos volcánicos, como **ignimbritas**. Los minerales de estos depósitos pueden perder su contenido de OH⁻ por procesos de deshidratación, pero la concentración de hidroxilo retenida en los cristales puede variar desde la base hasta la cima del depósito. Si el comportamiento del OH⁻ es homogéneo entre distintos niveles verticales, indica una sola erupción; si es heterogénea y varía en distintos horizontes verticales, sugiere varias erupciones.

Ignimbrita

Roca volcánica formada por el depósito de un flujo piroclástico; esto es, una nube densa caliente que contiene ceniza, fragmentos de rocas, gases y pómez (roca vesicular de vidrio volcánico), producto de una erupción volcánica explosiva.

■ ¿Cuál es la cantidad de agua en el manto?

■ Los piroxenos y olivinos pueden contener desde 60 hasta 400 ppm de OH⁻ (Qiu y cols., 2018), mientras que los polimorfos de olivino contienen hasta 1.5% de OH⁻ (Pearson y cols., 2014). Mediante estudios realizados con espectroscopia de infrarrojo en minerales de olivino del manto superior se ha calculado que dentro de su estructura molecular pueden existir hasta 400 ppm de agua (H₂O) (Qiu y cols., 2018). La concentración de agua estimada en estudios de conductividad eléctrica en combinación con estudios de petrología experimental en minerales es de <0.09% H₂O en el manto superior y 0.1% H₂O en la zona de transición (Pearson y cols., 2014). Ahora, considerando que la masa del manto superior y de la zona de transición (615 y 415 × 10²¹ kg, respectiva-

mente) tiene en conjunto 0.1% de agua, la masa de agua que habría en unos cuatrillones de minerales anhidros (como olivinos, piroxenos y ringwoodita), comparada con la masa de agua en los océanos, sería de uno hasta cinco océanos terrestres juntos (Genda, 2016).

Sin embargo, recordemos que ésta no es agua líquida como la de los océanos, pues las estimaciones se basan en el supuesto de que los OH⁻ se podrían unir y formar H₂O, pero ya sabemos que esto es imposible debido a que están en la estructura de los minerales (véase el Recuadro 4). La concentración de agua en el manto es difícil de determinar de manera exacta, puesto que es inasequible muestrear físicamente el manto —extraer un pedazo de roca—; no obstante, las erupciones volcánicas proveen conductos para que algunos de los millones de minerales del manto ocasionalmente lleguen a la superficie terrestre en forma de **xenolitos** incrustados en lavas, y éstos nos proporcionen evidencia de la concentración de hidroxilo del manto.

Xenolitos

Fragmentos de roca que quedan atrapados cuando el magma asciende a la superficie.

■ Implicaciones de la presencia de agua en el manto

■ La estructura molecular de los minerales posee la evidencia de que existe agua en el manto, en forma abundante, en la zona de transición y el manto superior. Como mencionamos, no es el agua común y corriente que podemos beber en un vaso, sino que se

encuentra en forma de hidroxilo y ocupa o sustituye espacios entre los átomos de los cristales. Pero el hecho de encontrar agua en el manto, en una cantidad mayor a la de los océanos terrestres, significa que se modifiquen sus propiedades físicas: aumenta o disminuye la velocidad de las ondas sísmicas; también disminuye su conductividad y viscosidad; debilita la estructura molecular de los minerales; reduce la temperatura de fusión; cambia la viscosidad y densidad de las rocas. Además, la presencia de agua afecta la forma en que hacen erupción los volcanes, ya que si un magma tiene muchos volátiles disueltos, como el agua, provocará erupciones muy potentes que ponen en peligro la vida de los seres vivos y la infraestructura social. Estos factores influyen en la dinámica del manto y, por ende, modelan la superficie e impactan de manera indirecta en la forma en que conocemos y habitamos la Tierra.

Los autores agradecemos al proyecto del Fondo de Sustentabilidad Energética del Conacyt-Sener (2015-04-268074), en particular al subproyecto PT 4.4 por las facilidades otorgadas; asimismo, a la M. C. Nancy Magaña García por sus valiosos comentarios y por la revisión cuidadosa que ha realizado de este texto.

Juan Daniel Pérez Orozco

Posgrado en Ciencias de la Tierra, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México.

juandan.perez@gmail.com

Giovanni Sosa Ceballos

Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México.

giovannis@igeofisica.unam.mx

José Luis Macías Vázquez

Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México.

jlmacias@igeofisica.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Genda, H. (2016), "Origin of Earth's oceans: An assessment of the total amount, history and supply of water", *Geochemical Journal*, 50(1):27-42.
- Kovács, I. (2008), Water in the nominally anhydrous minerals of the upper mantle: Analytical and experimental developments (tesis de doctorado), Canberra, Australian National University. Disponible en: <<https://openresearch-repository.anu.edu.au/handle/1885/109960>>, consultado el 19 de mayo de 2020.
- Kovács, I., H. S. C. O'Neill, J. Hermann y E. H. Hauri (2010), "Site-specific infrared OH absorption coefficients for water substitution into olivine", *American Mineralogist*, 95(2-3):292-299.
- Pearson, D. G., F. E. Brenker, F. Nestola, J. McNeill, L. Nasdala, M. T. Hutchison y B. Vekemans (2014), "Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond", *Nature*, 507(7491): 221-224.
- Qiu, Y., H. Jiang, I. Kovács, Q. K. Xia y X. Yang (2018), "Quantitative analysis of H-species in anisotropic minerals by unpolarized infrared spectroscopy: An experimental evaluation", *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 103(11): 1761-1769.
- Schmandt, B., S. D. Jacobsen, T. W. Becker, Z. Liu y K. G. Dueker (2014), "Dehydration melting at the top of the lower mantle", *Science*, 344(6189):1265-1268.
- Skogby, H., y G. R. Rossman (1989), "OH⁻ in pyroxene; an experimental study of incorporation mechanisms and stability", *American Mineralogist*, 74(9-10): 1059-1069.

Pedro Medina Rosas

El coral que nunca existió

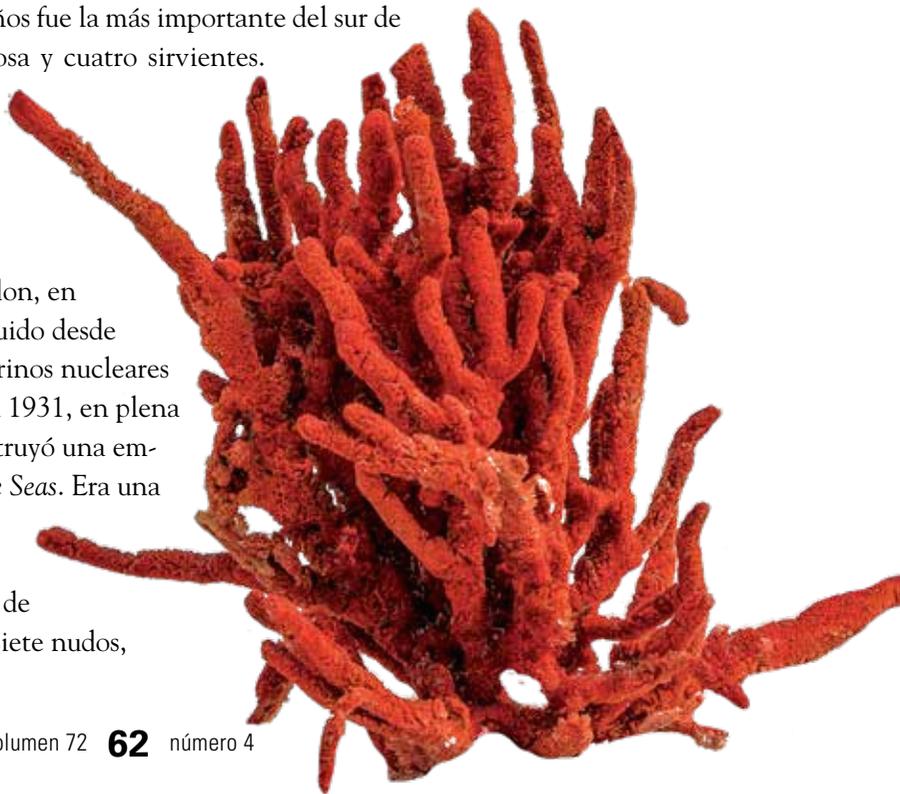
Éste es el relato de la descripción de un coral arrecifal que se recolectó en las Islas Marías hace casi 60 años, durante una expedición por el Golfo de California. Fue el último crucero científico en esta región organizado por extranjeros. Sus aportaciones a la ciencia siguen vigentes, aunque algunas se han actualizado. En esta historia el principal ganador es el conocimiento científico.

El empresario

Harry J. Bauer, nacido en 1880, era un abogado que vivía en Pasadena, California, a unas cuadras del California Institute of Technology (Caltech), donde fue miembro de la Junta Directiva por más de 30 años. Su gran fortuna provenía de sus empresas, como Southern California Edison, la compañía de electricidad que durante años fue la más importante del sur de ese estado. Vivía con su esposa y cuatro sirvientes. Era aficionado al mar y a los caracoles. Y tenía un barco.

El barco

En el astillero de New London, en Connecticut, se han construido desde barcos pequeños hasta submarinos nucleares por más de cien años, pero en 1931, en plena Gran Depresión, sólo se construyó una embarcación, nombrada *Sapphire Seas*. Era una goleta de 31 metros de eslora que podría alcanzar casi 10 nudos de velocidad. Este tipo de barcos en promedio viajan a siete nudos,



pero los de competencias pueden llegar a 15 o incluso 20 nudos. Se diseñó con una capacidad para ocho pasajeros más siete tripulantes.

En 1933, Harry Bauer pagó 35 000 dólares por el *Sapphire Seas*, y lo cambió de océano, del Atlántico al Pacífico, así como de nombre: ahora se llamaría *Puritan*. Debido a la Segunda Guerra Mundial, Bauer lo vendió por un dólar, el mismo día del ataque a Pearl Harbor, en Hawái, el 7 de diciembre de 1941. El barco estuvo patrullando la costa de California durante la guerra y, una vez terminada, el empresario lo recuperó, remodeló y disfrutó hasta sus últimos días.

Dos años después de la muerte de Bauer, el *Puritan* se subastó y pasó por varios dueños, quienes lo aprovecharon, abandonaron y remodelaron en diferentes etapas. En la década de 1970 se le pudo ver amarrado durante algunos meses en un muelle de Acapulco. Actualmente es propiedad de la compañía The Classic Yacht, que lo ofrece para navegar por las aguas del Mediterráneo, por el módico precio de 50 000 euros por una semana (más de un millón de pesos).

En 1957, con 73 años de edad, Bauer hizo una invitación al American Museum of Natural History (AMNH) de Nueva York para usar el barco como base de operaciones para investigaciones científicas. A lo largo de la historia pocas embarcaciones (o más bien dicho, sus dueños) han hecho algo similar en el mundo. En la actualidad, ejemplos como el de la Fundación Living Oceans, del príncipe Khaled bin Sultan de Arabia Saudita, con el barco *Golden Shadow*, siguen siendo escasos. En México, aunque no por falta de barcos, estas iniciativas brillan por su ausencia.

El científico

 Donald F. Squires empezó a trabajar a los 28 años en el AMNH, después de terminar el doctorado en la Universidad Cornell en 1955. Ahí mismo había estudiado la carrera y, aunque hizo la maestría en Kansas, volvió a su *alma mater* para obtener el doctorado. Después de estar siete años en el AMNH, trabajó en el National Museum of Natural History (NMNH)

del afamado Smithsonian Institute, en Washington, DC. Estudiaba invertebrados, principalmente corales, pero también estaba muy interesado en aplicar la informática en las colecciones científicas mediante el desarrollo de herramientas que aún hoy se utilizan en el Smithsonian Institute, cuyas colecciones incluyen varios millones de ejemplares. La producción de Squires consta de más de 70 publicaciones sobre corales, tanto fósiles como recientes, así como artículos relacionados con la informática y las colecciones científicas.

El asistente

 A finales de 1956, después de terminar el servicio militar en Maryland, y sin tiempo para inscribirse a un posgrado, Oakes Plimpton, de Massachusetts y con 24 años, se presentó en el AMNH con el propósito de pedir una oportunidad para cumplir su sueño de participar en una expedición del museo (el sueño de muchos niños y visitantes que recorren ese recinto). Un mes después, lo llamaron para ser el asistente científico de una expedición en México. No recibiría ningún salario y no iría al Congo Belga, como él había imaginado, pero la propuesta sonaba emocionante de cualquier forma. Aunque carecía de formación científica, ya que había terminado la carrera de estudios americanos, era maduro, inteligente y fuerte (cualidades indispensables para ayudar en toda expedición). Después de unas semanas de preparación, Plimpton logró empacar todo el material necesario para el viaje en 15 cajas que se enviaron desde Nueva York hasta California.

La expedición

 El martes 5 de marzo de 1957, el *Puritan* zarpó del muelle de Newport, California, al sur de Los Ángeles, con el objetivo de recolectar y estudiar diversos animales de las islas del Golfo de California, en particular mamíferos, reptiles, anfibios e invertebrados terrestres y marinos. La expedición sería conocida como Puritan-AMNH, o simplemente Puritan. Squires la definió como el primer crucero de la historia por el Golfo de California enfocado en corales. Hoy



El *Puritan* en 2017. Foto: Jule Antea Walkowiak (CC BY-SA 2.0).

en día, alquilar un barco mexicano para un viaje de investigación en dicha zona cuesta unos 30 000 dólares por semana, y si se desea realizar un recorrido más o menos completo y detallado, se requieren al menos tres semanas; es decir, más de 2 millones de pesos.

En la expedición participarían cinco científicos con diferentes intereses: William Emerson, malacólogo (especialista en moluscos) y líder de la expedición; Richard Van Gelder, enfocado en mamíferos terrestres, principalmente roedores y murciélagos; Richard Zweifel, dedicado a estudiar reptiles, particularmente serpientes; John Soule, especializado en briozoarios (animales que pueden confundirse con algas marinas); y Donald Squires, paleontólogo interesado en corales fósiles y recientes. Todos provenían de Nueva York, y trabajaban en el AMNH, excepto Soule, quien trabajaba en la Universidad del Sur de California. Entre todos se ayudaban a la hora de realizar las búsquedas y recolectas, y, aunque algunos no nadaban, siempre contaron con el apoyo de Oakes Plimpton, quien hacía grandes esfuerzos

por recolectar lo más posible, tanto en tierra como en el mar.

El *Puritan* emprendió el viaje desde California siguiendo la costa occidental de Baja California para llegar a la punta de la península y dirigirse hacia el sur. Del 23 de marzo al 9 de abril de 1957 permanecieron en las Islas Marías, donde una tormenta impidió realizar los movimientos planeados, aunque los científicos tuvieron la oportunidad de buscar organismos en la playa, así como en las partes terrestres y marinas de las islas. Después hicieron una breve parada en la isla Isabel. En esta primera etapa, también iba a bordo el dueño del *Puritan*, Harry Bauer, pero todavía no iban Donald Squires ni John Soule, quienes embarcaron el 10 de abril en Mazatlán, Sinaloa, donde se bajó Bauer. A continuación partieron hacia el interior del Golfo de California, para recorrerlo hasta el norte. Al final de la expedición, el barco había navegado más de 4 000 millas.

Sin embargo, el trabajo científico no acaba al final del viaje; de hecho, inicia otra etapa, más larga que la propia expedición, con muchas horas en el laboratorio y más horas para elaborar los reportes. Una vez que regresaron a Nueva York, Squires trabajó en la revisión de los corales y publicó los resultados, en 1959, en el boletín del AMNH. Científicamente, la expedición fue un éxito; hasta 1965 en total se publicaron 13 trabajos con resultados de los estudios por el Golfo de California, incluidos varios específicos de las Islas Marías.

Las Islas Marías

Frente a Nayarit, a unos 100 kilómetros de la costa, se encuentran cuatro islas; de norte a sur, están San Juanito y luego las tres Marías: Madre, Magdalena y Cleofas, en ese orden. El archipiélago es conocido como las Islas Marías, las cuales empezaron a adquirir cierta importancia en el siglo pasado, cuando fueron decretadas Colonia Penal Federal por Porfirio Díaz en 1905. Es tanta su relevancia ecológica que, en 2000, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) las declaró Reserva de la Biósfera; y también forman parte del Patrimonio Natural Mundial de la Humanidad, registrado

por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco).

El establecimiento de la colonia penal y el acceso restringido a lo largo del siglo pasado permitió un cierto grado de conservación de la diversidad isleña. Los diferentes hábitats de las islas, tanto terrestres como marinos, son frágiles y albergan una riqueza particular, por su relevancia en el sentido biológico, pero también económico, científico y cultural. En ellas habitan especies endémicas, como el loro cabeza amarilla (*Amazona oratrix tresmariae*), y también animales en peligro de extinción, como la tortuga marina verde (*Chelonia mydas*).

Los nombres científicos

 Para poder determinar los nombres científicos de las especies (esas palabras que se escriben en latín y cursivas) y su categoría de endémicas, es decir, que únicamente se encuentran en cierto lugar, se requiere seguir un proceso establecido hace casi tres siglos. La ciencia se basa en el conocimiento acumulado y organizado de la naturaleza, por lo que, cuando alguien descubre un organismo por primera vez, tiene que seguir varios pasos antes de poder afirmar que se trata de cierta especie o, algunas veces, de una especie nueva, que no se había visto ni descrito previamente.

Por ejemplo, para identificar un ejemplar de coral (o algún otro animal), hay que compararlo con otros similares, consultar las descripciones de las especies, revisar las publicaciones donde se haya mencionado, así como toda la información que permita confirmar que definitivamente ese animal es una especie determinada; y si no es así, será una nueva especie para la ciencia. Para completar este paso, se requiere realizar una publicación con suficiente información para que otra persona la pueda identificar. Eso incluye la descripción tanto macroscópica como microscópica, las características principales, y si es con imágenes tanto mejor, así como la ubicación donde se ha observado. Además, se requieren varios ejemplares de la especie para poder describir su variabilidad. Para comparar y confirmar de mejor manera la descripción, algunos científicos incluyen



Loro cabeza amarilla, Islas Mariás (*Amazona oratrix tresmariae*). Foto: Juan Cruzado Cortés (CC BY-SA 4.0).

también las diferencias con otras especies similares o cercanas.

Pero tal vez el paso más humano e íntimo de la ciencia es el hecho de bautizar a una especie, ponerle el nombre con el que se le inmortalizará, en honor a algo o alguien. Existen casi 2 millones de especies registradas por el proyecto *Catalogue of Life*, la base de datos más grande de organismos vivos del planeta. Eso significa que, a lo largo de la historia, se ha nombrado a cada una de las especies de acuerdo con alguna característica relevante, o incluso en honor a alguien, ya sean familiares, amistades o incluso personajes de película. Con tal cantidad de especies, existen miles de ejemplos interesantes y disparatados de nombres científicos, sobre los cuales se han escrito y se podrán seguir escribiendo libros enteros.

En esta historia se honró a la persona que patrocinó y permitió realizar la expedición científica: Harry Bauer. Sólo por este viaje, siete especies de animales fueron nombradas en su honor por los científicos que participaron en la expedición: *Membraniporella baueri* es un briozoario nombrado por Soule; *Hypsiglena torquata baueri* es una subespecie de culebra nocturna descrita por Zweifel; *Bauerus* es un subgénero de murciélagos bautizado por Van Gelder; *Vaejovis baueri* y *V. puritanus* son escorpiones nombrados por Gertsch (quien no iba en la expedición, pero también trabajaba en el AMNH); *Niso baueri*, un caracol de 3 milímetros, lo describió Emerson; y



Tortuga marina verde (*Chelonia mydas*). Foto: Charlie Shuetrim (CC BY-NC).

la séptima especie corrió a cargo de Squires: el coral *Porites baueri*.

■ El coral

■ Los corales son animales de gran relevancia ecológica que pueden construir estructuras llamadas arrecifes, las cuales, después de cientos o miles de años, llegan a alcanzar grandes dimensiones. En las aguas tropicales de todo el mundo se pueden encontrar ecosistemas arrecifales de varios cientos de metros o incluso kilómetros.

México se ubica entre dos océanos, mientras que el Trópico de Cáncer divide casi por la mitad al territorio nacional, lo que ha hecho posible que existan arrecifes en ambas costas. En el Caribe mexicano, donde se encuentra una parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (la barrera de arrecife más grande de América), el ecosistema coralino es más antiguo y diverso. En cambio, en el litoral del Pacífico el desarrollo arrecifal es incipiente, por lo que hay pocos lugares donde los corales han logrado crecer sobre su esqueleto por cientos de años, hasta llegar a construir una estructura por ellos mismos, uno de los criterios que define a un arrecife.

Uno de los principales arrecifes del Pacífico mexicano se encuentra en el Golfo de California, en Cabo Pulmo. Unos años antes de la expedición, en 1940, lo habían visitado dos amigos: uno ganaría el

Nobel de Literatura en 1962, y el otro se convertiría en un biólogo reconocido por sus novedosas ideas y el libro *Between Pacific Tides* (*Entre mareas del Pacífico*, publicado por primera vez en 1939), considerado un clásico. John Steinbeck y Ed Ricketts, respectivamente, describieron en el libro *Sea of Cortez: A Leisurely Journal of Travel and Research* (*Por el mar de Cortés*, con varias ediciones desde 1951) su recorrido por el Golfo de California: un relato apasionado sobre la aventura que vivieron por casi un mes, con las descripciones de los diferentes ambientes costeros que visitaron a bordo del barco sardinero *Western Flyer*. Las emotivas narraciones de ese libro estaban en la mente de Squires, así como de los otros miembros de la expedición, cuando navegaban en el *Puritan*.

Durante la escala en las Islas Marías, los investigadores recibieron la ayuda del personal de la prisión federal, e incluso de los prisioneros, como guías y en las recolectas. Gracias a esta expedición, llegaron más de 200 ejemplares de corales al AMNH. Como vimos, Squires nunca visitó las Islas Marías, ya que se embarcó más tarde en Mazatlán, y de ahí el barco se internó en el Golfo de California. Esto significa que los corales de las islas fueron recolectados por Plimpton, y Squires tal vez los vio por primera vez en el barco, o incluso cuando ya se encontraba en Nueva York. Una vez que analizó los ejemplares, Squires confirmó que en el Golfo de California se habían logrado encontrar 13 especies de corales, una de las cuales nunca se había registrado. Por lo tanto, procedió a describirla y nombrarla; al igual que sus colegas, eligió honrar a Bauer con el nombre científico de esta especie.

■ El coral que nunca existió

■ En su reporte, Squires escribió que se requieren grandes cantidades de ejemplares para estudiar los corales arrecifales. Como sucede cada vez que se describe una especie, es necesario contar con numerosos ejemplares, ya que así se podrán realizar suficientes comparaciones y tomar en cuenta su variabilidad natural. Una de las características de los corales en general es su gran plasticidad: una misma especie

puede presentar una gran variación en la forma de su colonia.

Sin embargo, para describir a *Porites baueri*, Squires sólo consideró tres fragmentos, lo cual es una muestra insuficiente. Aunque para Squires este coral no era endémico, posteriormente se llegó a considerar como tal porque en ningún otro lugar se pudo documentar su existencia, y eso llegó a provocar controversias. Así, impulsados por el afán de entender más sobre *P. baueri* y motivados por la idea de contar con más ejemplares de la especie, se organizaron dos expediciones mexicanas para realizar búsquedas en las Islas Marías en 2007. A pesar de los esfuerzos, no se logró encontrar indicio alguno de *P. baueri*. De esta manera surgió la duda sobre su validez e incluso su existencia.

El coral que sí era

 Para tratar de entender la confusión con respecto a esta especie, un equipo de investigadores de diferentes universidades realizamos una revisión exhaustiva mediante la comparación de un centenar de ejemplares de las seis especies de *Porites* presentes en México, por medio de mediciones milimétricas de diferentes estructuras morfológicas del esqueleto de los corales. A partir de los análisis estadísticos de estos datos, finalmente pudimos confirmar que *P. baueri* es en realidad una especie que ya existía, la cual había sido descrita como *P. lobata* por James Dana en 1846.

¿Qué sucede cuando una especie es en realidad otra que ya existe? Se trata de un caso de sinónimo taxonómico. Según la Real Academia Española, dos palabras son sinónimas si tienen el mismo significado o uno muy parecido. En biología, el nombre de una especie se convierte taxonómicamente en sinónimo de otro cuando resulta que son la misma. Eso significa que *Porites baueri* es sinónimo de *Porites lobata*.

El análisis realizado con todas las especies de *Porites* que se encuentran en México, incluido *P. baueri*, confirmó que la especie de las Islas Marías que describió Squires en realidad era una que ya existía, pero que muy probablemente él nunca llegó a ver en vivo. El coral *P. lobata*, al ser un animal

tropical, tiene su límite de distribución hacia el norte, precisamente en esa parte de México; hacia el sur llega hasta Guerrero, pero también se encuentra en Centroamérica y hasta en las Galápagos.

Una nueva etapa en la historia de los estudios de corales en México

 Con esta confirmación, se terminan casi 60 años de existencia de una especie válida y se aclara la confusión taxonómica. Esta investigación, que acaba de ser publicada en *Zootaxa*, una revista especializada en taxonomía de animales, la realicé en colaboración con Héctor Reyes, de la Universidad Autónoma de Baja California Sur, y Andrés López, de la Universidad Autónoma Metropolitana de la Ciudad de México, colegas investigadores mexicanos de la etapa más reciente de la historia de los estudios de corales de esta región.

Después de la expedición Puritan, solamente Robert Parker visitó el Golfo de California entre 1958 y 1961; aunque se centró en moluscos, también hizo breves anotaciones sobre corales. Ese fue el último estudio realizado por extranjeros en el Pacífico mexicano. La primera expedición a cargo de mexicanos en la región fue realizada en 1960 por un grupo de la Universidad Nacional Autónoma de México, en la isla Socorro (parte de las islas Revillagigedo). En ese esfuerzo se incluyeron algunas menciones de los corales y se marcó el inicio de una nueva etapa de los estudios sobre corales arrecifales en la región, ahora caracterizada por investigaciones realizadas principalmente por científicos y estudiantes mexicanos. En el caso de las Islas Marías, sin embargo, nadie volvió a estudiar los corales hasta finales del siglo pasado, cuando en 1997 se visitaron las dos islas del norte del archipiélago y en 2007 se exploraron todas las islas.

Hasta mediados del siglo pasado, se habían registrado menos de 20 especies de corales arrecifales en el Pacífico mexicano. Actualmente, en esta región se han logrado registrar 34 especies válidas de corales arrecifales (ya sin *P. baueri*). Esperamos que durante esta etapa de estudios se sigan produciendo nuevos resultados y se incorporen más participantes.

■ **Epílogo**

■ La condena del sinónimo taxonómico de una especie es que no deja de existir, pero como no es válida, nadie la usará. Por eso es importante contar esta historia, para que nunca se olvide el esfuerzo que implicó llegar a describir una especie de coral de las Islas Marías, en todos sentidos, no sólo el biológico. Sin lugar a duda, en los diferentes ecosistemas del Golfo de California hay todavía mucho por explorar e investigar, así como lo afirmaba Squires hace más de 60 años.

En estas seis décadas han pasado muchas cosas en el mundo, y en lo que se refiere a los arrecifes corallinos no se puede decir que hayan sido muy buenas. Se ha perdido más de la tercera parte de los arrecifes del planeta y, de seguir con el ritmo actual, a mediados de este siglo otra tercera parte dejará de existir sin haber sido estudiada o entendida adecuadamente. Por otro lado, recientemente las Islas Marías dejaron de ser la última isla prisión de América y ahora se encuentran despobladas, libres de presos y en espera de lo que siga.

Harry Bauer murió en 1961, un par de años después de saber que tenía varias especies nombradas en su honor, y contento con la expedición que patrocinó. Donald Squires murió en 2017, el día que cumplía 90 años, en Tasmania. Su publicación más citada es el trabajo en el que presentó los resultados sobre los corales de la expedición Puritan. Por otra parte, Oakes Plimpton, quien colectó los corales en

las Islas Marías, actualmente tiene 87 años y es el único participante de la expedición que aún vive. En uno de los mensajes que intercambiamos, me dijo que sin duda la expedición a bordo del *Puritan* fue algo muy importante para su vida.

Pedro Medina Rosas

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Puerto Vallarta, Jalisco.
pedromedinarosas@gmail.com

Lecturas recomendadas

- López-Pérez, A. *et al.* (2016), "The coral communities of the Islas Marias archipelago, Mexico: structure and biogeographic relevance to the Eastern Pacific", *Marine Ecology*, 37: 679-690.
- Medina-Rosas, P., A. López-Pérez y H. Reyes-Bonilla (2020), "The putative endemic Mexican reef coral *Porites baueri* Squires 1959 (Scleractinia: Poritidae) is a synonym of the widespread coral *Porites lobata* Dana 1846", *Zootaxa*, 4816 (2): 235-246.
- Plata, L. J. (2019), *El curioso caso de la especie sin nombre. Anécdotas taxonómicas de muy diversos géneros*, Guadalajara, Editorial Universitaria (UdeG).
- Revueltas, J. (1941), *Los muros del agua*, Ciudad de México, Ediciones Era.
- Sheppard, C. (2014), *Coral reefs. A very short introduction*, Oxford, Oxford University Press.
- Steinbeck, J. y E. F. Ricketts (1941), *Sea of Cortez: A Leisurely Journal of Travel and Research*, Nueva York, The Viking Press.

Combustibles solares

Los combustibles solares son una alternativa para contrarrestar el problema del cambio climático; para producirlos se emplea energía solar y materiales semiconductores. En este artículo se describe el fenómeno de fotocátalisis y su importancia para la obtención de combustibles solares a partir de CO_2 . Al final, se aborda la situación actual de este campo de estudio y sus perspectivas de desarrollo.

Introducción

Las fuentes de suministro energético en el mundo son principalmente aquellas no renovables, como los combustibles fósiles. Cada año las cifras de consumo energético aumentan, y al mismo tiempo crece la generación de contaminantes atmosféricos como los gases de efecto invernadero; en especial, el dióxido de carbono (CO_2). Estos gases provocan varios problemas simultáneos, relacionados con el incremento de la temperatura en el planeta; lo anterior trae como consecuencia el derretimiento de los polos, así como la desaparición de varias especies de plantas y animales.

Para contrarrestar esta situación existen diversas tecnologías de mitigación del CO_2 , como su captura y almacenaje en depósitos subterráneos; sin embargo, esta práctica no representa una solución por completo. Otra alternativa es transformar el CO_2 en nuevos compuestos, sobre todo en compuestos orgánicos de uso energético, ya que el carbono es el constituyente principal de los combustibles. Así, una forma limpia y responsable de obtener combustibles a partir del CO_2 es mediante el uso y la transformación de la energía solar; la producción de estos combustibles solares es un campo de estudio relativamente nuevo.

En general, los combustibles solares se basan en el aprovechamiento de la energía solar para transformar las moléculas de CO_2 en compuestos orgánicos de uso energético; esto se lleva a cabo mediante un proceso conocido como fotocátalisis, que coloquialmente se llama fotosíntesis artificial, por analogía con el proceso de alimentación de las plantas. Para la fotocátalisis es indispensable utilizar un material que sirva como intermediario, denominado catalizador, que suele ser un

material semiconductor. Los materiales semiconductores tienen propiedades peculiares al interactuar con luz, las cuales se aplican en diversas tecnologías, como la fotovoltaica, la termoeléctrica y la fotocatalítica. De entre los semiconductores más usados para la fotocatalisis destaca el dióxido de titanio (TiO_2), debido a su alta eficiencia y porque, además, se caracteriza por ser de poca toxicidad, bajo costo, fácil preparación y elevada estabilidad.

En este artículo se presentará un resumen de los conceptos más importantes relacionados con los combustibles solares, el proceso de fotocatalisis y la fotorreducción de CO_2 . Asimismo, se describirán los materiales semiconductores fotocatalíticos más empleados, con especial énfasis en el TiO_2 . También se brindará información acerca de los materiales emergentes en este campo de estudio, así como los dispositivos utilizados en estas tecnologías. Por último, se discutirán las perspectivas para la producción de combustibles solares mediante el aprovechamiento de los procesos fotocatalíticos.

■ **Fotocatalisis**

La fotocatalisis es el proceso mediante el cual un compuesto reacciona con la energía luminosa para generar diversos productos. Esta energía puede provenir del Sol o incluso de lámparas. Asimismo, se usa un material semiconductor (también llamado catalizador o fotocatalizador) que captura la energía luminosa y permite acelerar la transformación, el cual se considera un material intermediario, ya que no se consume al término de la reacción.

Para describir el proceso de fotocatalisis es fundamental conocer las características del material semiconductor empleado, ya que de él dependerán la velocidad de la reacción, la selectividad hacia un producto y, principalmente, la eficiencia de conversión final. La propiedad más importante es su energía de ancho de banda prohibida, la cual es un valor intrínseco que el material necesita para poder intervenir en la reacción.

Ahora bien, en la superficie del semiconductor ocurren ciertos fenómenos que permiten que la reacción se lleve a cabo. En la Figura 1 se muestra un

esquema ilustrativo del proceso general de obtención de combustibles solares a partir de la fotocatalisis. Primero, al incidir la luz sobre el material, ésta es absorbida y se generan especies con carga negativa y positiva, llamadas electrones y huecos, respectivamente (e^- y h^+). Los electrones y huecos pueden participar en diversos procesos de oxidación y reducción, pero si no encuentran sitios para reaccionar se recombinarán nuevamente; derivado de lo anterior, no se efectuará ningún cambio importante, sino que únicamente se entregará la energía solar en forma de calor (Tahir y Amin, 2013a). Por ello, es importante que el medio en el que se encuentre el fotocatalizador sea el adecuado para facilitar la reacción, ya que la recombinación de las cargas es un fenómeno que se desea evitar.

Durante la fotocatalisis, el CO_2 es el compuesto que se va a reducir químicamente; por lo tanto, se tiene la condición de que en el medio existan agentes de sacrificio (es decir, los compuestos a oxidar) para que se efectúen las reacciones deseadas y quede balanceada la ecuación final de los productos. Por lo general, estos agentes de sacrificio son provistos por el medio de reacción; por ejemplo, el agua puede funcionar como agente a oxidar o a reducir, dependiendo de la selectividad del catalizador, que a su vez puede generar nuevas especies con carácter reactivo que intervienen en el proceso, como el peróxido de hidrógeno.

■ **Combustibles solares y fotorreducción de CO_2**

Los combustibles solares son compuestos que se obtienen mediante una reacción fotoquímica que utiliza la energía solar; debido a que se emplea el CO_2 como reactivo inicial, el proceso es conocido como fotosíntesis artificial. Cuando el agua es el medio en el cual se producen los combustibles solares, ésta provee los hidrógenos necesarios para la formación de diversos compuestos. Por su parte, la fuente de energía es la radiación solar, que es habitualmente empleada por el material semiconductor para facilitar el transporte de los electrones y oxidar el agua en el proceso.

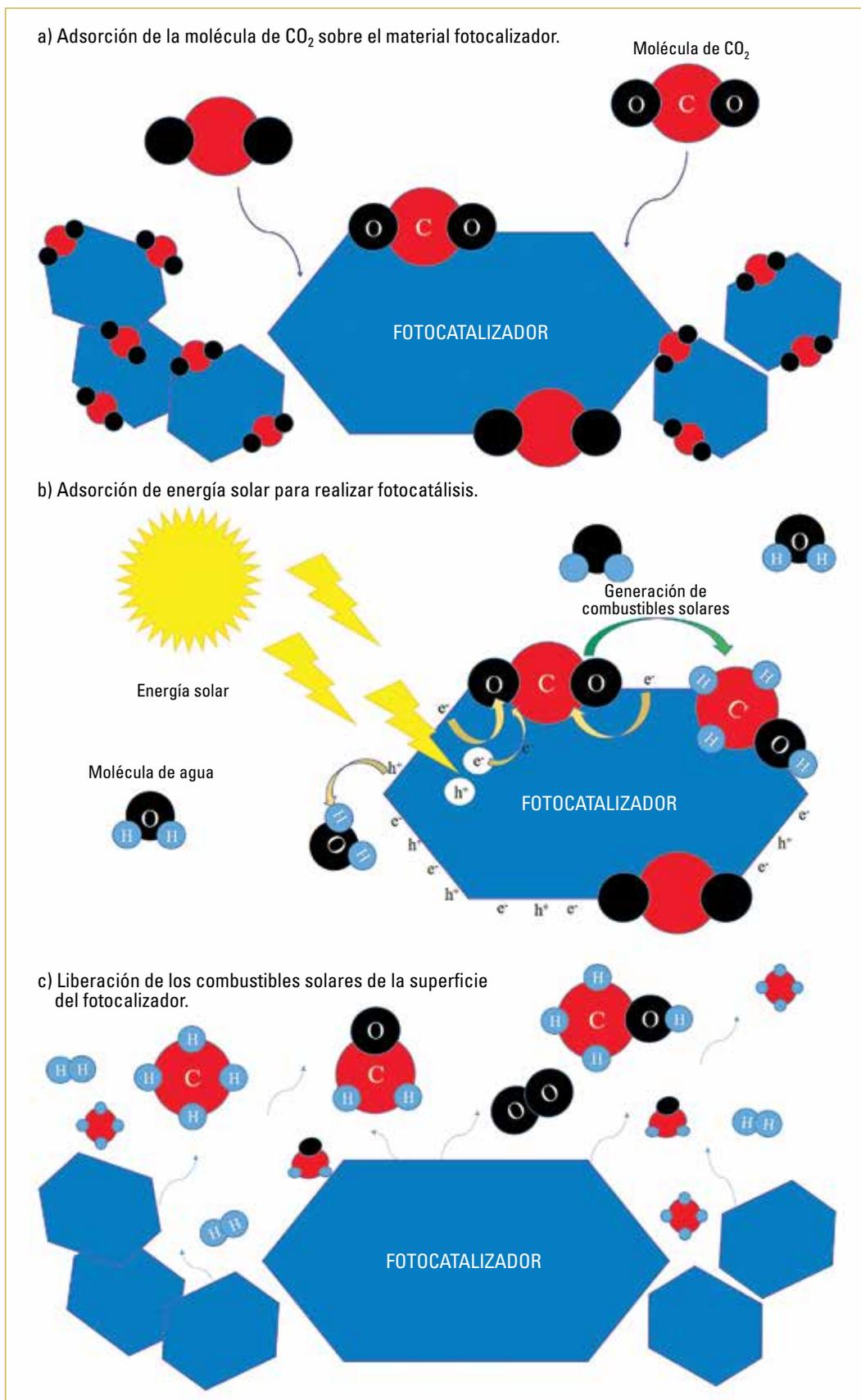


Figura 1. Esquema ilustrativo del proceso fotocatalítico para generar combustibles solares a partir de CO₂.

Tabla 1. Algunos combustibles solares que se pueden obtener mediante procesos fotocatalíticos.

Compuesto	Fórmula química	Electrones necesarios	Hidrógenos necesarios	Reacción
Hidrógeno	H ₂	2	2	2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂
Ácido fórmico	HCOOH	2	2	CO ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → HCOOH
Formaldehído	HCHO	4	4	CO ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ → HCHO + H ₂ O
Metanol	CH ₃ OH	6	6	CO ₂ + 6H ⁺ + 6e ⁻ → CH ₃ OH + H ₂ O
Metano	CH ₄	8	8	CO ₂ + 8H ⁺ + 8e ⁻ → CH ₄ + 2H ₂ O

Adaptada de Tahir y Amin (2013b).

El CO₂ es muy estable, por lo que su transformación requiere por lo general de mucha energía y más de un electrón para producir algún compuesto; por ejemplo, la obtención de metanol requiere de seis electrones, mientras que para producir metano se necesitan ocho electrones. En la Tabla 1 están enlistados algunos combustibles solares que se pueden obtener mediante el proceso de fotorreducción de CO₂ y fotooxidación del agua.

Para que la reducción de CO₂ a combustibles solares sea efectiva, es necesario que el compuesto se encuentre **adsorbido** sobre la superficie del material catalizador. Esto ocurre cuando el compuesto se encuentra retenido en la superficie de algún material; una vez adsorbido, se pueden efectuar transferencias de electrones sobre los reactivos. Una buena adsorción y transferencia de electrones se logra mediante el diseño y la síntesis de materiales semiconductores, ya que de ellos dependerá lo efectivas que sean las reacciones. Existe una gran variedad de fotocatalizadores que se pueden emplear y que, a su vez, permiten diversas modificaciones que los proveen de características muy especiales para su potencial aprovechamiento en la obtención de combustibles solares.

Actualmente, los rendimientos alcanzados para la obtención de combustibles solares mediante fotocatalisis heterogénea se encuentran en el orden de micromoles por hora de reacción y gramo de catalizador empleado; o bien, en su defecto, por cm² de área expuesta para películas delgadas (μmol h⁻¹g_{cat}⁻¹ o μmol h⁻¹cm⁻²). Los compuestos generados con mayor frecuencia son: metanol, formaldehído, me-

tano e hidrógeno molecular, por lo que se requiere proveer al sistema fotocatalítico de mecanismos que faciliten la conversión de dos de las moléculas más estables termodinámicamente: el agua y el CO₂, cuyas transformaciones alcanzadas hasta el momento son menores de 1%, sumado a tasas de reacción muy bajas.

■ Semiconductores en fotocatalisis

■ Los semiconductores son materiales con propiedades eléctricas que se encuentran entre aquellas de los materiales conductores (es decir, que conducen la electricidad, como el cobre) y las de los aislantes (que no conducen la electricidad; por ejemplo, los plásticos). Estos materiales semiconductores tienen diversas aplicaciones, las cuales incluyen celdas solares, dispositivos electrónicos, sensores, etcétera. Gracias a sus propiedades eléctricas y ópticas, son los más utilizados en los procesos fotocatalíticos; sobre todo, se emplean aquellos que tienen un exceso de electrones en su estructura, los cuales son denominados semiconductores tipo n. En particular, los materiales más estudiados son los semiconductores de óxidos metálicos y los sulfuros; sin embargo, recientemente otros materiales han atraído el interés en este campo, como el nitruro de carbono, nanotubos de carbono, óxido de grafeno, nanopartículas metálicas, entre otros.

Ahora bien, el proceso de obtención de combustibles solares requiere de una cadena de pasos para que se lleve a cabo una conversión completa. Primero, debe ocurrir la adsorción de la molécula de

Adsorber

Retener moléculas, átomos o iones en la superficie de un cuerpo; la retención es favorecida por enlaces de baja energía, sin llegar a reaccionar químicamente.



CO_2 sobre la superficie del material fotocatalítico, ya que es ahí donde es susceptible a ser reducida por los electrones disponibles. Segundo, los electrones disponibles para reaccionar deben ser generados por la absorción de luz en el material semiconductor (fotogeneración). Tercero, debe ocurrir la reacción de reducción de la molécula de CO_2 adsorbida, y para completar el balance de cargas del catalizador debe haber una reacción de oxidación del agua (agente de sacrificio). Por último, después de la reducción, el producto obtenido debe ser **desorbido** de la superficie del catalizador para separar el compuesto convertido. Todos estos pasos tendrán un impacto en el rendimiento final de los combustibles. Para encontrar información más detallada recomendamos consultar el trabajo de Marszewski y cols. (2015).

Una estrategia para mejorar el rendimiento fotocatalítico se basa en la síntesis de los fotocatalizadores, es decir, los materiales que hacen posible que la reacción se lleve a cabo. Estos materiales deben sin-

tetizarse de tal forma que posean la mayor cantidad de área activa para que ocurra la fotorreducción de CO_2 . A su vez, esta área activa está relacionada con ciertas caras o planos cristalinos de los materiales. Existen varias técnicas de obtención de los semiconductores: tanto físicas (evaporación física de vapor y erosión catódica) como químicas (sol-gel, baño químico, sonoquímica y síntesis hidrotérmica). En particular, la sonoquímica es una técnica de síntesis de materiales muy reciente que utiliza las ondas sonoras para crear reacciones químicas, mediante la propagación de las ondas en el medio de reacción; en el interior del medio de reacción se generan miles de pequeñas burbujas (cavitación acústica) que producen alteraciones instantáneas de presión y temperatura.

De entre todos los materiales que pueden ser usados para la producción de combustibles solares destaca el TiO_2 , el cual es un semiconductor tipo n que requiere de gran energía para ser activado, pre-

Desorber

Liberar de la superficie de un cuerpo moléculas, átomos o iones de otro cuerpo.

senta poca absorción de luz y se distingue por una rápida desaparición de su electrón fotogenerado. Pese a lo anterior, tiene altas tasas de conversión de productos mediante procesos de fotocatalisis y es ampliamente utilizado debido a su poca toxicidad, fácil preparación y bajo costo. El TiO_2 se ha combinado con diversos semiconductores para mejorar sus propiedades catalíticas. Además, también se ha modificado con otros tipos de compuestos, como materiales derivados del grafeno o nanopartículas de diferentes materiales; a este tipo de combinación de materiales se le conoce como compositos.

Existen otros semiconductores apropiados para la fotorreducción de CO_2 , como el sulfuro de cadmio, óxido de bismuto, óxido de hierro, óxido de tungsteno, etcétera. Todos estos semiconductores tienen unas propiedades muy específicas y una de las más importantes es el potencial de su banda de conducción; esto es, la mínima cantidad de energía que debe tener un electrón que ha sido excitado para poder reducir el CO_2 . Además, los fotocatalizadores deben tener tiempos de vida elevados, lo que significa que el tiempo en el cual funcionen apropiadamente sea lo más grande posible. Lo más usual es que los catalizadores tienden a perder parte de esas áreas activas para llevar a cabo las reacciones, por lo que disminuyen la conversión de los reactivos y se generan menos productos. Adicionalmente, se desea que tengan bajos costos, poca toxicidad y sean relativamente baratos de producir y mantener.

Todo lo anteriormente mencionado se puede unificar en un dispositivo fotocatalítico que aproveche las características más importantes de los semiconductores y de la energía solar. Los fotorreactores son dispositivos en los cuales se producen los combustibles solares, y en general todos los tipos de procesos fotocatalíticos. En estos dispositivos deben estar en contacto el CO_2 , el fotocatalizador, el medio de reacción y la energía solar. La principal característica de los fotorreactores es que deben tener una ventana por la cual pueda pasar la radiación a utilizar; lo más usual son las ventanas fabricadas con cuarzo (SiO_2 cristalino), ya que en la mayoría de los fotorreactores el TiO_2 es el semiconductor catalizador, y este

material requiere de ventanas muy transparentes a la alta energía.

En general, los fotorreactores pueden ser clasificados de dos formas: sistemas de tres fases y sistemas de dos fases (véase la Figura 2). Una fase se refiere al estado en el que se encuentra una sustancia (sólido, líquido o gaseoso). Así, la configuración de un fotorreactor de tres fases consta de una solución acuosa en constante agitación, en la cual el CO_2 es burbujeado (flujo continuo) o recirculado (flujo semi-continuo); el fotocatalizador está disperso en la solución, debido a la agitación constante, y se asegura la saturación de CO_2 por regulación de la presión. En estos reactores, un aspecto importante por considerar durante su construcción es la baja solubilidad del CO_2 en agua a condiciones ambientales de presión y temperatura, así como valores de pH ácidos (alrededor de 30 mmoles por litro). Con la finalidad de mejorar tal solubilidad, y obtener mejores resultados de fotoconversión, por lo general se utilizan valores de pH básicos, aunque se corre el riesgo de generar otras especies que son más estables que el CO_2 y, por lo tanto, más difíciles de reducir. Además, en los fotorreactores se pueden utilizar bajas temperaturas (alrededor de 10°C) y presiones elevadas de CO_2 , así como también es posible variar el flujo del mismo gas.

Por otra parte, en los reactores de dos fases el CO_2 es suministrado al reactor junto con vapor de agua (es decir, CO_2 humidificado). El fotocatalizador se encuentra en fase sólida y está confinado en un volumen pequeño, como en una película delgada o soportado en materiales inertes (por ejemplo, camisas, fibras o monolitos). En comparación con los otros reactores, los de dos fases tienen varias ventajas, como su aumento en la velocidad de reacción, su alto rendimiento, su selectividad y una fácil separación de los productos. Los sistemas bifásicos constan de un aparato de flujo, en el cual el fotocatalizador es alimentado con una mezcla reactiva de agua y CO_2 ; por lo general, el CO_2 es obtenido a presión saturada haciendo burbujear el gas en una columna de agua mantenida a temperatura constante.

Todas las características mencionadas de los dos tipos de reactores y los fotocatalizadores tendrán un

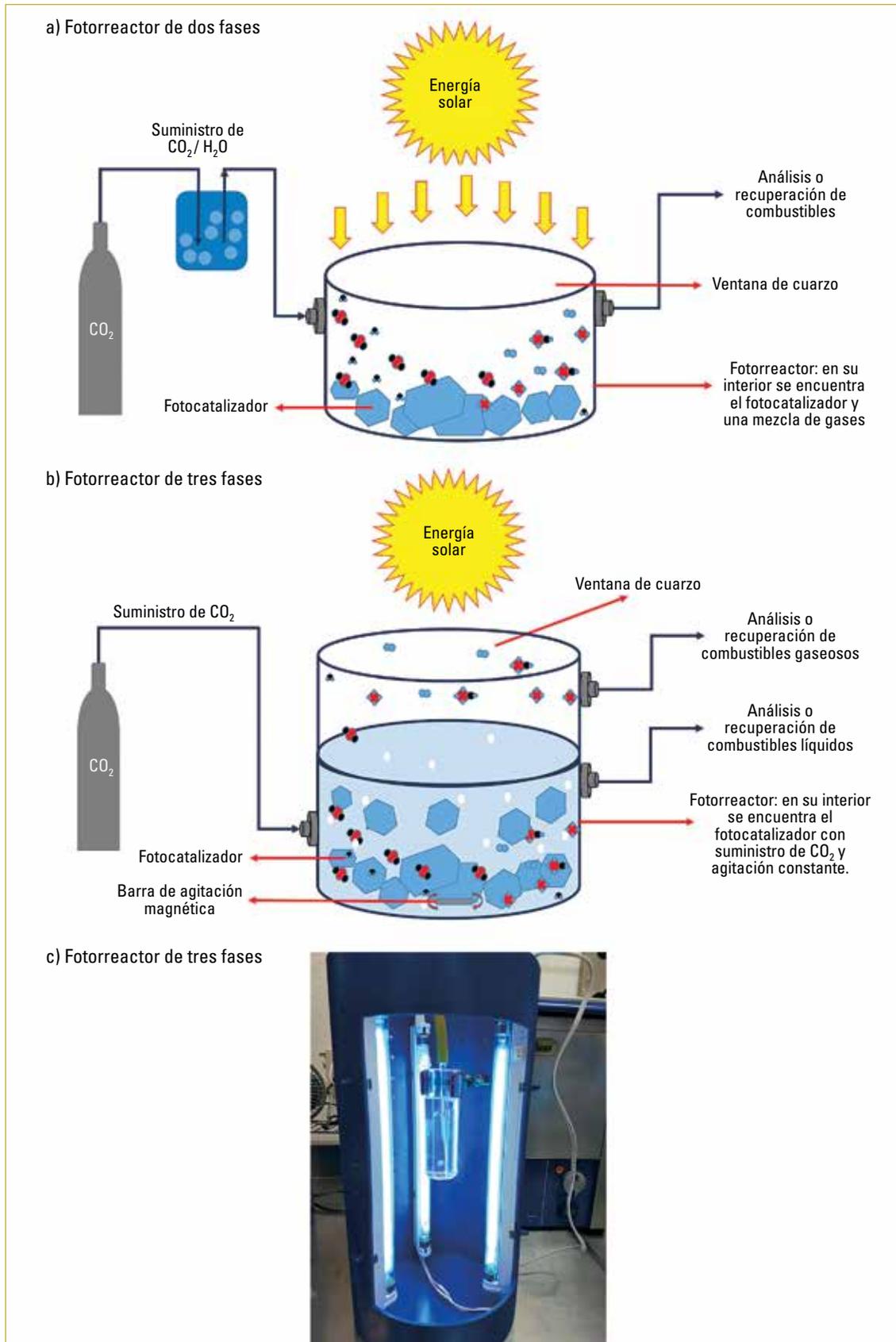


Figura 2. Ejemplos de fotorreactores: a) de dos fases; b) de tres fases; c) fotorreactor de tres fases utilizado en el Laboratorio de Materiales Avanzados de la Facultad de Química en la Universidad Autónoma de Querétaro.



gran impacto en el futuro para el desarrollo y la obtención de combustibles solares. En México, existen diversos centros de investigación e instituciones de educación superior que se han enfocado en la investigación de distintos materiales semiconductores, así como en el diseño de reactores para aplicaciones fotocatalíticas; entre ellos se incluyen el Laboratorio de Materiales Avanzados de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro; el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav), unidad Querétaro; el Centro de Investigación en Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León; el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Cimav); así como el Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable de la Universidad Autónoma del Estado de México y la Universidad Nacional Autónoma de México.

Perspectivas y conclusiones

En un futuro próximo la demanda energética crecerá de forma considerable, por lo que es importan-

te desarrollar tecnologías que provean a la sociedad de combustibles que excluyan el uso de fuentes de energía no renovables. El empleo del CO₂ y la energía solar como fuentes primarias para producir combustibles solares es una alternativa de gran interés, dado que el CO₂ puede obtenerse, mediante diversos procesos de captura, de aquel disponible en la atmósfera, lo que promete contribuir a la solución del problema del cambio climático.

Los combustibles solares poseen importantes ventajas: la principal es que utilizan la energía solar para su producción, la cual se puede considerar como una fuente de energía abundante, limpia y renovable a largo plazo. Además, se crea un ciclo de consumo/producción de CO₂ que provoca un menor incremento de su concentración atmosférica, en comparación con lo que actualmente se genera por el uso de combustibles derivados de fuentes de energía no renovables. Por ello, resulta necesario desarrollar tecnologías eficientes que utilicen materiales adecuados para la producción de combustibles solares. México tiene un gran potencial para lograr esta ta-

rea gracias a su privilegiada posición geográfica; sin embargo, el uso de estas tecnologías se encuentra lejos de alcanzarse, ya que su investigación vislumbra apenas sus comienzos.

En resumen, los combustibles solares se basan en la conversión de la energía solar para obtener combustibles a partir de la ruptura de agua y CO₂. Debido a que el CO₂ es una molécula muy estable, el proceso de obtención de combustibles solares hace uso de materiales que funcionen como catalizadores; es decir, que reduzcan la energía de transformación del CO₂ para que la reacción pueda llevarse a cabo sólo con energía solar. La obtención y el estudio de estos materiales fotocatalíticos es un área de oportunidad en el ámbito tanto nacional como internacional. Para ello, es necesario desarrollar materiales que presenten mayores rendimientos de conversión en comparación con los reportados actualmente en la investigación, y que además que sean fabricados a bajos costos, así como con un reducido impacto ambiental. Otro reto que se debe superar para la obtención de combustibles solares está vinculado con el diseño y la fabricación de los reactores fotocatalíticos, ya que es necesario aprovechar al máximo la energía que incide sobre ellos, así como determinar las condiciones óptimas para su operación.

Los autores agradecen el apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por medio de la beca de manutención de Arturo Velasco Hernández, para la realización de este trabajo.

Arturo Velasco Hernández

Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro.
velascoh.arturo@gmail.com

Sandra Andrea Mayén Hernández

Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro.
sandra.mayen@uaq.edu.mx

Rodrigo Alonso Esparza Muñoz

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México.
resparza@fata.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Barrios, C. E., E. Albitzer y R. Zanella (2015), “La fotosíntesis artificial, una alternativa para la producción de combustibles”, *Mundo Nano*, 8(15):6-21.
- Corma, A. y H. García (2013), “Photocatalytic reduction of CO₂ for fuel production: Possibilities and challenges”, *Journal of Catalysis*, 308:168-175.
- Marszewski, M., S. Cao, J. Yu y M. Jaroniec (2015), “Semiconductor-based photocatalytic CO₂ conversion”, *Materials Horizons*, 2:261-278.
- Spadaro, L., F. Arena y A. Palella (2018), “Which Future Route in the Methanol Synthesis?: Photocatalytic Reduction of CO₂, the New Challenge in the Solar Energy Exploitation”, en B. Angelo y F. Daleana (eds.), *Methanol: Science and Engineering*, Países Bajos, Elsevier B. V., pp. 429-472.
- Tahir, M. y N. S. Amin (2013a), “Advances in visible light responsive titanium oxide-based photocatalysts for CO₂ conversion to hydrocarbon fuels”, *Energy Conversion and Management*, 76:194-214.
- Tahir, M. y N. S. Amin (2013b), “Recycling of carbon dioxide to renewable fuels by photocatalysis: Prospects and challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25:560-579.

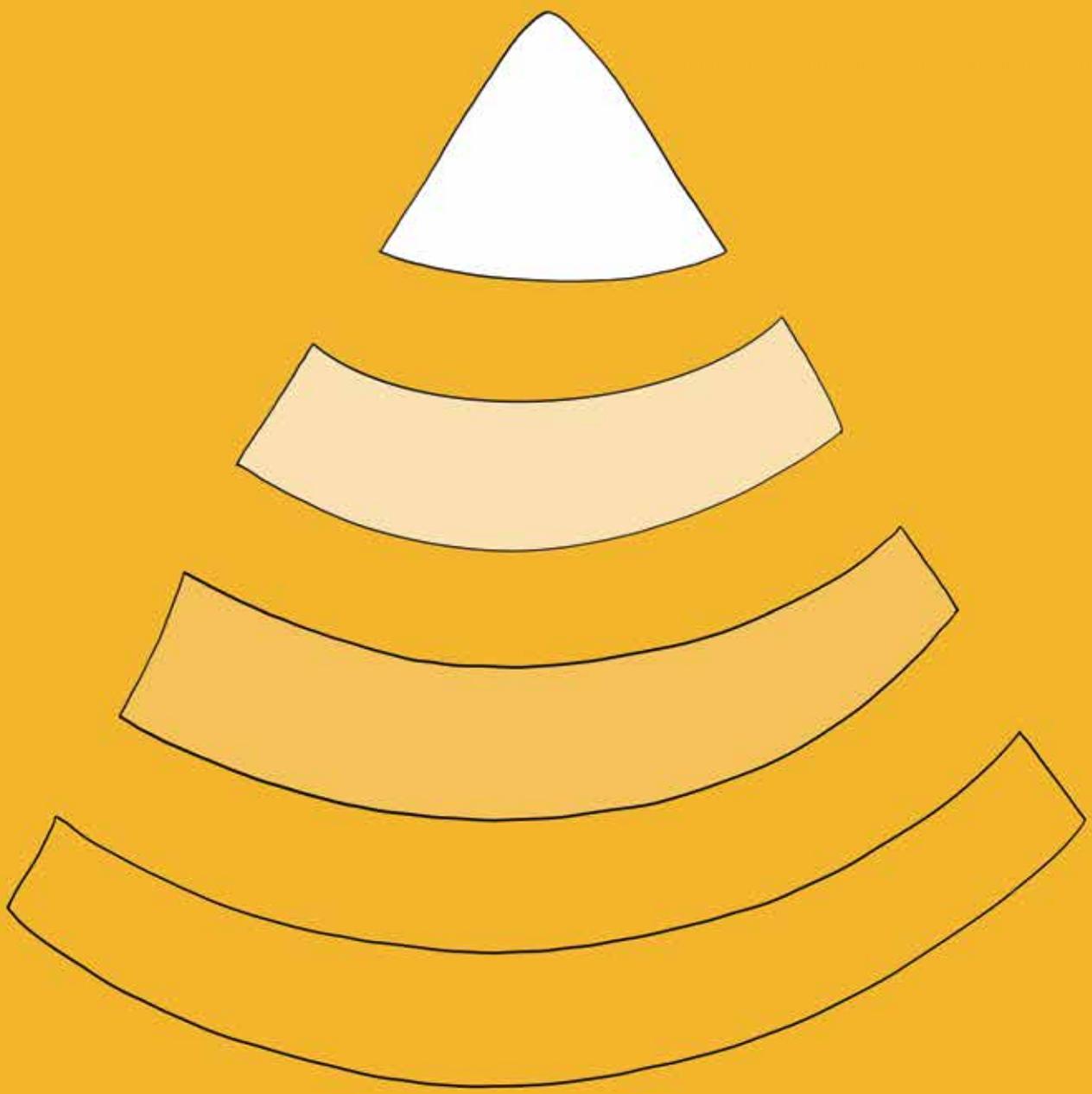
Los efectos del **confinamiento** en la **educación escolar**

La pandemia de COVID-19 generó condiciones inéditas para la escolarización y puso a prueba saberes y convicciones sobre la enseñanza y los aprendizajes. En el actual contexto, cabe analizar el desarrollo de los diferentes tipos de respuestas originadas desde las autoridades, los docentes, los estudiantes y las familias, además de alertar sobre la profundización de las desigualdades existentes y la fragmentación del sistema educativo.

La escuela más allá de la educación presencial

Sin duda, una de las consecuencias más impactantes de la pandemia de COVID-19 ha sido el cierre de los recintos escolares, una medida que afectó a más de mil millones de estudiantes en todo el mundo y que, por su extensión y alcance, no conocía precedentes. Esta situación creó condiciones inéditas para la escolarización y puso a prueba saberes y convicciones sobre la enseñanza y los aprendizajes. En este artículo, propongo reflexionar sobre estos contextos inéditos y las lecciones que se han ido aprendiendo en torno a la experiencia escolar en la pandemia.

En un inicio se postuló que el cierre de los edificios escolares permitiría llevar a cabo un gigantesco experimento acerca de las ventajas y desventajas de la educación virtual (Zimmerman, 2020), pero lo que está sucediendo en esta larga pandemia revela una multiplicidad de escenarios y configuraciones tecnológicas desiguales y heterogéneas. Para analizarlas, puede tomarse, por ejemplo, la decisión de cerrar o reabrir los establecimientos escolares. Mientras que en buena parte del continente europeo la escolaridad presencial se retomó, con adaptaciones e interrupciones, en la segunda mitad de 2020, en las Américas (incluyendo Estados Unidos de América) la vuelta a las escuelas ha sufrido más avatares, no solamente por la virulencia de la pandemia, sino también por otras situaciones que se deben considerar: prioridades y negociaciones político-educativas, resistencias docentes y de las familias, precariedad de la infraestructura, falta de recursos para programas complementarios debido a la crisis económica, entre otras.



En el caso de México, solamente algunas entidades e instituciones pudieron retornar a los edificios durante 2021, y al momento de escribir estas líneas (agosto) el recrudecimiento de la pandemia por la variante delta pone en vilo la decisión oficial del reinicio del ciclo escolar 2021-2022 en forma presencial. Quien dude de la complejidad de los escenarios puede consultar el informe 2018 del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval), el cual muestra que solamente 53% de las escuelas públicas cuentan con suministro de agua a través de la red pública y 61% tienen acceso a electricidad (Coneval, 2018); o bien el *Panorama de la Educación 2020* de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), que evidencia que México es el país miembro con peor coeficiente o *ratio* docente-alumnos (26 alumnos por docente en la educación primaria y 33 en la educación secundaria, en comparación con 15 y 13, que son los promedios respectivos de la OCDE). Estas cifras dejan en claro que las escuelas públicas

mexicanas, que atienden a 90% de la matrícula escolar, tienen un gran rezago infraestructural para hacer frente a las demandas de mayor higiene, ventilación y distancia física que plantea la etapa actual de la pandemia, y que las prioridades y las reticencias no se resuelven solamente con buena voluntad.

Si bien la pandemia no ha sido un gran experimento sobre las ventajas de la educación virtual, hay que destacar que sí ha permitido cuestionar algunos supuestos fundantes de la escolaridad. Durante este tiempo los actores educativos tuvieron que plantearse preguntas profundas sobre la escuela. ¿Qué es lo realmente central en la acción escolar? ¿Puede prescindir la escolarización de la copresencia dentro de los muros del edificio? ¿Qué producen las interacciones sincrónicas en las aulas? ¿Qué contenidos curriculares son relevantes para este contexto? ¿Puede haber educación sin evaluación? ¿Pueden las familias reemplazar o complementar a los docentes? Muchas de estas preguntas no tienen respuestas sencillas y seguramente seguirán ocupándonos en los próximos años, ojalá que con menos urgencia y dramatismo que en estos días.



■ **La escuela por otros medios y la desigual infraestructura tecnológica**

Lo cierto es que el cierre de los edificios obligó a organizar respuestas de emergencia y hubo que aprender a *hacer escuela* por otros medios de manera rápida e improvisada. Las autoridades educativas diseñaron un conjunto de estrategias para la continuidad de los aprendizajes, entre las cuales se destacaron las plataformas digitales, la radio y la televisión, así como los materiales impresos para la educación a distancia (Rivoir y Morales, 2021). En México, y debido a las desigualdades en el acceso a las tecnologías digitales, una de las apuestas principales desde la Secretaría de Educación Pública (SEP) fue el programa de televisión educativa *Aprende en Casa*, que ofreció 75 programas semanales para cubrir los contenidos de todos los niveles obligatorios (preescolar, primaria, secundaria y bachillerato).

Sin embargo, una encuesta del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) realizada entre no-

viembre y diciembre de 2020 mostró que sólo 6.7% de los estudiantes de primaria y 1.8% de secundaria usaron la televisión como medio predominante, lo que habla de su declive en la ecología de los medios. La mayoría reportó usar de forma prioritaria el celular inteligente, a excepción de los estudiantes de nivel superior que utilizaron sobre todo computadoras de escritorio o portátiles (Inegi, 2021); el celular podía combinarse con la televisión, pero la interacción con sus escuelas se daba por los artefactos portátiles. Otro dato llamativo que ofreció esta encuesta es la propiedad y uso exclusivo de estos aparatos: 74.6% de quienes asisten a la escuela primaria dijeron compartir el artefacto con otros miembros de la familia, algo esperable por la edad de los escolares, pero esta situación sólo se revertía en el nivel superior, en el que 67.7% de estudiantes dijeron tener uso exclusivo del artefacto.

Es indudable que las posibilidades de conexión y de trabajo escolar a distancia se vieron seriamente condicionadas por las desigualdades existentes de acceso y de uso de los dispositivos. La gran dependencia de los celulares tuvo consecuencias pedagógico-didácticas, ya que aun cuando son eficientes para la comunicación rápida y compartir contenidos, ofrecieron menos posibilidades que las computadoras para la producción y el manejo autónomo de textos, o bien para el trabajo académico más complejo, lo que se notó especialmente en los niveles secundario y medio superior, los más afectados por la desvinculación de sus estudiantes. Pero también tuvo efectos político-normativos, al descentralizar los contenidos y ritmos de la enseñanza de una manera que cuestionó la intención reguladora de las autoridades educativas; el trabajo por medio del celular fue más proclive a adaptaciones y negociaciones locales entre docentes, familias y alumnos que a una coordinación integrada desde el Estado.

Hay quienes celebran esta situación como el fin del control “desde arriba” y el comienzo de una etapa de mayor autonomía y creatividad, pero también cabe alertar sobre la profundización de las desigualdades existentes y la fragmentación del sistema educativo, dado que cada docente y cada familia pueden no tener los suficientes recursos para ir más allá de

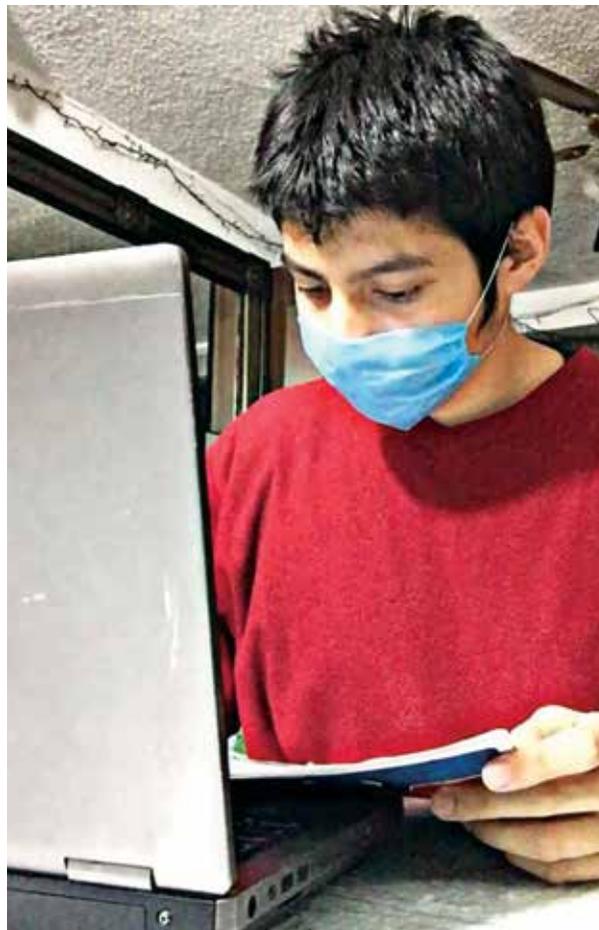


Foto: <https://commons.wikimedia.org/>

sus condiciones, intereses o posibilidades actuales. Por otra parte, habría que estar atentos a las consecuencias de la fragmentación y privatización de la cultura común; si bien ésta debería ser mucho más plural, democrática e inclusiva, en su reemplazo no emergen las culturas o formas de saber marginadas o excluidas, sino el arrollador poder de los algoritmos de las redes sociales manejadas por grandes corporaciones, que entronizan el poder de seducción y el gusto o interés de las mayorías.

La dimensión técnica de las pedagogías:

la lección de la historia

 El protagonismo de los celulares y, en menor medida, de la televisión deja en evidencia, quizá como nunca antes, que la materialidad y las tecnologías disponibles importan en la enseñanza y los aprendizajes, y que las pedagogías se apoyan en soportes

técnicos que no determinan pero sí condicionan lo que se puede hacer con ellos.

Es importante considerar que esta imbricación entre pedagogías y tecnologías, que algunos llaman “tecnopedagogías” (Perrotta y cols., 2021), no comienza con la pandemia ni con los artefactos digitales. Puede verse este vínculo estrecho en dos formas pedagógicas conocidas por todos quienes asistimos a la escuela: la lección y el ejercicio. Según Jean Hébrard, historiador francés de las prácticas de lectura y escritura, y también inspector nacional de enseñanza, la lección surgida en los colegios de los siglos XVI y XVII asumía inicialmente una forma oral, a cargo del maestro, y los alumnos tomaban apuntes en tablillas o en papel (Hébrard, 1995). Esto se apoyaba en una concepción “transmisiva” de la enseñanza, con el foco puesto en el dominio o apropiación por parte de los estudiantes de contenidos dados por los docentes. El ejercicio era el tiempo de estudio individual, solía ser escrito, y pocas veces era corregido por los profesores.

El gran cambio de esta situación tuvo lugar en el siglo XVIII, cuando se inventó el pizarrón, que permitió plantear ejercicios al conjunto de la clase y confrontar y revisar los saberes alcanzados. Los cambios tecnológicos y pedagógicos confluyeron con los objetivos de secularizar y democratizar la escuela, y la dupla lección-ejercicio empezó a consolidarse también en la escuela primaria. Otro momento importante fue el abaratamiento del papel, la tinta y el lápiz, a mediados del siglo XIX, que popularizó los cuadernos de ejercicio individuales. Ya en el siglo XX, el ejercicio en el cuaderno autorizó la posibilidad de que los alumnos mostrasen sus dudas y errores; fue el soporte adecuado para una pedagogía en la que importaba más el proceso que el resultado, y en la que la acción docente se preocupaba por orientar y corregir los aprendizajes, antes que por transmitir un conocimiento acabado. Trayendo estas reflexiones al presente, Hébrard es ambivalente respecto a lo que los dispositivos digitales permiten organizar como formas pedagógicas: sugiere que serán más útiles en la enseñanza secundaria y superior, donde importan más las formas de conocimiento terminado, que en las escuelas primarias, donde la pedagogía deman-

da que se muestren los procesos y resultados intermedios y los modos de hacer.

Puede seguirse esta línea argumental para analizar algunos desarrollos recientes. Las formas “colaborativas” de producción de conocimiento, tan en boga como solución a la falta de interés y participación estudiantiles, privilegian el texto o video concluido en tiempo y forma, y no siempre permiten desplegar los procesos de trabajo de manera clara. Por su parte, las plataformas digitales automatizadas, que estarían en mejores condiciones de registrar o medir el tiempo destinado a una tarea y las decisiones parciales en el proceso, sin embargo, suelen basarse en pedagogías que priorizan el conocimiento “correcto”, incluso por adivinanza o azar, por sobre el trabajo con los errores, soluciones parciales o alternativas encontradas por los estudiantes (Perrotta y cols., 2021). Paradójicamente, entonces, muchas de las nuevas plataformas están más cerca del modelo transmisivo de la lección y del ideal de dominio de un conjunto de saberes predeterminado que de las pedagogías de la autonomía del siglo XX basadas en la dupla lección-ejercicio.

La disparidad de las tecnopedagogías de la pandemia

¿Qué sucedió con estas formas de enseñanza en la pandemia, en un contexto tecnológico distinto y heterogéneo? ¿Emergieron formas pedagógicas nuevas? Aún es pronto para afirmarlo, pero lo que aparece es una marcada disparidad entre los soportes que se usan en las escuelas públicas y las privadas: grupos de WhatsApp en las primeras y encuentros por Zoom, Meet o Jitsi en las segundas.

En las escuelas públicas, el acceso limitado a datos llevó a priorizar la aplicación WhatsApp como vía privilegiada de comunicación, que se centró la mayor parte de las veces en el intercambio de tareas. La velocidad e inmediatez de esta plataforma y la posibilidad de compartir audios, textos e imágenes (por lo general, fotos de tareas impresas o de libros de ejercicios) fueron útiles para sostener el contacto y las redes afectivas en el marco del confinamiento. Sin embargo, los intercambios en los *chats* suelen



ser conversaciones libres, desordenadas, sin claro inicio ni cierre, y por eso no ayudaron a consolidar aprendizajes que requieren de mayor duración y continuidad para volver a revisar, profundizar o dialogar sobre lo aprendido (Baquero, 2020), en especial con los alumnos que más hubieran necesitado ese tipo de trabajo didáctico por la falta de apoyo pedagógico en sus familias.

En cambio, plataformas de encuentro sincrónico como Zoom y Meet resultaron mejores para ordenar las interacciones colectivas, organizar grupos pequeños, compartir contenidos en la misma pantalla, dirigir la atención hacia un mismo texto y así sostener una conversación común. En contrapartida, al requerir banda ancha y pantallas más grandes que el celular para aprovechar sus posibilidades, no resultaron accesibles para la mayoría de los profesores y estudiantes. Por otro lado, también hay que señalar que este tipo de plataformas son más invasivas del espacio personal, más demandantes en términos de desempeño individual, y mucho más datificadas que otras alternativas (Lotvink, 2020). En este contexto, puede interpretarse que las cámaras apagadas de una gran cantidad de estudiantes de nivel medio y superior son un gesto tanto de apatía como de rebeldía frente a una tecnología que requiere una atención total, que comercializa todas las interacciones y que borra las fronteras entre la vida personal y el trabajo académico.

■ La tarea, ¿evidencia de qué aprendizajes?

■ Dado que las tecnopedagogías de WhatsApp se centraron sobre todo en el intercambio de tareas, vale la pena detenerse, aunque sea brevemente, en la tarea como una forma pedagógica. Su predominio en la pandemia supone un desplazamiento de la dupla lección-ejercicio analizada por Hébrard hacia el segundo polo, el del ejercicio suelto. Hay una convicción muy extendida, no solamente en México, de que un buen maestro es el que deja mucha tarea (Rayou, 2010), pero en la pandemia ésta parece haberse convertido en una actividad que tiene como propósito central, además de ocupar el tiempo de los estudiantes, verificar un aprendizaje cuyas condicio-



nes de enseñanza ya no se pueden garantizar porque están dispersas en múltiples espacios y canales.

En el caso mexicano, la centralidad de la tarea como forma pedagógica se alinea con la demanda normativa-burocrática de que los docentes reúnan “evidencias” de los aprendizajes de sus alumnos como muestra de su propio trabajo de enseñanza, algo que se instaló en los tiempos de la evaluación docente del sexenio anterior. Estas evidencias suelen consistir en fotografías de las tareas que, multiplicadas por grandes números de estudiantes y actividades, constituyen un archivo burocrático hipertrofiado y sin destinatario claro. Al mismo tiempo, no se analiza ni cuestiona cuál es la relación de dicha evidencia (por ejemplo, una foto de un ejercicio) con los procesos de aprendizaje de los estudiantes, que tienen muchas dimensiones no visibles ni mostrables. Pareciera que, tanto para los alumnos en relación con los docentes como para los docentes en relación con las autoridades, lo importante es mandar la tarea y cumplir con enviar la foto, sin que esos registros se inscriban en procesos de trabajo pedagógico que impliquen una devolución o retroalimentación sobre qué se hizo y qué se puede hacer mejor. Más aún, la llamada evidencia se convierte en una moneda de cambio en la relación entre docentes y alumnos o familias; es común escuchar a los primeros quejarse con y de los padres porque no enviaron evidencias, y a los padres



quejarse de los maestros porque son unos “flojos” que lo único que quieren es justificar su trabajo.

Así, lo que puede observarse hasta el momento es que, a diferencia de lo que organizaba el trabajo didáctico colectivo mediante pizarrones y cuadernos, la pedagogía de la tarea por WhatsApp tiende a promover un tipo de conocimiento “correcto” y “corregible” que los estudiantes deben, en su mayoría, procurarse de manera individual por las vías a su alcance. Esto parece tener dos efectos bastante inmediatos: la ampliación de las desigualdades existentes, ya que estas vías y recursos disponibles son muy dispares, y la reducción del conocimiento a los resultados correctos y visibles, que marginan la importancia de los procesos de aprendizaje y las múltiples formas de producción de conocimientos. Sobre todo, reducen los aprendizajes a una validación burocrática, y ponen el énfasis de la acción docente en reunir y acopiar registros más que en la preocupación por la variedad y significatividad de los aprendizajes que tuvieron lugar en la pandemia.

■ Las voces de los estudiantes

■ ¿Qué queda fuera en este sesgo burocrático-normativo de la tarea así concebida y ejecutada? En una investigación realizada en el primer semestre de 2021, solicitamos a grupos de estudiantes de nivel

secundario de seis entidades federativas que relataran cuáles fueron los aprendizajes que realizaron durante la pandemia.¹ Debido a la imposibilidad de contactarlos en sus territorios, la metodología contó con la ayuda de los profesores, quienes se comunicaron con sus alumnos de la manera habitual (impresos, reuniones sincrónicas o conversaciones por WhatsApp). Fue claro para el equipo de investigación que esta estrategia permitió contactar a quienes continuaron vinculados a las escuelas y dejó fuera a quienes se desconectaron. Pese a estas limitaciones, lo relevado muestra algunos hallazgos sugerentes y consistentes con lo ya señalado.

Buena parte de los adolescentes entrevistados destacó los saberes técnicos vinculados al uso de la computadora o los celulares; por ejemplo, el manejo de programas como Meet, Zoom, Classroom y otras plataformas donde tenían que subir las tareas. Un joven de 13 años, estudiante en una escuela pública de la Ciudad de México, señaló: “tuve que aprender a usar la computadora que es algo que no sabía, como por ejemplo usar Word o PowerPoint”. Esto contradice el supuesto de que todos los jóvenes, “nativos digitales”, saben, casi por ósmosis, usar los medios digitales, y evidencia que para quienes siguieron conectados la clase se desplazó en gran medida al espacio digital, con nuevos requisitos y también otras exclusiones.

En la investigación, varios entrevistados refirieron como aprendizaje principal el haber tenido que superar el estrés de las nuevas condiciones y desarrollar la paciencia, así como haber logrado más autonomía para resolver las tareas y realizar exploraciones y búsquedas de información. Esta dualidad puede observarse en la reflexión de una estudiante de 12 años de una telesecundaria de Tabasco, quien reafirma la centralidad de la tarea:

¹ Se trata de la investigación “Recepción, experiencias y prácticas de la estrategia Aprende en casa en la emergencia COVID-19. Un estudio desde la heterogeneidad”; la responsable es Rosa María Torres y el trabajo es realizado de manera conjunta por la Universidad Pedagógica Nacional, el Departamento de Investigaciones Educativas del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, y la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales-México.

Cuando comenzó la pandemia fue muy difícil adaptarme, pues de un día a otro pasamos de ir a la escuela y convivir con amigos a hacer la tarea desde casa en el celular. Me costó trabajo adaptarme [...]. Fue un reto para mí, ya que cuando comenzamos a trabajar en línea me estresaba demasiado, lo cual me llevaba a llorar, [...] pues era un cambio ya no tener a la maestra que te explicara las tareas presencialmente, sino que ahora tú tenías que entender las explicaciones mediante audio o mensajes y hacerla, entender lo más posible que pudieras y terminarla. [...] sin embargo, ahora ya me adapté mejor, tengo mis propios horarios para terminar o concretar mis tareas; [...] así que ahora tengo el tiempo exacto para terminar toda mi tarea y enviarla.

En la gran mayoría de las respuestas, hay añoranza de la educación presencial. Otra estudiante de Tabasco fue clara en los límites de la educación a distancia: “prefiero estar dentro de un salón de clases que detrás de un celular o una computadora”. El uso de las preposiciones es muy elocuente: se está *dentro* de la clase, pero *detrás* de un celular. A pesar de las promesas del carácter inmersivo de las tecnologías

digitales, para muchos de los jóvenes entrevistados la escuela ofrece un mundo de experiencias integrales y en compañía de otros sujetos que no tiene sustituto ni parangón en la educación remota y virtualizada que les tocó vivir en las actuales condiciones.

La vuelta a la escuela

Para cerrar estas reflexiones, quisiera referirme a otro segmento de las entrevistas con los adolescentes, con el objetivo de indagar sus propuestas para el regreso a clases presenciales. En primer lugar, surgieron las respuestas vinculadas con la infraestructura y organización escolar: salones más amplios, grupos más reducidos, más tiempo de recreo, más higiene y orden en los salones y más cuidado de los baños. Coincidentemente con lo que señala Coneval, los alumnos reconocen la importancia de contar con espacios institucionales cuidados, seguros y más amigables con sus necesidades y preocupaciones.

En relación con el orden pedagógico y disciplinario, varios jóvenes pidieron que no se exija el uso de uniforme, que se permita a los varones ir con pelo



largo, que los maestros sean comprensivos como en la virtualidad, que enseñen de manera más dinámica y que no dejen tanta tarea. Algunos estudiantes sugirieron que se dé más voz a los estudiantes en los asuntos escolares, “que los maestros sepan que no aprendimos lo necesario estos meses”, y que abran espacios para expresar las emociones. Hay en estas propuestas una conciencia en la libertad y la autonomía alcanzadas en la experiencia durante la pandemia que los jóvenes quieren sostener en la vuelta a la modalidad presencial, y que permite avizorar un ciclo de demandas de cambios importantes en las formas de trabajo escolares.

Por último, también fue frecuente la propuesta de tener más bailes, juegos y educación física, que revela otra valoración de la presencia y actividad de los cuerpos en la escuela. La experiencia de la educación en el confinamiento dejará huellas en todos, pero particularmente lo hará en las nuevas generaciones que han entrado a la escuela en un contexto de amenazas y dificultades inéditas. Habría que adherir el deseo de esta joven de 15 años, estudiante del Estado de México, que pide “que no haya miedo al juntarse con los demás [...] no quiero que exista el miedo a que ‘si me pego mucho, me contagiará’”.

¿Qué lugar le dará la escuela a estos aprendizajes y temores? ¿Cómo los integrará en la revisión de las formas pedagógicas que se instalaron en la pandemia? ¿Cómo se potenciará la autonomía lograda y se revertirán los procesos de exclusión y desconexión? Éste ha sido un tiempo intenso en enseñanzas y aprendizajes que han superado los límites de la escuela; le toca al sistema escolar procesarlos de la mejor manera posible para que lo que sedimento pueda incluirse en el trabajo de construcción de una cultura común que vincule a las distintas generaciones, que es, finalmente, su responsabilidad social más específica.

Inés Dussel

Departamento de Investigaciones Educativas del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
idussel@gmail.com

Referencias específicas

- Baquero, R. (2020), “La torsión del espacio escolar”, en I. Dussel, P. Ferrante y D. Pulfer (comps.), *Pensar la educación en tiempos de pandemia. Entre la emergencia, el compromiso y la espera*, Buenos Aires, Unipe-Editorial Universitaria, pp. 231-241.
- Coneval (2018), *Estudio Diagnóstico del Derecho a la Educación*, México, Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Disponible en: <https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/IEPSM/Documents/Derechos_Sociales/Estudio_Diag_Edu_2018.pdf>, consultado el 3 de mayo de 2021.
- Hébrard, J. (1995), “La leçon et l'exercice. Quelques réflexions sur l'histoire des pratiques de scolarisation”, en A. Bentolila (ed.), *Savoirs et savoir-faire*, París, Éditions Nathan, pp. 155-162.
- Inegi (2021), *Encuesta para la medición del impacto Covid-19 en la educación (ECOVID-ED) 2020*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/investigacion/ecovid/2020/doc/ecovid_ed_2020_presentacion_resultados.pdf>, consultado el 29 de agosto de 2021.
- Lotvink, G. (2020), “The anatomy of Zoom fatigue”, *Eurozine*. Disponible en: <<https://www.eurozine.com/the-anatomy-of-zoom-fatigue/>>, consultado el 10 de junio de 2021.
- OECD (2020), *Education at a Glance 2020: OECD Indicators*, París, OECD Publishing. Disponible en: <<https://doi.org/10.1787/69096873-en>>, consultado el 29 de agosto de 2021.
- Perrotta, C., K. Gulson, B. Williamson y K. Witzemberger (2021), “Automation, APIs and the distributed labour of platform pedagogies in Google Classroom”, *Critical Studies in Education*, 62 (1): 97-113. Disponible en: <<https://doi.org/10.1080/17508487.2020.1855597>>, consultado el 29 de agosto de 2021.
- Rayou, P. (dir.) (2010), *Faire ses devoirs: enjeux cognitifs et sociaux d'une pratique ordinaire*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes.
- Rivoir, A. y M. J. Morales (2021), *Políticas digitales educativas en América Latina frente a la pandemia de COVID-19*, Buenos Aires, IPE-Unesco.
- Zimmerman, J. (2020), “Coronavirus and the Great Online-Learning Experiment”, *Chronicle of Higher Education*. Disponible en: <<https://www.chronicle.com/article/coronavirus-and-the-great-online-learning-experiment/>>, consultado el 15 de agosto de 2021.

José Eduardo González Reyes

Desde las redes

¿Crónica de una extinción anunciada?

El calentamiento global está afectando la composición de los ecosistemas árticos, en particular, por el derretimiento de las capas de hielo marino que conectan a poblaciones como las de los osos polares (*Ursus maritimus*). El archipiélago de Svalbard, un conjunto de islas al norte del continente europeo y que forman parte de Noruega, es un claro ejemplo de esta situación problemática; allí se ha documentado, en los últimos años, la disminución del hielo marino que conecta a sus islas durante la primavera, época del año que coincide con la temporada de apareamiento de los osos polares. La pérdida de conectividad reduce las oportunidades de apareamiento entre poblaciones de estos mamí-

feros y propicia el incremento de encuentros entre osos consanguíneos, lo que desencadena una disminución en su diversidad genética y el flujo de genes dentro de la especie.

Un grupo de investigadores de diversas instituciones de Noruega analizó este impacto mediante datos sobre la variabilidad genética de la especie de 1995 a 2016, gracias a muestras de tejido que han obtenido de los organismos que habitan el archipiélago. Sus estudios revelaron una pérdida de la diversidad genética desde 3% hasta 10% en este periodo de más de dos décadas. Esta pérdida introduce un nivel adicional de estrés para las especies de la zona y aumenta su riesgo de extinción, al disminuir el potencial de adaptación que permite a las poblaciones responder a presiones relacionadas con la actividad humana, brotes de patógenos y cambios ambientales. El estudio resalta la importancia de hacer este tipo de monitoreos sostenidos a lo largo del tiempo para establecer mecanismos de protección a especies que pudieran ver mermada su diversidad genética.



Oso polar saltando en el hielo oceánico, al norte de las islas de Svalbard, en Noruega. Crédito: Arturo de Frias Marques/Wikimedia.

Más información

Maduna, S. N. *et al.* (2021), "Sea ice reduction drives genetic differentiation among Barents Sea polar bears", *Proc. R. Soc. B.*, 288 (1958): 20211741. Disponible en: <http://doi.org/10.1098/rspb.2021.1741>, consultado el 20 de septiembre de 2021.

Plantas zombis

Algunos parásitos pueden producir en sus hospederos modificaciones del comportamiento e incluso en su desarrollo. Un ejemplo de esto son los fitoplasmas, un grupo de bacterias parásitas que se insertan en el interior de las plantas gracias a la acción de los insectos, sobre todo hemípteros como las chicharritas, que se alimentan de la savia vegetal. Las plantas parasitadas se han denominado zombis porque exhiben cambios en su estructura, dejan de reproducirse y parecen servir únicamente como hábitats para los fitoplasmas y los insectos que los transmiten. Aunque estos desajustes eran conocidos porque las plantas parasitadas presentan un crecimiento excesivo de ramas y brotes estériles que están juntos —denominados escobas de brujas—, no estaba del todo claro el proceso molecular que propicia estos cambios estructurales en los vegetales.

Un grupo de investigadores del John Innes Center en Reino Unido encontró que una molécula

denominada SP05, producida por los fitoplasmas, induce la descomposición de los reguladores del crecimiento de la planta afectada, lo que desencadena el crecimiento anormal. Uno de los receptores vegetales involucrados en este proceso de degradación, el RPN10, también se encuentra en los insectos que transmiten las bacterias. Esto hizo que los investigadores se preguntaran por qué SP05 no producía efectos similares, y descubrieron que SP05 no se une al receptor de los insectos como en las plantas debido a una variante que difiere en sólo dos aminoácidos. Con ayuda de la planta modelo *Arabidopsis thaliana* y la tecnología de CRISPR, crearon variantes con modificaciones en el RPN10 vegetal para imitar la versión de los insectos. Aunque aun así se observaron síntomas de infección, las plantas mostraron algunos indicios de resistencia al parásito. Este tipo de modificaciones podrían ayudar a la agricultura y a disminuir las pérdidas de cultivos por estas bacterias.



Escoba de bruja presente en un abedul pubescente (*Betula pubescens*). Crédito: Wikimedia.

Más información

Huang, W. *et al.*, (2021), "Parasitic modulation of host development by ubiquitin-independent protein degradation", *Cell*, 184:1-14. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.cell.2021.08.029>, consultado el 20 de septiembre de 2021.

Golpe a Júpiter

El 13 de septiembre de 2021, varios astrónomos de todo el mundo observaron un impacto sobre el planeta más grande de nuestro Sistema Solar: Júpiter. Es la primera vez que una colisión de este tipo es observada al mismo tiempo por un grupo relativamente grande de personas (a la fecha se han reportado nueve).

Las imágenes y un video del impacto fueron capturados por observadores aficionados y miembros de la Société Lorraine d’Astronomie, en Francia. Según lo que se logra visualizar, el diámetro del objeto se estima en 100 metros y no dejó una marca visible sobre la superficie del planeta gaseoso.

No es la primera vez que se detecta de manera directa una colisión extraterrestre de objetos del Sistema Solar. En 1994, el cometa Shoemaker-Levy 9 impactó con Júpiter y fue capturado por el planeta. El choque fue tan poderoso que dejó cicatrices que perduraron durante meses y fueron más perceptibles que la Gran Mancha Roja de Júpiter. Debido a que dicho planeta orbita cerca del cinturón de asteroides y presenta una poderosa atracción gravitacional, es golpeado con bastante frecuencia.

Más información

Société Lorraine d’Astronomie (2021), “Détection d’un impact sur Jupiter par deux équipes de la SLA”, *Société Lorraine d’Astronomie*. Disponible en: «<https://www.astronomie54.fr/detection-dun-impact-sur-jupiter-par-deux-equipes-de-la-sla/>», consultado el 20 de septiembre de 2021.



Secuencia de imágenes del impacto de un objeto contra Júpiter, el pasado 13 de septiembre de 2021. Crédito: Jean Paul Arnould/Société Lorraine d’Astronomie.

Un nuevo volcán emerge en las Islas Canarias

El domingo 19 de septiembre de 2021, a las 14:10 horas (UTC), hizo erupción un nuevo volcán en la isla de La Palma, en España. Desde el 11 de septiembre, el Instituto Geográfico Nacional de ese país había informado acerca de una alta actividad sísmica, en la que se contabilizaron más de 6000 sismos superficiales y deformación del suelo. La erupción es de tipo fisural con diversas bocas eruptivas de las que emerge lava. Durante la primera noche de actividad volcánica surgieron nuevas bocas eruptivas (se han contabilizado hasta nueve), las cuales ampliaron el radio de peligro y obligaron a evacuar nuevas áreas de la isla.

La actividad volcánica no es un fenómeno anormal en este sitio (parte de las Islas Canarias) que se encuentra frente a las costas de Marruecos, ya que su

origen es volcánico. La última erupción registrada en tierra en el archipiélago data de 1971 y ocurrió en el volcán Teneguía, ubicado también en la isla de La Palma. En 2011, se produjo una erupción volcánica submarina en la isla de El Hierro, que se encuentra al sur. Hasta el momento de la redacción de esta nota (20 de septiembre), la erupción permanece activa y se estima que pueda durar varias semanas debido a la cantidad de material acumulado.

Más información

Instituto Volcanológico de Canarias (<http://www.involcan.org>) e Instituto Geográfico Nacional (<https://www.ign.es>).



El equipo del Instituto Volcanológico de Canarias hizo mediciones de la temperatura de la lava del nuevo volcán. Créditos: INVOLCAN.

In memoriam

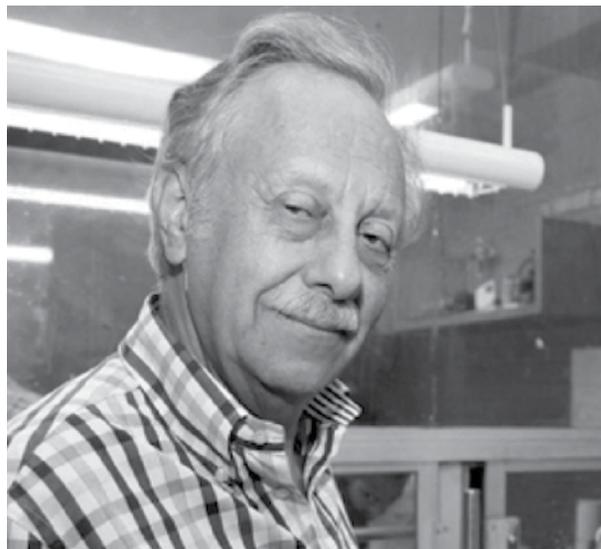
Ricardo Tapia Ibargüengoytia

Ricardo Tapia es un referente para la ciencia y la cultura en México, por lo que es difícil resumir su legado. De particular relevancia es su papel en el desarrollo de una sólida escuela de neuroquímica; es uno de los científicos mexicanos que ha formado a un gran número de investigadores que laboran en diversas partes del país y del extranjero.

Médico Cirujano por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ricardo fue el primer doctorado en Bioquímica por la Facultad de Química. En esta universidad, concibió y llevó a cabo el proyecto de creación de un departamento de biología experimental, que pronto se convirtió en el Centro de Investigaciones en Fisiología Celular, y posteriormente en el Instituto de Fisiología Celular, uno de los institutos de investigación más importantes del país y de América Latina.

Sus contribuciones a la ciencia han sido notables y fundaron las bases del conocimiento sobre los procesos que regulan la excitabilidad neuronal, la epilepsia, así como la bioquímica y la función del neurotransmisor GABA. Más recientemente, su trabajo contribuyó al entendimiento de los mecanismos que conllevan a la muerte neuronal en patologías como la esclerosis lateral amiotrófica. Esta importante labor académica la desarrolló durante casi 60 años en la UNAM.

Su actividad científica fue ampliamente reconocida: primer Premio Universidad Nacional en Ciencias Naturales (1985), Premio Nacional de Ciencias y Artes (2002), Investigador Emérito de la UNAM y del Sistema Nacional de Investigadores, e integrante del Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República. También su labor editorial fue muy destacada: dirigió la revista *Ciencia* de la Academia Mexicana de Ciencias y fue miembro del comité editorial de tres prestigiadas revistas



científicas en su área de especialidad. Escribió varios libros de divulgación, entre ellos: *Las células de la mente* (FCE, 1987), con varias reediciones y reimpressiones, el cual se ha utilizado como libro de texto para alumnos de bachillerato.

Otra de sus grandes pasiones sobresale porque da cuenta del compromiso de Ricardo con la ciencia y la sociedad: fue fundador del Colegio de Bioética e impulsor del conocimiento científico para encarar controversias importantes, como el uso de células troncales para la investigación, la interrupción legal del embarazo y la legalización de las drogas.

Observador crítico, gozoso participante de múltiples aspectos de la cultura, también fue un esposo, padre y abuelo amoroso, amigo leal, maestro riguroso y entregado. La partida de Ricardo es una pérdida enorme para sus familiares, amistades, estudiantes y para la vida académica, científica y cultural de México.

CLORINDA ARIAS

Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM
carias@unam.mx

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



La AMC anunció a los ganadores de los Premios de Investigación 2021

El Consejo Directivo de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) dio a conocer a los ganadores de los Premios de Investigación 2021 para científicos jóvenes. Se trata de la distinción más importante que otorga la Academia, destinada a investigadores que no hayan cumplido 40 años, en el caso de los hombres, y 43 años, en el de las mujeres.

Desde que se instituyeron en 1961, la Comisión de Premios de la AMC evalúa la investigación de punta y observa criterios como el rigor, la calidad, la originalidad y la independencia, así como el liderazgo y el impacto de los trabajos. A la fecha se ha reconocido a 241 investigadores en las áreas de ciencias exactas, naturales, sociales, humanidades e ingeniería y tecnología.

Ganadores de los Premios de Investigación 2021 para científicos jóvenes

- **Ciencias exactas**

Felipe Pacheco Vázquez
Instituto de Física "Luis Rivera Terrazas"
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

- **Ciencias naturales**

Verónica Pérez de la Cruz
Laboratorio de Neurobioquímica y Conducta
Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía "Dr. Manuel Velasco Suárez"
Secretaría de Salud

- **Ciencias sociales**

Omar Felipe Giraldo Palacio
Departamento de Agricultura, Sociedad y Ambiente
El Colegio de la Frontera Sur

- **Humanidades**
Lucero Meléndez Guadarrama
Especialidad de Lingüística
Instituto de Investigaciones Antropológicas
Universidad Nacional Autónoma de México
- **Ingeniería y tecnología**
Héctor Arturo Ruiz Leza
Departamento de Investigación en Alimentos
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Coahuila

Natalie Millán Aguiñaga
Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California

- **Ingeniería y tecnología**
Nelly Sélem Mojica
Centro de Ciencias Matemáticas
Universidad Nacional Autónoma de México, campus Morelia

Ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L'Oréal-Unesco-AMC

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC) dio a conocer a las cuatro ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L'Oréal-Unesco-AMC 2021, reconocimiento instituido en 2007 por L'Oréal-México, la Comisión Mexicana de Cooperación con la Unesco (Conalmex), la Oficina de la Unesco en México y la AMC, para promover la participación de las mujeres en la ciencia.

Las ganadoras, como lo establece la convocatoria, son científicas de nacionalidad mexicana que obtuvieron el grado de doctora en los últimos cinco años y no han cumplido 40 años. Cada beca consiste en \$100000 pesos (aportados por L'Oréal-México), recursos económicos que deberán destinarse al proyecto presentado.

Ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L'Oréal-Unesco-AMC 2021

- **Ciencias exactas**
Martha Gabriela Gómez Vasconcelos
Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
- **Ciencias naturales**
Jenny Georgina Turcott Chaparro
Instituto Nacional de Cancerología

Se crea el Premio para Mujeres en la Ciencia L'Oréal-Unesco-AMC

Este año se instituyó el Premio para Mujeres en la Ciencia L'Oréal-Unesco-AMC, para distinguir a investigadoras consolidadas menores de 68 años y con el objetivo de apoyar la participación de mujeres en la ciencia. De manera anual se otorgarán dos premios de \$150000 pesos cada uno (aportados por L'Oréal-México), que deberán ser destinados al desarrollo de un proyecto de investigación científica en curso, en algunas de las áreas de ciencias exactas, ciencias naturales o en ingeniería y tecnología.

En esta ocasión, para el año 2021, el jurado de la AMC otorgó el Premio a:

- María Araceli Hernández Ramírez
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Nuevo León
- María del Carmen Clapp Jiménez Labora
Instituto de Neurobiología
Universidad Nacional Autónoma de México

Se llevó a cabo el XXXI Verano de la Investigación Científica

Para la edición 2021, el XXXI Verano de la Investigación Científica consistió en un ciclo de 75 conferencias acerca de temas de muy diversos campos del conocimiento científico, las cuales se hicieron en forma virtual del 28 de junio al 10 de agosto de

2021. En total se aceptaron 943 estudiantes. Para obtener constancia de participación, los estudiantes tuvieron que escribir reportes de calidad a partir de tres conferencias, para su evaluación por parte de cerca de 200 investigadores invitados.

Se inaugura el webinar "Tu mundo con ciencia"

Inicio el ciclo de conferencias "Tu mundo con ciencia", impartido por exbecarias ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L'Oréal-Unesco-AMC. Las pláticas se transmiten el segundo jueves de cada mes por los canales de las redes sociales de la Academia. Las conferencias están orientadas a jóvenes de bachillerato, para fomentar las vocaciones científicas.

Olimpiadas internacionales e iberoamericanas de Química y de Biología

Del 23 de julio al 2 de agosto de 2021, se llevó a cabo la LIII Olimpiada Internacional de Química en Tokio, Japón, de manera virtual. México participó con una delegación de cuatro estudiantes, quienes obtuvieron dos medallas de bronce y una mención honorífica.

Asimismo, del 18 al 23 de julio de 2021 se realizó la XXXII Olimpiada Internacional de Biología en Portugal, de forma virtual, en la que participaron cuatro estudiantes mexicanos que consiguieron dos medallas de bronce.

Por otra parte, en la XIV Olimpiada Iberoamericana de Biología, celebrada de manera virtual del 6 al 10 de septiembre de 2021 y coordinada por Costa Rica, la delegación mexicana, constituida por cuatro estudiantes, obtuvo dos medallas de bronce y dos menciones honoríficas.

Adicionalmente, la XXV Olimpiada Iberoamericana de Química se llevará a cabo en octubre de 2021, de manera virtual, coordinada por Brasil.

Charlas con autores de la revista *Ciencia*

Continúan las pláticas con diversos autores que han contribuido en diferentes números de *Ciencia*, transmitidas en las redes sociales de la revista. Las charlas más recientes han sido:

- 22 de junio de 2021:
"Dolor y cáncer"
Juan Miguel Jiménez Andrade
Universidad Autónoma de Tamaulipas
- 20 de julio de 2021:
"Aprender a analizar cine" y presentación del número: "El cine como herramienta de enseñanza"
Lauro Zavala
Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Xochimilco
- 2 de agosto de 2021:
"Vacunas contra la COVID-19 en México"
Leopoldo Santos Argumedo
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional
- 17 de agosto de 2021:
"Cuando la pantalla se tiñe de verde"
Rocío González de Arce
Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Xochimilco
- 7 de septiembre de 2021:
"Cómo enseñar y aprender matemáticas con el cine"
José María Sorando Muzás
Federación Española de Sociedades de Profesores de Matemáticas

Conferencias virtuales de la AMC

Debido a la pandemia por la COVID-19, la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) inauguró un ciclo de conferencias virtuales en sus redes sociales. Este programa inició sus transmisiones en julio de

2020 y se realiza el último miércoles de cada mes con investigadores especialistas en temas de relevancia científica para el país.

Ingreso de México al SCAR

El Comité Científico de Investigación Antártica (SCAR, por sus siglas en inglés), organización temática del Consejo Internacional de Ciencias (ISC), fue creado en 1958 con la misión de desarrollar y coordinar la investigación científica internacional en la Antártida. También provee asesoría científica a organizaciones internacionales sobre temas de ciencia y conservación que afecten a la Antártida y al planeta. Actualmente, 45 países son miembros.

Con el apoyo de la Agencia Mexicana de Estudios Antárticos, en 2021 la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) ingresó como Miembro Asociado del SCAR, en representación de la comunidad científica mexicana.

Obituario

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC) lamenta profundamente los fallecimientos de sus miembros Fernando Alba Andrade, Ricardo Tapia Ibargüengoytia y Alfonso Larqué Saavedra.

Fernando Alba fue presidente de la AMC durante 1967. Investigador emérito del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), fue forjador de la física experimental y de la instrumentación científica en el país.

Ricardo Tapia, miembro titular de la AMC, fue director de la revista *Ciencia* en el periodo 1997-2000. Investigador emérito del Instituto de Fisiología Celular de la UNAM, fungió durante muchos años como director del programa de intercambio con la Royal Society de Londres en la AMC.

Alfonso Larqué, miembro titular de la Academia, fue coordinador de la sección de Agrociencias de la AMC. Investigador del Centro de Investigación Científica de Yucatán, fue presidente fundador de la sección Sur-Sureste de la AMC.

En nuestro próximo número de
enero-marzo de 2022:

Novedades científicas



Coordinación de la
Investigación Científica UNAM

