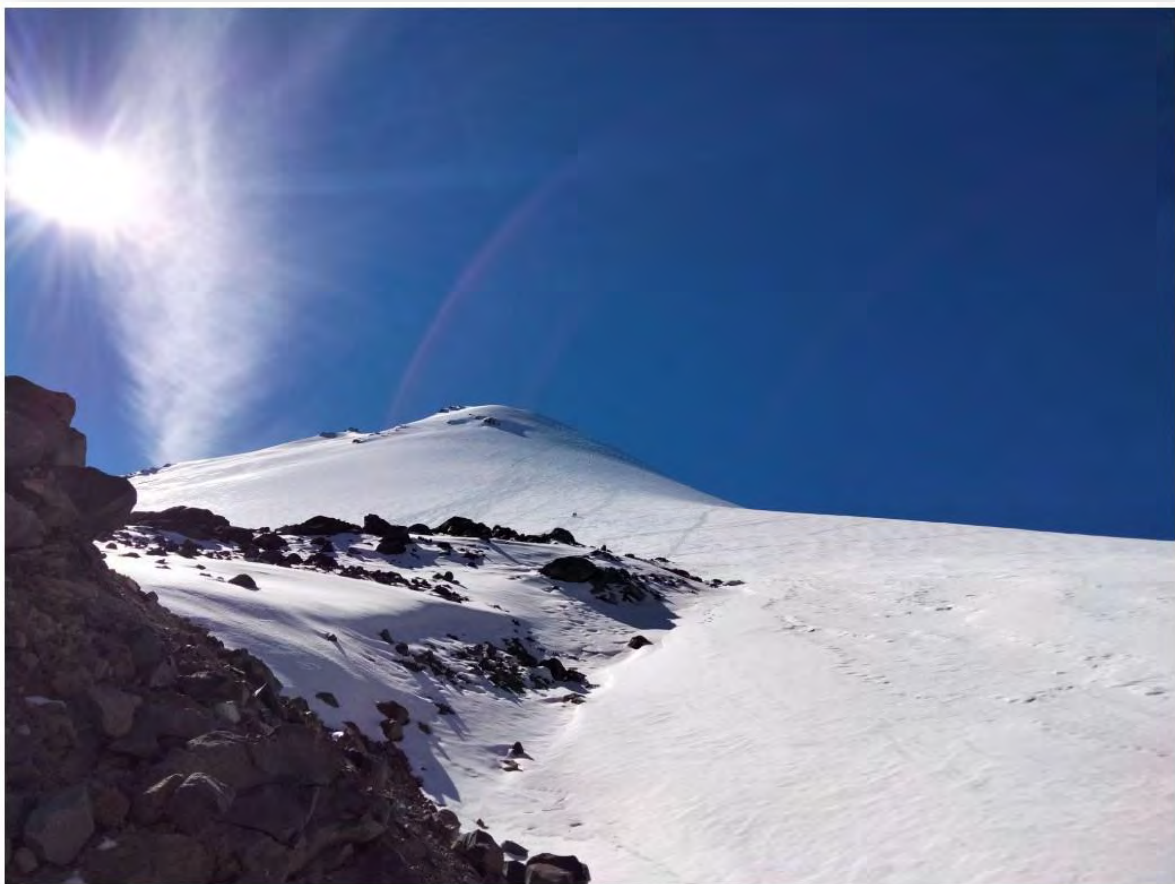


# ENSEÑANZA Y COMUNICACIÓN DE LAS GEOCIENCIAS



**Volumen 2 número 1, junio 2023**



---

#### IMAGEN DE LA PORTADA

Frente del Glaciar de Jamapa, cara norte del Citlaltépetl en el centro de México (5100 m s.n.m.)  
Fotografía de Carrillo-Chávez *et al.*, 2023.

#### IMAGEN DE LA CONTRAPORTADA

Extracción de un núcleo de hielo somero en el Glaciar del Citlaltépetl.  
Fotografía de Carrillo-Chávez *et al.*, 2023.



Esta obra está bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución No Comercial 4.0  
ENSEÑANZA Y COMUNICACIÓN DE LAS GEOCIENCIAS, Revista electrónica, Año 2,  
No.1, junio de 2023, es una publicación semestral editada por la Universidad Nacional  
Autónoma de México, Campus Juriquilla-UNAM, Querétaro, Estado de Querétaro, a través del  
Centro de Geociencias, Boulevard Juriquilla No. 3001, Colonia Jurica La Mesa, Juriquilla,  
Querétaro, Qro., C.P. 76230, Tel. (+52) (442) 2381104, exts. 177 y 196,  
**<http://encomunicacionct.geociencias.unam.mx> ; [encomunicacionct@geociencias.unam.mx](mailto:encomunicacionct@geociencias.unam.mx) ,**

Editora responsable: Dra. Susana Alicia Alaniz Álvarez. Certificado de Reserva de Derechos de Autor número:  
04-2022-110710533300-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de  
Autor. Responsable de la última actualización de este número, Centro de Geociencias, Dra. Susana Alicia  
Alaniz Álvarez, Boulevard Juriquilla No. 3001, Colonia Jurica La Mesa, Juriquilla, Querétaro, Qro., C.P. 76230.  
Fecha de la última modificación, 23 de junio de 2023.

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores y no refleja el punto de vista de los árbitros,  
del Editor o de la UNAM. Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y  
cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.



## EDITORES EN JEFE

### Sección Enseñanza

Dra. Susana Alicia Alaniz Álvarez  
alaniz@geociencias.unam.mx

### Sección Comunicación

M. en C. Rodrigo Gutiérrez Navarro  
rgutierrez@geociencias.unam.mx

Centro de Geociencias, campus Juriquilla  
Universidad Nacional Autónoma de México

## EDITORES ASOCIADOS

Dra. Dalila Aldana Aranda  
daldana@cinvestav.mx  
CINVESTAV  
Instituto Politécnico Nacional Mérida

Dra. Laura Mori  
mori@unam.mx  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Thierry Calmus  
arnithy@gmail.com  
Instituto de Geología  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Ángel F. Nieto Samaniego  
afns@geociencias.unam.mx  
Centro de Geociencias, campus Juriquilla  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Claudia C. Mendoza Rosales  
claus@unam.mx  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Gilberto Silva Romo  
silvarg@unam.mx  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Julieta Fierro  
julieta@astro.unam.mx  
Instituto de Astronomía  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Yadira H. Hernández Pérez  
yadira.hernandez@enp.unam.mx  
Escuela Nacional Preparatoria  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Enrique González Torres  
eagtgaia@unam.mx  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Anthony Ramírez Salazar  
r.s.anthonyy@gmail.com  
Instituto de Geología Universidad Nacional  
Autónoma de México

M. en C. Raiza Pilatowsky Gruner  
raiza.pila@gmail.com  
Directora Estudios Planeteando

Dr. Saul A. Villafañe Barajas  
svillafanebarajas@uakron.edu  
The University of Akron

Dr. Bernardo A. Bastien Olvera  
bbastien@ucsd.edu  
University of California, San Diego

M. en C. Mónica G. Ramírez Calderón  
monicald@ciencias.unam.mx  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Planeteando

## EDITORAS TÉCNICAS

Dra. Marina Vega  
mvega@geociencias.unam.mx  
Centro de Geociencias, campus Juriquilla  
Universidad Nacional Autónoma de México

Mtra. Sandra Fuentes Vilchis  
sandra.fuentes@dgenp.unam.mx  
Escuela Nacional Preparatoria  
Universidad Nacional Autónoma de México

## Enseñanza y Comunicación de las Geociencias

Centro de Geociencias, campus Juriquilla UNAM | Boulevard Juriquilla núm. 3001, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México | [encomunicacionct@geociencias.unam.mx](mailto:encomunicacionct@geociencias.unam.mx)



## CONTENIDO

Pág.

<b>¡A VECES SE GANA, SIEMPRE SE APRENDE! LA GAMIFICACIÓN, UNA PROPUESTA METODOLÓGICA ACTIVA Y MOTIVADORA PARA EL APRENDIZAJE DE GEOGRAFÍA</b>	<b>1</b>
Viridiana Yazmin Jiménez-Zuñiga <i>Colegio Queen Mary School, Sección Preparatoria</i> <b>Palabras clave:</b> Gamificación, refuerzo positivo, refuerzo negativo, motivación extrínseca, motivación intrínseca, <i>Genially, Mobyty, Nearpod</i> . (mayores de 15 años)	
<b>EXPLORANDO LA VIDA EN UN AMBIENTE EXTREMO: EXTREMÓFILOS EN EL CRÁTER VOLCÁNICO RINCÓN DE PARANGUEO, GUANAJUATO</b>	<b>5</b>
Janet Sánchez-Sánchez y Mariano Cerca <i>Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México</i> <b>Palabras clave:</b> Microbialitas, cráter Iago, Rincón de Parangueo, microorganismos extremófilos, ambiente extremo. (mayores de 15 años)	
<b>GEOQUÍMICA GLACIAR: REGISTRO CLIMÁTICO AMBIENTAL QUE SE PIERDE</b>	<b>10</b>
Alejandro Carrillo-Chávez, Daniela K. Calvo-Ramos, Carolina Muñoz-Torres y Rocío García <i>Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México</i> <b>Palabras clave:</b> Geoquímica glaciar ambiental, metales pesados, Iztaccíhuatl, Citlaltépetl. (mayores de 15 años)	
<b>COMETAS: ENTRE HITOS, MITOS E HISTORIAS</b>	<b>16</b>
Alejandro Paredes-Arriaga y Mariana Amador-Ortega <i>Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.</i> <b>Palabras clave:</b> Cola, Halley, órbita, gas, polvo (mayores de 15 años)	



**ESTRUCTURA VERTICAL DE LOS OCEÁNOS: 24**

**DE LA PRÁCTICA A LA COMPRENSIÓN**

Alejandro Estradas-Romero y Ana Margarita Hermoso-Salazar  
*Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.*

**Palabras clave:** Oceanografía, masas de agua, salinidad,  
temperatura, densidad, estratificación, mezcla. (mayores de 15 años)

**DETECCIÓN DE LAS FRECUENCIAS DEL LÉXICO DE UN TEXTO CIENTÍFICO  
CON LA APLICACIÓN WEB LEX-A PARA APOYAR 28**

**EL APRENDIZAJE DE LENGUAS EXTRANJERAS**

Yadira A. Hernández-Pérez, Susana A. Alaniz-Álvarez,  
Julio C. Martínez-Troncoso, Michelangelo Martini y  
Ana D. Esparza-Herrera

*Escuela Nacional Preparatoria, Plantel 5,  
Universidad Nacional Autónoma de México,*

**Palabras clave:** Ciencias de la Tierra, italiano, divulgación científica,  
comprensión de lectura, vocabulario, aplicación web. (mayores de 15 años)

**ACERCAMIENTO A LA LENGUA ITALIANA CON EXPERIMENTOS DE GALILEO 32**

Susana A. Alaniz-Álvarez, Michelangelo Martini, Ana D. Esparza-Herrera,  
Rodrigo Gutiérrez-Navarro y Yadira A. Hernández-Pérez,  
Laura Mori y Ángel F. Nieto-Samaniego

*Centro de Geociencias, Campus Juriquilla,  
Universidad Nacional Autónoma de México*

**Palabras clave:** enseñanza de italiano, ciencia experimental,  
Galileo Galilei, aprendizaje transversal. (mayores de 15 años)

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CURSO EN LÍNEA PARA MODELAR E INVERTIR DATOS DE  
PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA 37**

Aide Esmeralda López-González, Andrés Tejero-Andrade, Alejandro García-Serrano,  
Miguel Velasco-Lindero, Mauricio Navedo-Cruz, Emmanuel Ortiz- Jiménez, David  
Uc-Canul, Pablo Ochoa-León y Alfonso Villavicencio-García

*Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México,*

**Palabras clave:** Ingeniería Geofísica, prospección eléctrica, modelación e inversión geoelectrica  
en 1D, 2D y 3D, software de interpretación de datos geoelectricos en corriente continua. (mayores  
de 18 años)



**RETENCIÓN DE CO<sub>2</sub> POR MINERALIZACIÓN EN ROCAS. UNA PROPUESTA DE  
PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS EN EL LABORATORIO** **43**

Josué H. Almazán-Mendoza, A. Paulina Gómora-Figueroa,  
Laura Mori y Enrique A. González-Torres

*Departamento de Ingeniería Petrolera, División de Ciencias de la Tierra, Facultad de  
Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*

**Palabras clave:** Mineralización de CO<sub>2</sub>, almacenamiento geológico, geoquímica, rocas ígneas,  
olivino, piroxeno, calentamiento global. (mayores de 18 años)

**EXCURSIONES GEOLÓGICAS VIRTUALES: UNA HERRAMIENTA PARA LA  
DOCENCIA Y LA DIFUSIÓN DE LA GEOLOGÍA DE MÉXICO.** **52**

**EJEMPLO TRANSECTO DURANGO-MAZATLÁN**

Enrique González-Torres, Luca Ferrari,  
Sergio Macías-Medrano y Javier Mancera-Alejándrez

*Departamento de Geología, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de  
Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.*

**Palabras clave:** Excursión Geológica Virtual, Sierra Madre Occidental, Autopista Durango-Mazatlán,  
Geología de México, drones, virtualidad. (mayores de 18 años)



## EDITORIAL

Esperamos que este número de la RECG sea de gran interés dado que presentamos una variedad de artículos que abordan temas novedosos en diferentes áreas de las Ciencias de la Tierra. Viridiana Jiménez propone la gamificación como una estrategia metodológica activa y motivadora para el aprendizaje de Geografía, permitiendo a los estudiantes adquirir conocimientos y habilidades de manera lúdica y participativa. En el artículo de Janet Sánchez y Mariano Cerca se aborda el tema de comunidades microbianas extremófilas en Rincón de Parangueo, Guanajuato y se destaca que dichos organismos son importantes para entender el origen, evolución y distribución de la vida en la Tierra. Alejandro Carrillo y colaboradores describen las técnicas de Geoquímica Glaciar Ambiental y destacan la importancia del estudio de metales en los glaciares de volcanes en el contexto del cambio climático global y ambiental antropogénico. En el trabajo de Alejandro Paredes y Mariana Amador se hace un recuento de cometas que han marcado la historia humana, mencionando desde el impacto social que han tenido, hasta avances de científicos importantes como Kepler o Newton; inclusive los descubrimientos recientes de moléculas orgánicas trascendentales para la química prebiótica y el posible origen de la vida asociada a dichos objetos celestes. A su vez, Alejandro Estradas y Margarita Hermoso describen cómo representar de manera práctica y sencilla la estratificación y formación de masas de agua en el océano. También explican por qué se presentan las capas de agua con diferentes propiedades físicas y químicas. En su manuscrito, Yadira Hernández y colaboradores dan a conocer el programa LEX-A para contabilizar la frecuencia de vocablos en un texto en cualquier lengua y cómo puede ser de utilidad para facilitar el aprendizaje de lenguas extranjeras. En el artículo de Susana Alaniz y colaboradores se presenta un taller de italiano que tiene como propósito enseñar terminología científica en dicha lengua a partir de la realización de experimentos para entender la gravedad, se aplican experimentos diseñados por Galileo Galilei. Por su parte, Esmeralda López y colaboradores presentan un curso en línea de modelado e inversión de datos geoelectrónicos. En este curso se emplea software libre y paquetes de demostración para enriquecer y complementar la experiencia educativa del alumnado en la asignatura de Prospección Eléctrica de la carrera de Ingeniería Geofísica. En el trabajo de Josué Almazán y colaboradores plantean una propuesta de laboratorio que sirva como guía para el almacenamiento geológico del CO<sub>2</sub>. Finalmente, González-Torres y sus coautores presentan una Excursión Geológica Virtual a lo largo de un transecto de la Sierra Madre Occidental (SMOc). Esta excursión muestra vistas panorámicas, afloramientos y muestras de roca que son explicados por Luca Ferrari, quién ha publicado varios trabajos de revisión sobre la SMOc.

Susana A. Alaniz Álvarez  
Rodrigo Gutiérrez Navarro

# ¡A VECES SE GANA, SIEMPRE SE APRENDE! LA GAMIFICACIÓN, UNA PROPUESTA METODOLÓGICA ACTIVA Y MOTIVADORA PARA EL APRENDIZAJE DE GEOGRAFÍA

Viridiana Yazmin Jiménez-Zuñiga

Colegio Queen Mary School, Sección Preparatoria, Río Balsas 12, Alcaldía Cuauhtémoc, C.P. 06500, Ciudad de México, México.

yazvira8163@gmail.com (autora para correspondencia)

## RESUMEN

La transformación del aprendizaje durante y después de la pandemia ha dejado el desafío de adoptar nuevas metodologías educativas propias del siglo XXI. El contexto social y cultural de la población estudiantil de todos los niveles educativos, demanda propuestas renovadas y pertinentes para lograr un aprendizaje efectivo.

Por ello, la incorporación de la gamificación educativa se convierte en una metodología que se ajusta a las necesidades actuales. Se entiende a la gamificación como una metodología que aplica los elementos del juego en un entorno educativo, haciendo uso de la motivación, generando diversión y satisfacción; metodología que está centrada en el alumnado, además permite el manejo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Con la incorporación de las TIC al sector educativo se han generado novedosas y diversas herramientas digitales orientadas a gestionar métodos de enseñanza, las cuales promueven el desarrollo de competencias en docentes y estudiantes, la aplicación de las TIC favorece el proceso de enseñanza aprendizaje, donde se aprende de manera divertida, emocionante, libre, reflexiva, dinámica, dejando atrás la enseñanza tradicional.

De acuerdo a lo anterior, el propósito de este trabajo es presentar tres recursos didácticos gamificados, en los que se emplean diversas herramientas digitales (aplicaciones o plataformas) con los cuales se ejemplifica la diversidad de contenidos académicos.

Los recursos didácticos gamificados son los productos de las actividades del diplomado: Enseñanza de Ciencias de la Tierra, que es impartido por el Centro de Geociencias de la UNAM, correspondientes a los módulos: Deriva continental (*Mobbyt*), Clima (*Genially*) y Ondas (*Nearpod*).

Se concluye que el empleo de la gamificación educativa fortalece el aprendizaje significativo, incentivando el compromiso de los estudiantes para alcanzar los aprendizajes esperados.

**Palabras clave:** Gamificación, refuerzo positivo, refuerzo negativo, motivación extrínseca, motivación intrínseca, *Genially*, *Mobbyt*, *Nearpod*.

## ABSTRACT

*The transformation of learning during and after the pandemic has left the challenge of adopting new educational methodologies typical of the 21st century. The social and cultural context of the student population of all educational levels demands renewed and relevant proposals to achieve effective learning.*

*For this reason, the incorporation of educational gamification becomes a methodology that adjusts to current needs. Gamification is understood as a methodology that applies game elements in an educational environment, using motivation generating fun and satisfaction; methodology focused on students, also allows the management of information and communication technologies (ICTs). With the incorporation of ICTs to the educational sector, new and diverse digital tools have been generated aimed at managing teaching methods, which promote the development of skills in teachers and students, the application of ICTs favors the teaching process. Learning, where you learn in a fun, exciting, free, reflective, and dynamic way, leaving traditional teaching behind.*

*According to the above, the purpose of this work is to present three gamified teaching resources, in which various digital tools (applications or platforms) are used, with which the diversity of academic content is exemplified.*

*The gamified didactic resources are the products of the activities of the diploma course: Teaching Earth Sciences, which is taught by the UNAM Geosciences Center, corresponding to the modules: Continental drift (*Mobbyt*), Climate (*Genially*) and Waves (*Nearpod*). It is concluded that the use of educational gamification strengthens meaningful learning, encouraging the commitment of students to achieve the expected learning.*

**Keywords:** Gamification, positive reinforcement, negative reinforcement, extrinsic motivation, intrinsic motivation, *Genially*, *Mobbyt*, *Nearpod*



## INTRODUCCIÓN

El impacto de los videojuegos en los últimos años, ha logrado alcanzar a muchas y varias audiencias generando en ellas momentos de diversión, alegría, tensión, euforia y otras emociones (Barrios y Gutiérrez de Piñeros, 2020). Su éxito y crecimiento agigantado no han pasado desapercibido para otras industrias del entretenimiento como el cine, el teatro, la música y otras, quienes han tomado algunos elementos del juego para sus producciones.

Los ambientes ajenos a los videojuegos y de las industrias del entretenimiento, como el sector económico y educativo, buscan emular todo elemento que vuelve a los videojuegos una fuente de euforia, motivación y diversión. Bajo estas circunstancias nace la práctica de la gamificación educativa, la cual se entiende como una metodología que retoma elementos del juego con fines educativos, haciendo uso de la motivación, del interés, de la comunicación entre pares, generando diversión y satisfacción; la metodología está centrada en el alumnado (Frías, 2021), además, permite el manejo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). A diferencia de las prácticas lúdicas que toman un juego en su totalidad sin perseguir un objetivo educativo.

### Conductismo y su vinculación con la gamificación

El conductismo es una teoría del aprendizaje que se basa en el comportamiento humano a través de la observación. Lo que permite conocer los estímulos que recibe y las respuestas que provocan en una persona (aprendiz).

Partiendo de la premisa de que las consecuencias son el resultado del comportamiento, entonces, se puede cambiar el comportamiento a partir de las consecuencias. De ahí que, resaltan tres conceptos que se vinculan con la gamificación:

- Observación, el aprendiz observa lo que hacen los demás.
- Retroalimentación, el aprendiz realiza una acción y obtiene una respuesta.
- Refuerzo, el aprendiz aprende cuando se refuerza su estímulo.

Es de gran importancia el concepto de refuerzo, el cual se refiere a cualquier acción que mejore la probabilidad de repetir el comportamiento o conducta, por consiguiente, se formarán asociaciones para fortalecer el aprendizaje.

En la gamificación se presentan dos tipos de refuerzos: refuerzo positivo y refuerzo negativo. Los refuerzos positivos buscan otorgar una "recompensa" para que la conducta o comportamiento se repita, en cambio, los refuerzos negativos son desagradables y buscan impedir una conducta o comportamiento no esperado, por ejemplo, la pérdida de la "recompensa".

### Motivación en la gamificación

La gamificación dentro de un ambiente de aprendizaje busca mejorar la motivación mediante elementos propios del juego, vinculados con la generación de neurotransmisores como la dopamina y la serotonina (Benavides y Flores, 2019). Al diseñar una actividad de gamificación, se precisa mantener aspectos esenciales como la diversión y la motivación, que puede ser intrínseca o extrínseca.

La motivación intrínseca nace del interés personal que tiene cada individuo por sus aspiraciones, a diferencia de la "motivación extrínseca", la cual responde a la teoría de estímulo y respuesta que, dentro de la gamificación se encuentra en las recompensas,

por ejemplo, la puntuación al concluir una acción o las insignias al alcanzar un nivel. Esta última motivación aumenta por la incertidumbre de la recompensa, generada por la descarga de dopamina que es proporcional a la magnitud de la recompensa.

### Elementos fundamentales de la gamificación

Recordemos que la gamificación toma elementos propios del juego, de los cuales destacan: la dinámica, la mecánica y los componentes del juego (Choi *et al.*, 2021).

La dinámica está orientada a la motivación del aprendiz para continuar jugando y alcanzar las metas propuestas del juego. Algunas de las dinámicas utilizadas se muestran en la Figura 1. La mecánica está dirigida a recompensar al jugador de acuerdo al reto o desafío concluido. La Figura 2 muestra algunas mecánicas presentes en la gamificación. Los componentes del juego, están referidos a la asociación de los elementos de las dinámicas y las mecánicas de juego. Los componentes varían en tipo y cantidad, se expresan utilizando instrumentos como: los equipos, las colecciones, la barra de progreso, las insignias, los *rankings* y algunos otros mostrados en la Figura 3.



Figura 1. Dinámicas presentes en la gamificación.



Figura 2. Mecánicas empleadas en la gamificación.



Figura 3. Componentes del juego.

### Herramientas digitales de gamificación

Algunas de las manifestaciones de los grandes avances de la tecnología en el sector educativo son las herramientas de gamificación, que pueden ser aplicaciones o plataformas digitales, de las cuales destacan: *Kahoot*, *Wordwall*, *Mentimeter*, *Educaplay*, *Blooket*, *Padlet*, *Socrative*, *Bamboozle*, Juegos geográficos entre otras. Para la presente propuesta se decidió trabajar con: *Genially*, *Mobbyt* y *Nearpod*. Es importante mencionar que ninguna de dichas herramientas solicita registro, se tiene acceso al recurso compartiendo el enlace o el código de ingreso.

#### Genially

Es una plataforma digital muy completa para crear múltiples experiencias interactivas. *Genially* cuenta con plantillas prediseñadas que se pueden reutilizar, los recursos creados se pueden compartir y ser editados. La plataforma cuenta con plantillas base para crear:

- Ajedrez
- *Breakout*
- *Escape room*
- *Jeopardy*
- *Jumanly*
- Laberintos
- Olimpiadas
- Serpientes y escaleras
- Tres en raya

En la Figura 4 se muestra un ejemplo del recurso gamificado: [Un clima cambiante](https://n9.cl/1gfjo). La dirección electrónica para ingresar está en: <https://n9.cl/1gfjo>

Figura 4. Portada del escape room: [Un clima cambiante](https://n9.cl/1gfjo).

#### Mobbyt

Es una plataforma digital que permite crear diversos tipos de recursos educativos de gamificación que permite a los usuarios (docentes y alumnos) crear videojuegos de manera muy sencilla. De esta forma, es posible diseñar las siguientes mecánicas disponibles:

- Coincidencias
- Duchazo
- *Escape room*
- Historietas
- La oca
- Tarjetas de memorias
- Trivias

La Figura 5 muestra la presentación del ejemplo de juego multinivel: [Deriva Continental](https://n9.cl/m6o8n). La dirección electrónica para ingresar está en:

<https://n9.cl/m6o8n>

Figura 5. Portada de juego multinivel: [Deriva Continental](https://n9.cl/m6o8n).

#### Nearpod

Es una aplicación que permite crear recursos de manera sencilla, la herramienta admite vincular otros recursos de otras aplicaciones, también permite llevar un registro de cada participante. Los contenidos a crear son:

- Buscando pares
- Completar espacios
- Dibujo
- *Memotest*
- Paseo virtual
- Simulaciones
- *Time to Climb*
- *Videoquiz*

Por último, en la Figura 6 se muestra el inicio del ejemplo de recurso gamificado: [Time to Climb](https://n9.cl/gnyka). La dirección electrónica para ingresar está en: <https://n9.cl/gnyka>

Figura 6. Portada del juego [Time to Climb](https://n9.cl/gnyka).

## CONCLUSIONES

Para alcanzar un aprendizaje significativo se necesita despertar la curiosidad y motivar a los alumnos, por ello, es necesario e importante emplear metodologías de enseñanza - aprendizaje que sean estimulantes para ellos. Por ejemplo, la gamificación permite afianzar los nuevos conocimientos de una manera muy divertida y amigable, facilitando la práctica docente. Cuando las clases no son dinámicas, el aprendizaje se vuelve indiferente e incluso innecesario para los educandos. Por lo cual, es imperativo incorporar propuestas de trabajo que involucren recursos didácticos gamificados como los presentados en este trabajo que permiten fortalecer los aprendizajes esperados.

## AGRADECIMIENTOS

Al diplomado en Enseñanza de Ciencias de la Tierra del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, del cual surgen como productos los recursos educativos gamificados que se presentaron en esta propuesta. Agradezco al arbitraje por los comentarios y sugerencias que permitieron enriquecer y fortalecer este trabajo. Quiero agradecer de manera particular a Lydia Yasojara Zárate Jiménez, por el apoyo en la elección de los “tipos de juegos” identificando cuales pueden ser los más atractivos, siendo ella ejemplo del público objetivo.

## REFERENCIAS

- Barrios, H., y Gutiérrez de Piñeros, C. (2020). Neurociencias, emociones y educación superior: una revisión descriptiva. *Estudios Pedagógicos*. 46 (1).  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07052020000100363>
- Benavides, V., y Flores, R. (2019). La importancia de las emociones para la neurodidáctica. *Wimb Lu*. 14 (1), 25-53.  
<https://doi.org/10.15517/wl.v14i1.35935>
- Choi, E., Jung, Y., y Park, N. (2021). Estrategias para enseñar a los estudiantes de primaria los principios de la tecnología Blockchain mediante la implementación de la gamificación. *Sustentabilidad*. 14 (7), 3771. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/7/3771>.
- Frías, E. (07, 2021). La construcción de una clase gamificada durante la pandemia. Presentación de Caso. [Ponencia]. 12º Coloquio Interinstitucional de Docentes de la Universidad Iberoamericana, Puebla, México. <https://hdl.handle.net/20.500.11777/4921>

Manuscrito recibido: 11 de abril de 2023

Manuscrito corregido recibido: 7 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 23 de mayo de 2023

# EXPLORANDO LA VIDA EN UN AMBIENTE EXTREMO: EXTREMÓFILOS EN EL CRÁTER VOLCÁNICO RINCÓN DE PARANGUEO, GUANAJUATO

Janet Sánchez-Sánchez <sup>1\*</sup> y Mariano Cerca <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla, 3001, 76230, Juriquilla, Querétaro, México.

<sup>2</sup>Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla, 3001, 76230, Juriquilla, Querétaro, México.

\*janetsan@geociencias.unam.mx (autora para correspondencia)

## RESUMEN

En la Tierra existen microorganismos que viven desafiando los límites de la vida tal y como la conocemos y son llamados “extremófilos”. Hasta hace poco, creíamos que la vida sólo era capaz de desarrollarse en ciertas condiciones. Pero en los últimos años, científicos de todo el mundo han encontrado vida microscópica creciendo en condiciones ambientales extremas. En la historia de la Tierra, los microorganismos extremófilos han dejado su huella en forma de microbialitas. En la actualidad, estos pequeños seres aún participan en la formación de microbialitas en muchas partes del mundo. En México se han reportado en varios sitios, como los lagos de cráteres volcánicos en el centro del país, y Rincón de Parangueo es uno de ellos. El lago cráter Rincón de Parangueo es producto de una explosión freatomagmática que hasta hace pocas décadas contenía un lago en su interior; desafortunadamente, las actividades humanas han contribuido a la disminución del nivel del lago. La reducción paulatina del lago ha sido acompañada por el aumento significativo de la salinidad y el pH del agua, propiciando un ambiente extremo para el desarrollo de la vida microbiana extremófila. Dentro del cráter, comunidades microbianas precipitan carbonatos como parte de su actividad biológica, contribuyendo a la formación de microbialitas. Estudios geobiológicos realizados en diferentes zonas del cráter han reportado comunidades microbianas capaces de sobrevivir a las condiciones extremas del lugar. El desarrollo de comunidades microbianas extremófilas se ha documentado principalmente en tres zonas del cráter: 1) antigua costa del lago, 2) pozas remanentes y 3) sedimentos profundos del lago. El desarrollo de microorganismos extremófilos en ambientes tan peculiares como Rincón de Parangueo es de especial importancia para entender el origen, evolución y distribución de la vida en la Tierra. Además, son fuente de conocimiento científico y tecnológico, que puede ser aplicado en la búsqueda de vida en otros planetas con características extremas similares a las identificadas en la Tierra.

**Palabras clave:** microbialitas, cráter lago, Rincón de Parangueo, microorganismos extremófilos, ambiente extremo.

## ABSTRACT

*On Earth, some microorganisms that live defying the limits of life as we know it are called "extremophiles". Until recently, it was believed that life was only capable of developing under certain conditions. But in recent years, scientists around the world have found microscopic life growing in extreme environmental conditions. In Earth history, extremophile microorganisms have left their mark in the form of fossil microbialites. At present, these small beings still participate in the formation of microbialites in many parts of the world. In Mexico they have been reported in several places, such as volcanic crater lakes in the center of the country and Rincón de Parangueo is one of them. The Rincón de Parangueo crater lake is the product of a phreatomagmatic explosion, which until a few decades ago contained a perennial lake inside, unfortunately, human activities have contributed to the water level decrease. The gradual desiccation of the lake has been accompanied by a significant increase in the salinity and pH of the water, providing an extreme environment for the development of extremophile microbial life. Within the crater, microbial communities precipitate carbonates as part of their biological activity, contributing to the formation of microbialites. Geobiological studies carried out in different areas of the crater have reported microbial communities capable of surviving the extreme conditions of the place. The development of extremophile microbial communities has been documented mainly in three areas of the crater: 1) the former lake shoreline, 2) remnant pools, and 3) deep lake sediments. The development of extremophile microorganisms in such peculiar environments as Rincón de Parangueo is of special importance to understand the origin, evolution, and distribution of life on Earth. In addition, they are a source of scientific and technological knowledge that can be applied in the search for life on other planets with extreme characteristics similar to those identified on Earth.*

**Keywords:** microbialites, crater lake, Rincón de Parangueo, extremophile microorganisms, extreme environment.

## INTRODUCCIÓN

Prepárate porque estás a punto de conocer un lugar en nuestro planeta que pareciera salir de un cuento de ciencia ficción. A pesar del importante papel que juegan los microorganismos en el ambiente, muchos de nosotros tenemos una percepción negativa sobre los microbios en nuestra vida diaria. Conocemos a los microbios por su potencial de causar enfermedades en el ser humano. Sin embargo, olvidamos que son esenciales para sostener la vida en la Tierra y que la mayoría de ellos no causan enfermedades.

Para cambiar la percepción negativa sobre los microorganismos es necesario que el conocimiento científico sea transmitido a la sociedad. Entender qué son los microorganismos, cómo funcionan y la estructura de sus comunidades es necesario para saber cuál es su papel en la naturaleza. Este conocimiento nos podría ayudar a especular sobre la pregunta de si existe vida en otros planetas. Hasta el momento es una pregunta que no es posible contestar con certeza, pero hoy sabemos que existe una gran posibilidad de que la respuesta sea sí. Hasta hace poco, creíamos que la vida sólo era capaz de desarrollarse en las condiciones que consideramos “normales” como son la presencia de oxígeno, una temperatura cercana a 25 °C, presión cercana a 1 atmósfera, pH neutro, ausencia de radiación y ausencia de gases tóxicos.

En algunos lugares de la Tierra, se han descubierto microorganismos llamados “extremófilos” (derivado del Latin “*extremus*” que significa extremo y del Griego “*philia*” que significa amor) capaces de crecer y reproducirse en condiciones muy alejadas de lo que consideramos normal y que serían letales para otras formas de vida (Wharton, 2007; Horikoshi *et al.*, 2010). Organismos extremófilos han sido identificados y aislados aquí en la Tierra en lugares que parecen salir de cuentos de ciencia ficción: por ejemplo, ambientes con temperaturas superiores a los 100 °C como fumarolas submarinas, cráteres volcánicos y fuentes hidrotermales (Combie y Runnion, 1996). Otros pueden vivir en medios extremadamente fríos, como el hielo del océano Ártico y los lagos subglaciales del permafrost en la Antártica, con temperaturas de hasta -20 °C (Nicolaus *et al.*, 2000). En cambio, otros se han adaptado a vivir en ambientes ácidos como los que existen en las fuentes hidrotermales o en los residuos mineros (Johnson, 2009). También se desarrollan en lugares con una alta concentración de sales y alta radiación solar, como es el caso del desierto de Atacama (Connon *et al.*, 2007).

El objetivo de este trabajo es transmitir al público en general conceptos básicos sobre microorganismos extremófilos, contribuir al desarrollo de materiales que faciliten su aprendizaje e informar sobre la existencia de lugares en México y el mundo donde este tipo de microorganismos se desarrollan, en particular Rincón de Parangueo en el estado de Guanajuato, un sitio de gran valor para la comunidad científica. Aquí exploramos la presencia de microorganismos extremófilos en un cráter volcánico y buscamos que este texto y su material audiovisual sirvan como guía para el conocimiento ambiental de la zona.

### Microbialitas: las primeras formas de vida en la Tierra

En la historia de la Tierra los microorganismos extremófilos han dejado su huella en forma de microbialitas. El registro fósil más antiguo de microbialitas conocido hasta el momento se encuentra en Warrawoona, Australia, con más de 3 450 millones de años de antigüedad (Allwood *et al.*, 2006). En la actualidad, comunidades

de microorganismos siguen formando microbialitas en condiciones extremas. Un ejemplo son las estructuras más abundantes y diversas descubiertas en 1954 en la costa de Hamelin Pool Shark Bay en Australia, las cuales se desarrollaron en un ambiente marino hipersalino donde la salinidad puede alcanzar hasta 70 ‰ (partes por mil) o 7 %, el doble del agua de mar normal (Papineau *et al.*, 2005). Otro ejemplo son las aguas termales y géiseres en el Parque Nacional Yellowstone, en los Estados Unidos, donde habitan comunidades bacterianas y algas a temperaturas de hasta 70 °C (Combie y Runnion, 1996). Se desarrollan además en lagos de cráteres intercontinentales con condiciones de alta alcalinidad: tal es el caso de Lake Van en Turquía, donde se han reportado las estructuras más grandes conocidas hasta el momento con una altura de hasta 40 metros. Otras se desarrollan en lagos con regímenes tectónicos activos, como es el caso de África del Este, donde existen condiciones como alta alcalinidad, salinidad y altas temperaturas: ejemplo de ello son el lago Bogoria y el lago Magadi en Kenia; el lago Natron, el lago Magadi y el lago Embagi en Tanzania (Casanova, 1986).

### ¿Existen microbialitas en México?

Si, claro. No es necesario ir muy lejos para encontrarlas. En México el desarrollo de comunidades de microbios produciendo microbialitas se ha reportado en diversos sitios tales como la laguna de Bacalar en el estado de Quintana Roo, la Laguna Mormona y San Quintín en Baja California, Cuatro Ciénegas en Coahuila, Bahía Concepción en Baja California Sur y en los lagos cráter Alchichica en Puebla y Rincón de Parangueo en Valle de Santiago en Guanajuato. En particular, en las zonas volcánicas del centro de México los científicos han identificado comunidades microbianas formadoras de microbialitas en diferentes lagos dentro de cráteres volcánicos, entre los que destacan Alchichica en Puebla; Rincón de Parangueo, La Alberca y Joya de Yuriria, en Guanajuato; y Quechulac, Alberca Los Espinos, Aljojuca, La Preciosa, Tecuitlapa y Atexcac en Michoacán (Iniesto *et al.*, 2021). Estos cráteres son el producto de una explosión freático-magmática, es decir una explosión consecuencia del contacto entre magma y agua subterránea (Figura 1a). Suelen llenarse de agua años después de su formación y crean lagos de poca profundidad (Figura 1b) que en muchas ocasiones contienen agua con una alta salinidad y alcalinidad, lo que permite el desarrollo de microbialitas.

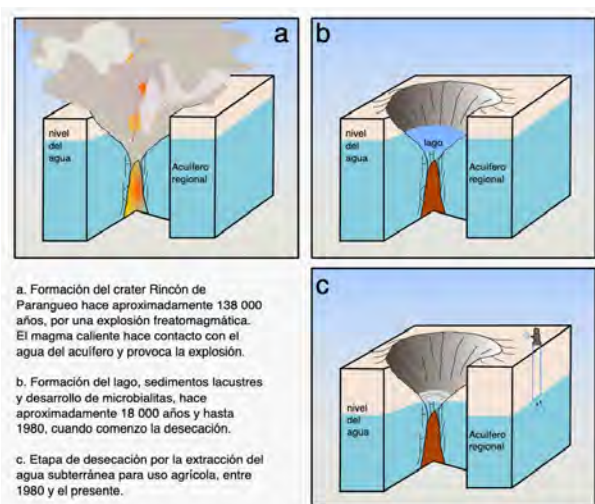


Figura 1. Esquema de la formación y evolución de Rincón de Parangueo en Guanajuato.

En este trabajo presentamos un lugar accesible en el centro de México donde se puede llevar a cabo una excursión para observar de primera mano cómo los microbios pueden crecer en ambientes extremos. Como material de apoyo se elaboró un video con la finalidad de presentar las microbialitas formadas por las comunidades microbianas en este lugar y sus principales características. El video se puede consultar en la siguiente dirección electrónica:

<https://www.youtube.com/watch?v=m5Tx1yAUM>

## RINCÓN DE PARANGUEO

### Un ambiente extremo para el desarrollo de vida extremófila

El cráter lago Rincón de Parangueo (Figura 2a) es clasificado como un ambiente extremo debido a las características fisicoquímicas del agua y a los sedimentos que se encuentran en su interior, tales como un alto contenido de sales, presencia de carbonatos, un pH alcalino  $\sim 10$ , altos niveles de radiación, altas tasas de evaporación y baja precipitación durante la mayor parte del año (Tabla 1, Sánchez-Sánchez *et al.*, 2021). La desecación del lago a partir del año 1980 debido a la sobreexplotación de agua subterránea para su uso en la producción agrícola de la zona (Figura 1c) ha provocado la salinización del agua remanente y ha dejado al descubierto estructuras sedimentarias (microbialitas) constituidas por comunidades microbianas (Figura 2c). Gracias a estudios geobiológicos realizados en Rincón de Parangueo se han identificado comunidades microbianas formadoras de microbialitas pertenecientes a los tres dominios de la vida (*Bacteria*, *Arquea* y *Eucaria*) y que además son capaces de sobrevivir a las condiciones extremas del cráter (Sánchez-Sánchez *et al.*, 2019).

**Tabla 1.** Datos generales del cráter Rincón de Parangueo y algunas propiedades fisicoquímicas del agua.

	Valor	Referencia
Coordenadas	20° 25' N, -101° 15' W	GPS diferencial
Altura sobre el nivel del mar	1700 m	Aranda-Gómez <i>et al.</i> , 2013
Diámetro del cráter	1300 m	Aranda-Gómez <i>et al.</i> , 2017
Edad en miles de años	137 ± 89	Aranda-Gómez <i>et al.</i> , 2013
pH	10-11	Sánchez-Sánchez <i>et al.</i> , 2021
Conductividad	165 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Armienta <i>et al.</i> , 2008
Temperatura	30 °C	<i>In situ</i>
Tipo de agua	CO <sub>2</sub> -Cl-Na	Armienta <i>et al.</i> , 2008
Nivel de radiación	Alto	www.wunderground.com
Tasa de evaporación	1935 mm/año	Escolero y Alcocer, 2004
Precipitación	715- 738 mm/año	Escolero y Alcocer, 2004

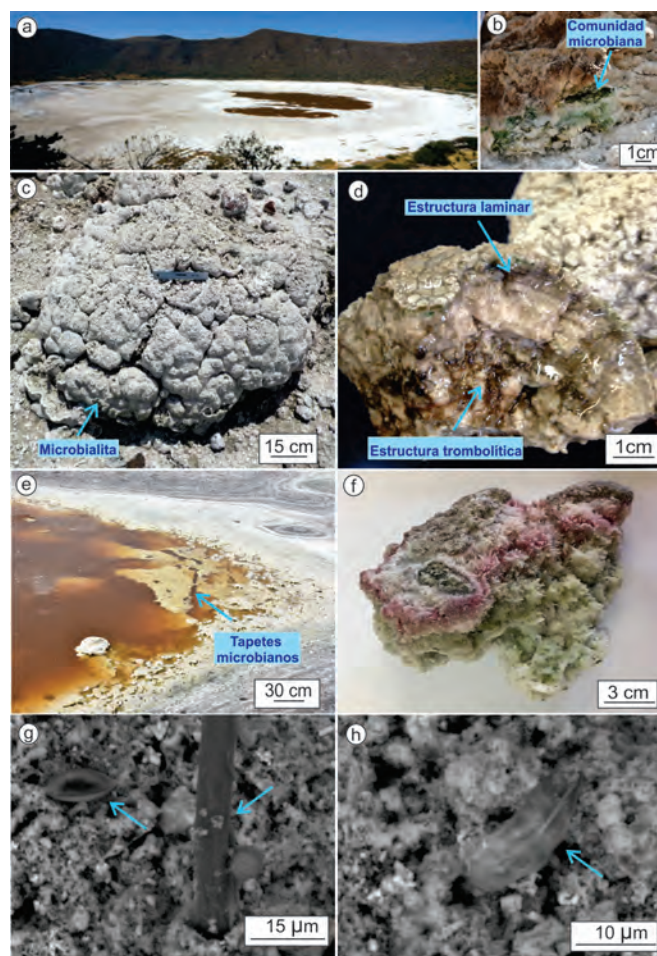


Figura 2. a) Vista panorámica del lago cráter Rincón de Parangueo. Pequeñas charcas se observan en la parte central. b) Sedimentos carbonatados ubicados en la falla geológica principal. El desarrollo de comunidades microbianas se puede apreciar por el color verde de los sedimentos. c) Microbialitas ubicadas en la falla principal del cráter. d) Estructura interna de las microbialitas, caracterizada por una estructura estromatolítica en la parte superficial y una estructura trombolítica hacia la parte central. e) Pequeñas pozas de agua en el centro del cráter. El tamaño y color varían durante el año. f) Tapetes microbianos formados en las pozas. Los colores del tapete son característicos del crecimiento de microorganismos. g), h) Imágenes de microscopía electrónica de muestras de sedimentos. En las imágenes se pueden observar microorganismos (flechas azules).

El desarrollo de comunidades microbianas se ha reconocido especialmente en tres zonas:

1. Antigua costa del lago: en esta zona se ubican las microbialitas con mayor tamaño en todo el cráter, que en promedio alcanzan un tamaño de 1 m de ancho y 1.8 m de largo (Figura 2c). Su estructura interna está caracterizada por una sedimentación laminar o estromatolítica en la parte superficial y una estructura trombolítica, es decir amorfa e irregular, hacia el núcleo (Figura 2d). El desarrollo de microbialitas forma un anillo concéntrico discontinuo alrededor de todo el cráter, que coincide además con la falla geológica principal. Su cercanía a la falla habla del aporte de gases volcánicos, principalmente CO<sub>2</sub>, que son emitidos a través de ella y son utilizados por los microorganismos (Figura 2b) para la precipitación de carbonatos, determinando así un mayor desarrollo de microbialitas en comparación con otras zonas del cráter.

2. Pozas remanentes: en la actualidad la mayor parte del lago se encuentra seco, únicamente el 10 % de la zona que cubría el lago permanece cubierto de agua, por lo cual solo existen pequeñas pozas o charcas. Las pozas pueden variar en tamaño y profundidad (siempre menor a 1 metro) dependiendo de la temporada de lluvia o sequía y contienen una gran cantidad de sales carbonatadas, mayormente producto de la evaporación del agua. Dentro de ellas (Figura 2e) habitan comunidades microbianas suspendidas en el agua creando tapetes microbianos, una especie de "balsa" que flota en el agua, y que se forman mayormente en la temporada de sequía. La presencia de microbios en los tapetes microbianos se manifiesta con colores rosa y verde que es posible observar a simple vista (Figura 2f). No solo en los tapetes microbianos existen microorganismos: una gran cantidad de ellos se encuentran también suspendidos flotando en el agua, lo que explica el cambio de color con las estaciones.

3. Sedimentos profundos del lago: si lo anterior te parece poco, también es posible que estos diminutos seres puedan sobrevivir en el subsuelo del cráter, en los sedimentos que quedaron sepultados hace miles de años. Muestras tomadas a una profundidad de 4 m fueron analizadas en un microscopio electrónico sugiriendo la existencia de microorganismos en los sedimentos (Figuras 2g y 2h). Lo anterior ha llevado a los científicos a hacerse varias preguntas: ¿Hasta dónde es posible que exista la vida en lo profundo de los sedimentos del cráter? o ¿Es posible que microorganismos como los encontrados en Rincón de Parangueo existan en lo profundo de los sedimentos en otros cráteres?

El especial interés en los microorganismos extremófilos identificados en Rincón de Parangueo es debido a las capacidades específicas de adaptación y supervivencia para desarrollarse en un ambiente tan peculiar. Hoy sabemos que dentro del cráter existen microorganismos capaces de resistir altos niveles de salinidad, radiación intensa y altos índices de evaporación, así como microorganismos capaces de sobrevivir a temperaturas relativamente altas ~ 60 °C.

Algunos de los microorganismos extremófilos identificados en Rincón de Parangueo también se han identificado en sitios del mundo con características similares, como una alta salinidad, alcalinidad y altas temperaturas (se presenta una lista con ejemplos en la Tabla 2). Sin embargo, algunos microorganismos reconocidos son exclusivos de este lugar (endémicos), por lo que es posible identificar especies con características únicas y especiales que las convierten en potenciales fuentes de conocimiento científico y tecnológico para el desarrollo de biotecnología aplicada (producción de alimentos, bebidas, antibióticos, biofertilizantes, etc.) en diferentes industrias a nivel global.

### ¿VIDA EN OTROS PLANETAS?

Como ya te pudiste dar cuenta, las comunidades microbianas descubiertas en Rincón de Parangueo viven en un ambiente extremo y su capacidad para desarrollar estrategias de supervivencia es un punto clave. Por ejemplo, algunos microorganismos pueden crecer en un medio hipersalino gracias a mecanismos celulares como la acumulación de grandes concentraciones de KCl en el citoplasma y tienen la capacidad de producir proteínas resistentes a las altas concentraciones de sal (DasSarma y DasSarma, 2017). Otros cuentan con mecanismos de reparación para el material genético dañado por la alta radiación solar (Crowley *et al.*, 2006) y también existen los que

**Tabla 2.** Principales microorganismos extremófilos identificados en Rincón de Parangueo y que también se han encontrado en otras partes del mundo.

Género	Especie	Ubicación
<i>Rhodobaca sp.</i>	<i>Rhodobaca bogoriensis</i> <i>Rhodobaca barguzinensis</i>	Agua y sedimentos del Lago Bogoria, Kenia Lago Barguzin valley, Siberia
<i>Nitiliruptor sp.</i>	<i>Nitiliruptor alkaliphilus</i>	Sedimentos del lago Estepa de Kulunda, Rusia
<i>Nocardiopsis sp.</i>	<i>Nocardiopsis valliformis</i>	Sedimentos del lago Xinjiang, China
<i>Psychroflexus sp.</i>	<i>Psychroflexus salis</i> <i>Psychroflexus planctonicus</i>	Lago salado en la provincia Qinghai, China
<i>Defluviimonas sp.</i>	<i>Defluviimonas indica</i>	Chimenea hidrotermal, mar del suroeste de India
<i>Microvirga sp.</i>	<i>Microvirga subterranea</i>	Agua del acuífero hidrotermal Great Craft Basin
<i>Elioraea sp.</i>	<i>Elioraea tepidiphila</i>	Fuente termal en la isla de Sao Miguel, Azores
<i>Rubrobacter sp.</i>	<i>Rubrobacter radiotolerans</i>	Fuente termal Sao Pedro do Sul, Portugal
<i>Belliella sp.</i>	<i>Belliella pelovolcani</i>	Lodo volcánico en Wandan, Taiwán
<i>Cecembia sp.</i>	<i>Cecembia lonarensis</i>	Agua de lago en Maharashtra, India
<i>Thermomicrobium sp.</i>	<i>Thermomicrobium carboxidum</i>	Tapetes microbianos del volcán Kilauea Hawái, USA
<i>Salinarimonas sp.</i>	<i>Salinarimonas ramus</i>	Suelo salino de un yacimiento petrolero en Shengli, China
<i>Porphyrobacter sp.</i>	<i>Porphyrobacter tepidarius</i>	Tapetes microbianos en aguas termales en Shidzuoka, Japón
<i>Picocystis sp.</i>	<i>Picocystis salinarum</i>	Lagos salinos y chimeneas hidrotermales en África del Este
<i>Halosimplex sp.</i>	<i>Halosimplex carlsbadense</i>	Cristales de sal de la formación Salado en el sureste de Nuevo México
<i>Natronolimnobius sp.</i>	<i>Natronolimnobius innermongolicus</i>	Lagos en el interior de Mongolia, China
<i>Natrialba sp.</i>	<i>Natrialba aegyptiaca</i>	Suelos hipersalinos en Asuán, Egipto
<i>Methanosalsum sp.</i>	<i>Methanosalsum natronophilum</i>	Sedimentos de lagos salados en la estepa de Kulunda, Rusia
<i>Methanolobus sp.</i>	<i>Methanolobus oregonensis</i>	Agua de lago salino en el cráter Lonar, India

producen vesículas de gas dentro de sus células que les permiten flotar a lugares donde la concentración de oxígeno es mayor (Pfeifer, 2015). Algunos, además, tienen la capacidad de colonizar los poros de las rocas y/o las fisuras de los sedimentos evitando cambios drásticos de temperatura y humedad, lo que les da una ventaja para sobrevivir (Sajjad *et al.*, 2022). El desarrollo de comunidades extremófilas en ambientes tan peculiares es de especial importancia para entender el origen, evolución y distribución de la vida en la Tierra. Este conocimiento puede ser aplicado en la búsqueda de vida en planetas con características extremas similares a las identificadas en la Tierra. La posibilidad de que microorganismos extremófilos puedan sobrevivir en otros planetas es intrigante. Microorganismos adaptados a altas concentraciones de sal, altas temperaturas y radiación solar pueden ser modelos clave en la búsqueda de vida en otras partes del universo. Comunidades microbianas similares a las descubiertas en Rincón de Parangueo y en otros lugares de la Tierra podrían estar escondidas dentro de las rocas y/o los sedimentos en planetas como Marte, donde no existe una fuente abundante de agua, los nutrientes son escasos, el suelo contiene sales y existe una alta radiación solar.

## CONCLUSIONES

Estudiar lugares con características extremas como el cráter Rincón de Parangueo en el estado de Guanajuato es muy importante para entender el desarrollo de la vida en nuestro planeta y tal vez aún más lejos. Microorganismos extremófilos podrían sobrevivir no sólo en la Tierra sino también en otros planetas. Por ello, es importante alentar a la conservación de sitios donde se desarrolla la vida extrema, pues son el hogar de una diversidad enorme de microorganismos que han sobrevivido por miles de años. Sería lamentable que lugares con características tan peculiares desaparecieran como consecuencia del impacto que las actividades humanas tienen en ellos. Desafortunadamente, Rincón de Parangueo es también un lugar donde la sobreexplotación de agua subterránea, deforestación, contaminación y uso recreativo de forma inapropiada han provocado el deterioro ambiental en los últimos años, convirtiéndose en un grave problema. La buena noticia es que aún estamos a tiempo de rescatar este hermoso lugar. La planeación e implementación de estrategias que ayuden a la conservación de las estructuras microbianas requieren de la interacción entre los tomadores de decisiones, científicos y la comunidad local.

## REFERENCIAS

Altermann, W. (2008). Accretion, trapping and binding of sediment in Archean stromatolites—morphological expression of the antiquity of life. *Space Science Reviews*, 135(1), 55-79.

Allwood, A. C., Walter, M. R., Kamber, B. S., Marshall, C. P., y Burch, I. W. (2006). Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. *Nature*, 441(7094), 714-718.

Aranda-Gómez, J. J., Levresse, G., Pacheco Martínez, J., Ramos-Leal, J. A., Carrasco-Núñez, G., Chacón-Baca, E. y Noyola-Medrano, C. (2013). Active sinking at the bottom of the Rincón de Parangueo Maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca and Celaya. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 169-188.

Aranda-Gómez, J. J., Cerca, M., Rocha-Treviño, L., Carrera-Hernández, J. J., Levresse, G., Pacheco, J. y Beraldi-Campesi, H. (2017). Structural evidence of enhanced active subsidence at the bottom of a maar: Rincón de Parangueo, México. *Geological*

*Society, London, Special Publications*, 446(1), 225-254.

Armienta, M. A., Vilaclara, G., De la Cruz-Reyna, S., Ramos, S., Cenicerros, N., Cruz, O. y Arcega-Cabrera, F. (2008). Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(2), 249-258.

Casanova, J. (1986). East African rift stromatolites. *Geological Society, London, Special Publications*, 25(1), 201-210.

Combie, J., y Rynnion, K. (1996). Looking for diversity of Yellowstone extremophiles. *Journal of industrial microbiology and biotechnology*, 17(3-4), 214-218.

Connon, S. A., Lester, E. D., Shafaat, H. S., Obenhuber, D. C., y Ponce, A. (2007). Bacterial diversity in hyperarid Atacama Desert soils. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G4).

Crowley, D. J., Boubriak, I., Berquist, B. R., Clark, M., Richard, E., Sullivan, L., y McCready, S. (2006). The *uvrA*, *uvrB* and *uvrC* genes are required for repair of ultraviolet light induced DNA photoproducts in *Halobacterium* sp. NRC-1. *Saline systems*, 2, 1-13.

DasSarma, S., y DasSarma, P. (2017). Halophiles. *eLS*, 1-13.

Escolero, O., y Alcocer, J. (2004). Desecación de los lagos cráter del Valle de Santiago, Guanajuato. In: *El agua en México vista desde la Academia*. (Eds: Jiménez, B., y Marín, L) México City, Academia Mexicana de Ciencias, 99-115.

Horikoshi, K., Antranikian, G., Bull, A. T., Robb, F. T., y Stetter, K. O. (2010). *Extremophiles handbook*: Springer Science y Business Media.

Iniesto, M., Moreira, D., Reboul, G., Deschamps, P., Benzerara, K., Bertolino, P., y López-García, P. (2021). Core microbial communities of lacustrine microbialites sampled along an alkalinity gradient. *Environmental Microbiology*, 23(1), 51-68.

Johnson, D. B. (2009). *Extremophiles: acidic environments*. The desk encyclopedia of microbiology, 463-480.

Nicolaus, B., Lama, L., Esposito, E., Bellitti, M. R., Improta, R., Panico, A., y Gambacorta, A. (2000). Extremophiles in Antarctica. *Italian Journal of Zoology*, 67(S1), 169-174.

Papineau, D., Walker, J. J., Mojzsis, S. J., y Pace, N. R. (2005). Composition and structure of microbial communities from stromatolites of Hamelin Pool in Shark Bay, Western Australia. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(8), 4822-4832.

Pfeifer, F. (2015). Haloarchaea and the formation of gas vesicles. *Life*, 5(1), 385-402.

Sajjad, W., Ilahi, N., Kang, S., Bahadur, A., Zada, S., y Iqbal, A. (2022). Endolithic microbes of rocks, their community, function and survival strategies. *International Biodeterioration y Biodegradation*, 169, 105387.

Sánchez-Sánchez, J., Cerca, M., Alcántara-Hernández, R. J., Lozano-Flores, C., Carreón-Freyre, D., Levresse, G. y Aranda-Gómez, J. J. (2019). Extant microbial communities in the partially desiccated Rincón de Parangueo maar crater lake in Mexico. *FEMS microbiology ecology*, 95(5), f02051.

Sánchez-Sánchez, J., Cerca, M., Alcántara-Hernández, R. J., Aranda-Gómez, J. J., Carreón-Freyre, D., Lozano-Flores, C., y Varela-Echavarría, A. (2021). Mobile mud layer underneath the desiccated maar lake of Rincón de Parangueo and insights into its microbial fingerprints. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38(3), 178-192.

Wharton, D. A. (2007). *Life at the limits: organisms in extreme environments*. Cambridge University Press.

Manuscrito recibido: 7 de octubre de 2022

Manuscrito corregido recibido: 14 de marzo de 2023

Manuscrito aceptado: 18 de marzo de 2023



# GEOQUÍMICA GLACIAR: REGISTRO CLIMÁTICO AMBIENTAL QUE SE PIERDE

Alejandro Carrillo-Chávez <sup>1\*</sup>, Daniela K. Calvo-Ramos <sup>1</sup>,  
Carolina Muñoz-Torres <sup>1</sup> y Rocío García <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México.

<sup>2</sup>Instituto de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510, México.

\*ambiente@geociencias.unam.mx (autor para correspondencia)

## RESUMEN

Alarmantes son las noticias sobre la desaparición de los glaciares en todo el planeta. En México aún quedan dos pequeños cuerpos de hielo (glaciares) en altas montañas del centro del país: Iztaccíhuatl (5215 metros sobre nivel del mar: ms.n.m.) y Citlaltépetl (5626 ms.n.m.). Estos glaciares, localizados a 19° latitud norte y recibiendo precipitación (nieve) tanto del Océano Pacífico como del Golfo de México (Océano Atlántico), y muy cercanos a importantes zonas urbanas e industriales, contienen un registro de metales pesados en el ambiente de mucho interés para su comparación con otras regiones de alta montaña: Andes, Rocallosas, Alpes e Himalayas. Desde el 2006 se está trabajando en el Centro de Geociencias Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Campus Juriquilla, con la recolección de muestras de nieve y hielo en estos glaciares mexicanos para análisis químicos de elementos mayores y metales pesados. A la fecha, se tiene ya una base de datos del 2006 a 2022 para hacer una evaluación de 16 años de monitoreo y presentar los resultados en una publicación internacional. Un análisis preliminar de estos datos muestra concentraciones considerables de V, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb y Hg en nieve e hielo glaciar en aumento y comparables con datos del glaciar Sajama de Bolivia. El aumento va de valores preindustriales (valores naturales) a mayores concentraciones en las últimas décadas. En este artículo se describen en general las técnicas de Geoquímica Glaciar Ambiental modernas, se presentan datos preliminares como ejemplos, y se describen algunos proyectos actuales de la UNAM sobre esta línea de investigación.

**Palabras clave:** Geoquímica glaciar ambiental, metales pesados, Iztaccíhuatl, Citlaltépetl.

## ABSTRACT

*There is alarming news about the disappearance of glaciers around the planet. In Mexico there are still two small bodies of ice (glaciers) in high mountains in the center of the country: Iztaccíhuatl (5215 meters above sea level, m a. s. l.) and Citlaltépetl (5626 m a. s. l.). These glaciers, located at 19° north latitude and receiving precipitation (snow) from both the Pacific Ocean and the Gulf of*

*Mexico (Atlantic Ocean), and very close to important urban and industrial areas, contain an environmental record of heavy metals of great interest for comparison with Andean, North American, Alpine and Himalayan regions. Since 2006, the Centro de Geociencias UNAM, Campus Juriquilla, has been working on the collection of snow and ice samples from these Mexican glaciers for chemical analysis of major elements and heavy metals. Currently, we have a database from 2006 to 2022 to evaluate 16 years of monitoring concentrations of metals and present the results in an international publication. A preliminary analysis shows considerable concentrations of V, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, and Hg in snow and glacier ice comparable with data from the Sajama glacier in Bolivia. The concentration increase goes from pre-industrial time (natural values) to higher concentrations in the last decades. In this article, we describe modern environmental glacial geochemistry techniques, present some preliminary data as examples, and describe current UNAM projects in this line of research.*

**Keywords:** Environmental glacial geochemistry, heavy metals, Iztaccíhuatl, Citlaltépetl.

## INTRODUCCIÓN

Los glaciares son la acumulación de nieve transformada en hielo (sólido) que se mueve de acuerdo al basamento rocoso y pendiente hasta la zona de ablación o fusión (líquido), y se forman cuando la velocidad de acumulación de nieve y hielo es mayor a la velocidad de fusión de la misma. Esto se da cuando la temperatura promedio de la zona de acumulación-fusión de nieve es menor a cero grados centígrados. Estos procesos glaciares se dan en zonas polares como la Antártida (Polo Sur) y Groenlandia (Hemisferio Norte), los cuales se llaman Glaciares Continentales por su gran extensión continental. El espesor de estos glaciares continentales puede ser de varios kilómetros. Pero también las altas montañas de todo el mundo, dependiendo de la latitud y altitud, presentan glaciares (llamados Glaciares de Montaña), los cuales pueden tener centenas de metros de espesor, en algunos casos, y longitudes de decenas de kilómetros.

La nieve se precipita en la zona de acumulación junto con partículas sólidas micrométricas (aerosoles atmosféricos) y gases que se acumulan en poros de la nieve. Una vez precipitada, la nieve experimenta muchos cambios físicos (cambios en estructura cristalina nieve - hielo) formando hielo de varios tipos (toda una especialidad de la glaciología física - mineralógica glaciario) que no trataremos más en este artículo y que puede leerse en artículos especializados. Entre los aerosoles atmosféricos precipitados en la nieve y acumulados (registrados) en nieve-hielo glaciario tenemos: 1) Na, Cl, Mg, K, básicamente de fuente de brisa marina; 2) SiO<sub>2</sub>, Ca, Fe, Al, Mg, y muchos más elementos y compuestos del polvo atmosférico; 3) C, Fe, Cd, Cr, Zn, Pb, Hg y algunos otros metales debido a incendios forestales; 4) SiO<sub>2</sub>, Ca, Mg, Fe y muchos compuestos y elementos más derivados de ceniza volcánica de eventos locales, regionales y hasta mundiales (las grandes explosiones volcánicas arrojan ceniza volcánica micrométrica a grandes alturas 10 a 20 km de altura) y puede dar vuelta a todo el planeta en unas cuantas semanas; 5) Fe, Ni, Pt y elementos del grupo del platino, Cr, Cd, Zn, Ag, Au, y algunos otros metales derivados de impactos de meteoritos; 6) todos los elementos y compuestos derivados de la actividad humana (industria, combustión de hidrocarburos, incendios, agricultura, pesticidas, fertilizantes, etc.); 7) gases atmosféricos (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CFC, etc.) que quedan atrapados en poros del hielo durante la transformación cristalográfica de nieve a hielo; 8) elementos cosmogénicos (isótopos cosmogénicos atmosféricos los cuales se forman debido a impacto de rayos cósmicos con átomos de gases atmosféricos, ejemplo: <sup>14</sup>C, <sup>10</sup>Be, <sup>36</sup>Cl, y otros más); y 9) recientemente se han detectado micro-plásticos en nieve de alta montaña. También se puede determinar la temperatura de precipitación (precipitación de verano cercana a cero grados centígrados, o precipitación de invierno temperaturas de 10 °C a 60 °C dependiendo de latitud y altitud) con base a isótopos estables en agua (<sup>2</sup>H y <sup>18</sup>O). A la fecha (2022), existen técnicas de isotopía estable de metales que nos permiten diferenciar fuentes de metales en el registro glaciario (natural o antropogénico).

El hielo glaciario puede formar registros de varios kilómetros de espesor (glaciares continentales: Antártica y Groenlandia) o de centenares de metros en Glaciares de Montaña. El espesor y tiempo de acumulación de hielo (registro de hielo glaciario) depende de muchos factores climático-atmosféricos, pero en tiempo puede ser de millones de años (Glaciares Continentales) y de centenas o miles de años en Glaciares de Montaña. Los procesos glaciares son



Figura 1. Fotografía del frente del Glaciar de Jamapa, cara norte del Citlaltépetl en el centro de México (5100 ms.n.m.). Uno de los dos glaciares que aún existen en alta montaña en México (Octubre 2021). Se estima que la parte central del glaciar puede tener un espesor de 50 m.

bastante comunes en la historia de la Tierra desde el Precámbrico hasta el Holoceno. Evidencias de glaciares en tiempo geológico se tienen en los depósitos de rocas, grava, arena y arcillas, conocidos como morrenas, y algunos otros procesos. Pero los glaciares que nos interesan como un registro geoquímico de procesos ambientales atmosféricos superficiales son los heredados del Último Máximo Glacial (LMG, por sus siglas en inglés), y el cual se refiere a la época de máxima extensión de las capas de hielo durante el último período glacial, aproximadamente hace 20 000 años (Pleistoceno-Holoceno).

En este artículo hablaremos de algunas técnicas de Geoquímica Ambiental y Geoquímica Isotópica Ambiental aplicadas a nieve y hielo glaciario. Esto es básicamente para determinar el registro climático - ambiental e impacto antropogénico que se encuentra en la nieve y hielo glaciario. También se presentan datos preliminares de concentraciones de metales pesados medidos en diferentes años en el Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl, se comparan con datos reportados para el Nevado Sajama en Bolivia y se comentan algunas posibles explicaciones sobre estas diferencias. Finalmente, mencionaremos algunos de los proyectos que se tienen actualmente en la UNAM sobre Geoquímica Glaciario Ambiental en los glaciares del Iztaccíhuatl (5230 m s. n. m.) y Citlaltépetl (5636 m s. n. m.), en el centro de México y las perspectivas a corto y mediano plazo de colaboración con instituciones de Sudamérica. Básicamente, la idea es mencionar la urgencia de describir el registro geoquímico ambiental de estos glaciares que se está perdiendo irremediablemente (Figura 1).

### Carbon Negro

El Carbón Negro (CN) es un aerosol característico de la troposfera derivado de incendios forestales y, desde finales de los 1700's, de la combustión incompleta de los combustibles fósiles. El CN puede ser transportado a grandes distancias y depositarse en glaciares de alta montaña y continentales. Debido a sus propiedades absorbentes de luz, el CN puede oscurecer la superficie de la nieve o del hielo, afectar el balance de energía y la velocidad de fusión de una masa glaciario. Trabajos de investigación de CN en núcleos de hielo glaciario de Alaska y Himalaya muestran concentraciones promedio anual es de hasta 10 nanogramos/gramos (ng/g, partes por billón o ppb) con picos de hasta 100 ng/g de manera consistente desde 1930 y hasta el 2000 (Sierra-Hernandez *et al.*, 2022; Barker *et al.*, 2021). Estos datos de concentración de CN se complementan con modelos de circulación atmosférica para determinar las fuentes de CN en la atmósfera. Actualmente (2022) el Centro de Geociencias de la UNAM Juriquilla realiza una investigación de CN en nieve-hielo de los glaciares del Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl.

### Metales Pesados

Desde hace unos 6000 años hemos utilizado metales como el Cu, Fe, Zn, Au, Ag, entre otros, para nuestro desarrollo industrial y de la sociedad humana. Desde la revolución industrial (1700) hemos aumentado considerablemente el número de metales que utilizamos en la tecnología y en los procesos industriales. Pero en los últimos 40 años el número de metales utilizados en la tecnología moderna ha aumentado hasta unos 70. Un buen ejemplo del uso de estos 70 metales en la tecnología está en nuestros dispositivos móviles, ordenadores, automóviles eléctricos, baterías y otros dispositivos electrónicos. Por otro lado, algunos metales como Ca, Mg, Fe, Cu, Co, Cr, Zn, Mo, Li (entre otros) son básicos en los procesos metabólicos de las plantas, los animales e incluso los humanos. Como se ha mencionado anteriormente, estos metales



Figura 2. Extracción de un núcleo de hielo somero en el Glaciar del Citlaltépetl.

que flotan en la troposfera en forma de partículas milimétricas se depositan en la nieve y en el hielo de los glaciares, formando un registro ambiental.

Se ha obtenido una base de datos muy amplia de metales pesados en núcleos de hielo de Groenlandia, la Antártida y los Alpes. Por otro lado, Lonnie Thompson y su equipo de la Universidad Estatal de Ohio, comenzaron a perforar núcleos de hielo en los Andes peruanos (glaciares tropicales o de baja latitud). El equipo de Lonnie Thompson ha reunido una base de datos geoquímicos durante casi 40 años, fechados entre el 22 000 AP (antes del presente; Último Máximo Glacial) y la Pequeña Edad de Hielo 1300 a 1850 de la era común (e.c.). La conclusión más importante de estos trabajos indica que la fuente de metales procede principalmente del polvo de las rocas y del suelo, pero es necesario explicar otras fuentes (Ferrari *et al.*, 2001).

El análisis estándar actual de los metales pesados en el hielo y la nieve de los glaciares se realiza mediante las sensibles técnicas de ICP-MMS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente, por sus siglas en inglés) que pueden detectar fracciones de partes por millón (ppm) de metales en solución. Se han perforado núcleos de hielo en glaciares de montaña en



Figura 3. Muestreo de nieve recién precipitada y relacionada con la Tormenta Kay del Pacífico, primer semana de septiembre de 2022 en la zona de la "Panza de Iztaccíhuatl" a 5150 ms.n.m. Fotografía de Jehú Hinojosa.

**Tabla 1.** Resumen de la concentración promedio para V, Cr, Ni, Cu, Zn y Pb para diferentes muestras de nieve y hielo glaciar (núcleo somero) para Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl durante diferentes temporadas de 2006 a 2021. Los datos están en microgramos por litro (partes por billón o  $10^{-9}$ ). Prom: promedio; prof: profundidad. Altitud en ms.n.m.

Año	Localización	Muestra/ prof.	Altitud	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
2006	Iztaccíhuatl	Nieve (20 cm)	3500 - 4720	0.50	0.20	0.30	0.10	5.40	0.0
2007	Iztaccíhuatl	Núcleo (10-150 cm)	5100	0.50	1.00	7.50	2.89	39.12	0.35
2007	Citlaltépetl	Núcleo (10-150 cm)	5100	1.90	1.60	6.80	25.70	118.84	0.60
2008	Citlaltépetl	Núcleo (10-80 cm)	5100	0.60	0.50	5.58	4.64	38.24	0.31
2021	Citlaltépetl	Núcleo (10-100 cm)	5150	0.0	1.02	0.0	8.50	31.06	0.0
Prom				0.70	0.86	4.04	8.37	46.53	0.25

los Andes, Alaska, el Kilimanjaro, los Alpes y el Himalaya, pero las investigaciones de la UNAM apenas comienzan a recoger datos de metales pesados en los pequeños glaciares mexicanos. Los glaciares mexicanos son los únicos que se encuentran en zonas intertropicales en el hemisferio norte. Su ubicación geográfica, la proximidad a una de las mayores áreas metropolitanas del mundo (Ciudad de México), a grandes zonas industriales y la precipitación de la humedad de la nieve desde el Golfo de México (Océano Atlántico) y el Océano Pacífico, tanto en las tormentas de invierno como de verano, ofrecen una buena oportunidad para analizar el impacto antropogénico en la precipitación atmosférica registrada en la nieve y el hielo de los glaciares. Desde hace una década, se han tomado muestras de nieve superficial y de hielo glaciar (sondeos y testigos someros a 1 metro de profundidad) en el Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl para realizar análisis geoquímicos e isotópicos ( $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$ ). La Figura 2 muestra parte del trabajo de campo de perforación de un núcleo de hielo somero (1 m) a 5300 m s. n. m. en el centro del Glaciar de Jamapa del Citlaltépetl. La Figura 3 muestra la recolección de nieve recién precipitada (30 cm de acumulación en una noche) en la primera semana de septiembre del 2022 a 5200 m s. n. m. en la zona de la "panza" del Iztaccíhuatl y que se relaciona directamente con humedad del Océano Pacífico debido a la tormenta Kay (6 de septiembre, 2022).

## RESULTADOS PRELIMINARES

La Tabla 1 muestra un resumen de la concentración promedio de los elementos: V, Cr, Ni, Cu, Zn y Pb para el Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl durante diferentes temporadas de 2006 a 2021 (más de 20 muestreos diferentes) medidos en el Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla. La Tabla 2 compara los valores reportados por Ferrari *et al.* (2001) para muestras de núcleo de hielo tomadas a

**Tabla 2.** Comparación entre datos obtenidos por el grupo de climatología de la Universidad estatal de Ohio, dirigidos por el Dr. Lonnie Thompson (Ferrari *et al.*, 2001), y los promedios medidos en nieve y hielo glaciario de montañas de México en el Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla. n/r: no reportado.

Metal	Sajama	Sajama	Sajama	Sajama	Iztaccíhuatl	Citlaltépetl
	120 m	100 m	60 m	40 m	Superficie	Superficie
V	0.06	0.15	0.071	0.10	0.50	0.83
Cr	0.03	0.05	0.01	0.02	0.60	1.04
Ni	n/r	n/r	n/r	n/r	3.90	4.13
Cu	0.09	0.24	0.06	0.15	0.15	12.95
Zn	0.27	0.23	0.21	0.38	22.26	62.71
Pb	0.03	0.09	0.06	0.36	0.18	0.30

diferentes profundidades (120, 100, 60 y 40 metros de profundidad) del Glaciar del Sajama, Bolivia con datos promedio de las montañas mexicanas. Se aprecia que las concentraciones de V, Cr y Pb están en rango con diferencia de 1 orden de magnitud mayor en las de las montañas mexicanas con respecto a datos del Sajama, Bolivia. Las concentraciones de Zn y Cu son hasta de 3 órdenes de magnitud mayores en los glaciares mexicanos. Estas concentraciones más altas en nieve y hielo de glaciares mexicanos con respecto al Sajama en Bolivia tiene varias posibles explicaciones: 1) Las muestras de núcleos del Sajama son de una profundidad mucho mayor y representan edades mucho más antiguas (22 000 años AP para los 120 m de profundidad; 8000 años AP para 100 m de profundidad; año 1650 e.c para los 60 m de profundidad y 1897 e.c. para los 40 m de profundidad (Ferrari *et al.*, 2001).

De hecho las muestras para las profundidades 120, 100 y 80 m, podrían tomarse como valores base debido a fuentes naturales (polvo, cenizas por incendios, cenizas volcánicas, y otras fuentes naturales). Los datos de 40 m de profundidad (1987 e.c.) muestran un ligero aumento para los elementos V, Cu, Zn y Pb y puede ser debido a un incremento en la actividad industrial en Bolivia. Por otro lado, 1) las muestras del Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl son del periodo entre 2006 a 2021, y representan la gran actividad industrial en el centro de México; 2) la cercanía de los glaciares mexicanos a importantes zonas industriales (petrolera, automotriz, metal-mecánica) y a una de las mayores zonas metropolitanas del mundo (Cd. de México) pueden explicar estas mayores concentraciones de metales en los glaciares mexicanos; y 3) el volcán Popocatepetl muy cercano al Iztaccíhuatl (15 km) y no lejos del Citlaltépetl (142 km de distancia). El Popocatepetl ha estado en actividad intermitente desde 1994 con erupciones periódicas de gases, cenizas y otro material volcánico. Sobre todo la erupción de cenizas (material con trazas de metales) y en la circulación en la parte alta de la troposfera lo que fácilmente permite la acumulación de cenizas-metales en la nieve y en el hielo glaciario de las altas montañas de México.

Por otro lado, el  $^2\text{H}$ , isótopo pesado del H, y el  $^{18}\text{O}$ , hacen que moléculas "ligeras y pesadas" de agua se evaporen y precipiten a diferente ritmo (fraccionamiento isotópico). Cuando se grafican los resultados de las mediciones de estos isótopos en agua (nieve y hielo) se puede determinar altura de precipitación y procesos como de evaporación, entre otros. Datos preliminares del  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  en nieve y hielo del Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl, muestran procesos de evaporación normales en alta montaña.

### Isótopos estables de metales

Los isótopos estables de metales en muestras ambientales (agua, suelo, materia orgánica, nieve-hielo glaciario) contienen información muy valiosa sobre las fuentes de los metales (natural o antropogénica) y los procesos geoquímicos que han afectado a las muestras. Por varias décadas la geoquímica isotópica tradicional se enfocó en análisis de  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$  y  $^{34}\text{S}$ . Gracias a los desarrollos de los últimos 20 años de la tecnología de química analítica, como el Multicolector de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MMS, por sus siglas en inglés), se han logrado realizar mediciones de concentraciones muy pequeñas de diferentes isótopos de metales. A continuación se describen brevemente los isótopos estables de Zn, Cu, Fe y Hg y sus aplicaciones en geoquímica ambiental.

### Zinc (Zn)

El zinc es un elemento muy utilizado en la industria moderna, en aleaciones, pinturas fertilizantes y pantallas planas y tiene otros usos industriales y tecnológicos. También el Zn es un importante elemento traza esencial en procesos metabólicos de plantas, animales y del ser humano. El Zn tiene cinco isótopos estables,  $^{64}\text{Zn}$  (48.63 %),  $^{66}\text{Zn}$  (27.90 %),  $^{67}\text{Zn}$  (4.10 %),  $^{68}\text{Zn}$  (18.75 %) y  $^{70}\text{Zn}$  (0.62 %). La relación isotópica que más se usa es la de  $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ , la cual en materiales geológicos varía aproximadamente 2 per mil (‰). Variaciones en la relación  $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$  indican un fraccionamiento isotópico y son un buen indicador de procesos geoquímicos como disolución de fases primarias de Zn, precipitación de fases secundarias y procesos biogeoquímicos, así como de la determinación de posibles fuentes de Zn al medio ambiente (ej. naturales vs antropogénicas; Bullen, 2011).

### Cobre (Cu)

El cobre es uno de los primeros metales en ser usados por el ser humano. Actualmente tiene muchas aplicaciones industriales: cables eléctricos, electrónica, aleaciones metálicas, pintura, tuberías y monedas. El cobre puede ser tóxico para los animales, pero forma parte de un grupo relativamente pequeño de elementos metálicos que son esenciales para la salud humana. El Cu y otros metales son necesarios para los procesos metabólicos normales, de tal forma que la dieta humana debe suministrar cantidades regulares para su absorción.

El Cu tiene dos isótopos estables:  $^{63}\text{Cu}$  (69 %) y  $^{65}\text{Cu}$  (31 %). En los materiales naturales, el rango medido de  $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$  es de aproximadamente 9 ‰ para las muestras sólidas y de 3 ‰ para las muestras de agua (Larson *et al.*, 2003; Borrok *et al.*, 2008). De manera similar al Zn, el fraccionamiento isotópico del Cu se da por procesos de disolución (intemperismo químico) de fases primarias, precipitación de fases secundarias, procesos redox (óxido-reducción) y ahora se sabe que los procesos biogeoquímicos juegan un papel fundamental en el fraccionamiento isotópico del Cu y otros metales.

## Hierro (Fe)

El hierro es el elemento más abundante en la Tierra y el cuarto elemento en la corteza terrestre. El Fe metálico tiene una gran variedad de aplicaciones como en metalurgia, industria del transporte, construcción y maquinaria en general. El Fe desempeña un papel importante en la biología y es un nutriente esencial para casi todos los organismos vivos (Weber *et al.* 2006). Los procesos de transformación y reciclaje del hierro son determinantes para el funcionamiento de los ecosistemas vegetales, forestales y agrícolas.

El Fe tiene cuatro isótopos estables:  $^{54}\text{Fe}$  (5.6 %),  $^{56}\text{Fe}$  (91.95 %),  $^{57}\text{Fe}$  (2.18 %) y  $^{58}\text{Fe}$  (0.30 %). El rango medido de la relación  $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$  en materiales naturales es de  $\sim 5\%$  (Severmann y Anbar, 2009). Se ha demostrado que tanto la oxidación inorgánica en menor grado como los procesos de oxidación y reducción mediada por los microbios de Fe(II) a Fe(III) en un grado mayor dan lugar a un fraccionamiento de isótopos estables de Fe y otros elementos (Bullen *et al.* 2011; Balci *et al.* 2006; Beard *et al.* 1999, Lotfi-Kalahroodi *et al.*, 2021).

## Mercurio (Hg)

El mercurio se utiliza ampliamente en termómetros y otros aparatos científicos, amalgamas para restauraciones dentales, lámparas de vapor, cosméticos y telescopios de espejo líquido. Históricamente, el Hg se ha utilizado ampliamente en las operaciones de extracción de oro. Actualmente dada su toxicidad el uso de mercurio está prohibido en gran parte del mundo, pero su presencia en el medio ambiente aún es considerable. El mercurio y sus compuestos (por ejemplo, monometilmercurio (MeHg) y cloruro de mercurio) son extremadamente tóxicos y pueden ingerirse fácilmente por inhalación o absorción a través de la piel y las mucosas.

El mercurio tiene siete isótopos estables:  $^{196}\text{Hg}$  (0.15 %),  $^{198}\text{Hg}$  (9.97 %),  $^{199}\text{Hg}$  (16.87 %),  $^{200}\text{Hg}$  (23.10 %),  $^{201}\text{Hg}$  (13.18 %),  $^{202}\text{Hg}$  (29.86 %) y  $^{204}\text{Hg}$  (6.87 %). El rango medido de  $^{202}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$  en materiales naturales resultante del fraccionamiento dependiente de la masa (MDF, por sus siglas en inglés) entre los grupos de Hg coexistentes es de aproximadamente 7 ‰. Además, los isótopos estables del Hg muestran un considerable fraccionamiento independiente de la masa (MIF, por sus siglas en inglés), en el que los isótopos impares  $^{199}\text{Hg}$  y  $^{201}\text{Hg}$  se comportan de forma diferente a los isótopos pares en ciertas reacciones químicas como la reducción fotoquímica (Bergquist y Blum 2007), lo que conduce a importantes enriquecimientos y agotamientos de los isótopos impares en relación con los isótopos pares en las reservas ambientales de Hg.

Blum (2011) señala que la mayoría de las aplicaciones ambientales de los isótopos de Hg están relacionadas con: 1) la interpretación de la composición isotópica del MeHg presente en los sedimentos y organismos, o 2) la interpretación de la composición isotópica del Hg(II) asociado a los sedimentos o depositado en la superficie de la tierra o en una masa de agua. A la fecha, se está trabajando en un proyecto financiado por la UNAM para determinar concentraciones de Zn y Hg en nieve-hielo glaciar de Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl, y medir fraccionamiento isotópico estable de  $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$  y  $^{202}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ . La idea básica es comparar estos datos con estudios en otras montañas y determinar su posible fuente natural o antropogénica.

## Isótopos Cosmogénicos ( $^{10}\text{Be}$ )

Los isótopos cosmogénicos de berilio (Be) se forman cuando rayos cósmicos (neutrones y protones de alta energía que provienen de fenómenos astronómicos) chocan con átomos de oxígeno y nitrógeno en la atmósfera y provocan una serie de reacciones nucleares (procesos de espalación). Los isótopos de Be más útiles para su uso en las geociencias son el  $^7\text{Be}$  de vida corta (vida media de 53.1 días) y el  $^{10}\text{Be}$  de vida más larga (vida media 1.4 Ma; Nishiizumi *et al.*, 2007). Debido a que los rayos cósmicos que causan la cascada inicial de neutrones y protones en la alta atmósfera responsable de las reacciones de espalación son atenuados por la masa de la propia atmósfera, las tasas de producción de Be cosmogénico son tres órdenes de magnitud mayores en la estratosfera que a nivel del mar (Masarik y Beer, 1999, 2009). Por lo tanto, la mayor parte de la producción de Be cosmogénico tiene lugar en la atmósfera superior (5-30 km). Una vez que el Be cosmogénico se forma en la atmósfera, se precipita en lluvia, nieve, granizo y deposición seca.

En escalas de tiempo de décadas, las tasas de producción varían aproximadamente un 25 % con el ciclo solar de 11 años, pero en el transcurso de cientos de años, las tasas de producción pueden variar entre el 50 % y 75 % debido a los ciclos de mayor escala de tiempo en la actividad del sol (Koch y Mann, 1996; Vonmoos *et al.*, 2006; Berggren *et al.*, 2009). Como los rayos cósmicos se desvían hacia los polos, las tasas de producción de Be cosmogénico pueden ser de 3 a 5 mayores en atmósfera polar que en la atmósfera ecuatorial dependiendo de la altitud (Harvey y Matthews, 1989; Masarik y Beer, 1999). Por tanto, las atmósferas polares tienen mayores cantidades de Be cosmogénico, pero la mayor precipitación se da en glaciares tropicales.

El Instituto de Física de la UNAM cuenta con un Espectrómetro de Masas con Acelerador (Accelerator Mass Spectrometer; AMS por sus siglas en inglés), instrumento necesario para la medición de concentraciones de isótopos cosmogénicos ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{129}\text{I}$ , entre otros) en diferentes matrices en el orden de  $10^{-15}$ . A la fecha, se están analizando las primeras muestras de  $^{10}\text{Be}$  en hielo y nieve glaciar de alta montaña en México.

## CONCLUSIONES

Los glaciares de alta montaña de México y de todo el mundo están desapareciendo a un ritmo alarmante. Los glaciares de México, aunque pequeños y en vías de desaparición, pueden aportar interesante información climática y ambiental de los últimos 100 años, o más, utilizando técnicas modernas de química analítica como la espectrometría de masas. Esta técnica permite la detección de fracciones de microgramos por litro ( $10^{-9}$  o partes por mil millones ppb) de metales disueltos o en partículas sólidas depositadas en nieve y hielo glaciar. La combinación de herramientas estadísticas y de geoquímica isotópica de metales puede ayudar en la caracterización de las fuentes de metales a la atmósfera; natural o antropogénica. Consideramos que las cooperaciones internacionales en proyectos conjuntos sobre geoquímica glaciar ambiental son muy importantes entre instituciones de investigación de México y otros países de América Latina. Esto permitirá una mejor interpretación de fuentes y cronología de aportes metálicos a la atmósfera (registro ambiental-climático), una mejor administración de los recursos hídricos y por supuesto de los hermosos parques nacionales y montañas de México y de los Andes (Thompson, 2017).

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento al “Grupo UNAM de apoyo para la perforación de núcleos de hielo en Pico de Orizaba e Iztaccihuatl”: Jaime Carrera, Dora Carreón, Erandi Cerca, Gabriela Ponce “Gaby”, Lorenzo Ortíz “Lencho”, Juan Carlos Gómez de la Fuente “Jano”, Samael Oliver “Sama”, Julio Zacatzi, Daniela Montaña “Dany”, Jehú Hinojosa, Eber Ramírez “Gerber”, Jonatán Hortelano “Jona”, Luis Acosta, Libertad Barrón, y Raúl Gómez. Este artículo y el trabajo actual de “Geoquímica de Núcleos de hielo” es posible gracias a los recursos del Proyecto UNAM-PAPIIT IN 110421 “Concentraciones y fraccionamiento Isotópico de Zn y Hg en agua de lluvia y hielo glaciar de alta montaña: procesos geoquímicos, fuentes y trayectorias de metales en el centro de México”.

## REFERENCIAS

- Barker, J. D., Kaspari, S., Gabrielli, P., Wegner, A., Beaudon, E., Sierra-Hernández, M. R., & Thompson, L. (2021). Drought-induced biomass burning as a source of black carbon to the central Himalaya since 1781 CE as reconstructed from the Dasuopu ice core. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(7), 5615–5633. <https://doi.org/10.5194/acp-21-5615-2021>
- Bergquist BA, Blum JD (2007) Mass-dependent and -independent fractionation of Hg isotopes by photoreduction in aquatic systems. *Science* 318:417–420
- Borrok DM, Nimick DA, Wanty RB, Ridley WI (2008) Isotopic variations of dissolved copper and zinc in stream waters affected by historical mining. *Geochim Cosmochim Acta* 72:329–344
- Bullen, T. (2011). Stable Isotopes of Transition and Post-Transition Metals as Tracers in Environmental Studies. In: Baskaran M (ed) *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Advances in Isotope Geochemistry, Springer.
- Callender, E. (2014). Heavy metals in the environment – historical trends. In *Treatise on Geochemistry* (pp. 59–89). Elsevier.
- Ferrari, C.P., Clotteau, T., Thompson, L., Barbante, C., Cozzi, G., Cescon, P., Hong, S., Maurice-Bourgoin, L., Franco, B., Boutron, C. (2001). Heavy metals in ancient tropical ice: initial results. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, p. 5809-5815.
- Harvey MJ, Matthews KM (1989) <sup>7</sup>Be deposition in a high-rainfall area of New Zealand. *J Atmos Chem* 8:299–306.
- Larson PB, Maher K, Ramos FC, Chang Z, Gaspar M, Meinert LD (2003) Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chem Geol* 201:337–350.
- Lotfi-Kalahroodi E, Pierson-Wickmann AC, Rouxel, O (2021) More than redox, biological or-ganic ligands control iron isotope fractionation in the riparian wetland. *Sci Rep* 11, 1933 (2021).
- Mathur R, Ruiz J, Titley S, Liermann L, Buss H, Brantley SL (2005) Cu isotopic fractionation in the supergene environment with and without bacteria. *Geochim Cosmochim Acta* 69:5233–5246.
- Masarik J, Beer J (1999) Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth’s atmosphere. *J Geophys Res Atmos* 104:12099–12111
- Nriagu JO (1988a) A silent epidemic of environmental metal poisoning? *Environmental Pollution* 50: 139–161.
- Nriagu JO (1990a) The rise and fall of leaded gasoline. *Science of the Total Environment* 92: 13–18.
- Nriagu JO (1990b) Global metal pollution. *Environment* 32: 7–33.
- Sierra-Hernández, M. R., Beaudon, E., Porter, S. E., Mosley-Thompson, E., y Thompson, L. G. (2022). Increased fire activity in Alaska since the 1980s: Evidence from an ice core-derived black carbon record. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 127(2). <https://doi.org/10.1029/2021jd035668>
- Nishiizumi K, Imamura M, Caffee MW et al (2007) Absolute calibration of Be-10 AMS standards. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect B Beam Interact Mater Atoms* 258:403–413
- Thompson, L. (2017). Past, Present, and Future of Glacier Archives from World’s Highest Mountains. *Proceedings of the American Philosophical Society*. Vol. 161, No. 3, pp. 226-243.

Manuscrito recibido: 6 de octubre de 2022  
 Manuscrito corregido recibido: 10 de marzo de 2023  
 Manuscrito aceptado: 31 de marzo de 2023

# COMETAS: ENTRE HITOS, MITOS E HISTORIAS

Alejandro Paredes-Arriaga<sup>1,2\*</sup> y Mariana Amador-Ortega<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

\*ale.paredes.arriaga@gmail.com (autor para correspondencia)

## RESUMEN

La observación de los cometas se ha realizado desde hace miles de años y no ha dejado de ser una actividad importante hasta hoy. Al ser fenómenos aparentemente espontáneos y algunos tan vistosos como para ser observados a plena luz del día, han llegado a protagonizar antiguas mitologías, supersticiones, cuentos, poemas, pinturas, descubrimientos científicos y avances ingenieriles, entre muchas otras. En este trabajo se realiza un recuento de algunos cometas que han marcado la historia humana, mencionando desde el impacto social que han tenido, como en el caso de las discusiones epistémicas que generó el gran cometa de 1680, hasta algunos de los avances científicos más importantes que se han logrado con su estudio, tales como los aportes de Kepler y Newton a entendimiento de los movimientos orbitales de los objetos celestes, o los descubrimientos recientes de moléculas orgánicas importantes para la química prebiótica y el origen de la vida.

**Palabras clave:** Cola, Halley, órbita, gas, polvo.

## ABSTRACT

*The observation of cometary bodies has been done since thousands of years ago and is a topic of great interest today. Amazing and spontaneous nature has led comets to influence multiple aspects of human societies: ancient mythologies, superstitions, stories, poems, paintings, scientific discoveries, engineering advances, etc. This work presents a detailed review of some comets that influenced human culture. We described their impact on society and some of the most important scientific advances in astronomy, physics, and chemistry for their remote and in situ analysis.*

**Keywords:** Tail, Halley, orbit, gas, dust.

## INTRODUCCIÓN

Previo y posterior a la separación formal de la astronomía con la astrología, los astros y fenómenos celestes han generado curiosidad, fascinación y terror por igual. Los cometas, al ser fenómenos aparentemente espontáneos y sin periodicidad clara, eran considerados como eventos especialmente portentosos, asociados a ciertos sucesos históricos, guerras, brotes epidémicos, etc. (Webster *et al.*, 1988). Tal es el caso del “Gran cometa de 1680”, un fenómeno apreciable a simple vista desde gran parte del mundo, el cual, al ser tan imprevisto y sorprendente, se percibió como un presagio de horribles destinos (Wilkening y Matthews, 1982). Al mismo tiempo, motivó importantes debates y descubrimientos científicos que precedieron y fueron parte de la revolución científica de los siglos XVII y XVIII (Dávila-Martínez, 2012).

El registro de cometas a lo largo de la historia es bastante amplio y se requeriría escribir varios libros para hablar de cada cometa importante y las implicaciones científicas, teológicas, culturales y sociales que han dejado con su paso. En este texto se exploran algunos cometas que han despertado especial interés, ya sea por su brillo o forma, por los conocimientos científicos generados a partir de su estudio, o por ser fenómenos lumínicos periódicos observados desde la Tierra.

El objetivo es hacer un compendio de algunos cometas que, a su paso cerca de la Tierra, han tenido implicaciones para la humanidad en aspectos sociales y culturales, particularmente han impulsado diversos avances en la ciencia e ingeniería durante los últimos 600 años. El conocer estas historias despierta el interés sobre temas adyacentes y mostrará al público lector las intersecciones entre las ciencias y humanidades.

## METODOLOGÍA

Se realizó una extensa revisión bibliográfica de textos publicados en inglés y español sobre los cometas más importantes de la historia desde el siglo XVI hasta la actualidad. Dada la variedad de ejemplos y disciplinas cubiertas, la revisión abarcó revistas especializadas indexadas internacionalmente, libros de carácter científico e histórico, compendios de poesía y diversas tesis del área de humanidades, sobre todo, al abordar las discusiones epistémicas que se generaron sobre el cometa Kirch en la Nueva España, alrededor del año 1680. Posteriormente, se seleccionaron los cometas con mayor información confirmada en más de una fuente, que hayan tenido implicaciones sociales, culturales y/o históricas en una o varias regiones del mundo, y que dichos ejemplos resultaran de interés multidisciplinario.

## ASPECTOS GENERALES DE LOS COMETAS

Los cometas son restos de la formación del sistema solar y los planetas. Cuando alguno pasa cerca del Sol, el calor y el viento solar hacen que pierdan materia y se generen las colas que los caracterizan (Erickson y Erickson, 2003). Cuando pasa esto se dice que el núcleo cometario se encuentra “activo”. Después de pasar varias veces cerca del Sol, los cometas se desprenden de la mayor parte de su masa volátil y se asemejan más a un asteroide.

En la Figura 1 se esquematizan las partes de un cometa activo. El núcleo está formado por un conglomerado de hielos de compuestos volátiles, principalmente agua, dióxido y monóxido de carbono, amoníaco y metano, entre otros (Whipple, 1950). La coma es la atmósfera que rodea al cometa y está formada por materiales sublimados del núcleo debido a la radiación solar. Los componentes volátiles sublimados salen expulsados del núcleo cometario a manera de chorros de gas, arrastrando consigo al polvo (Zakharov *et al.*, 2021).

Ambos materiales forman las colas del cometa, las cuales pueden medir hasta 1 unidad astronómica (ua) de longitud, es decir 150, 000, 000 km. De manera general hay dos tipos de colas. Las tipo I están compuestas de gas ionizado ( $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{CH}^+$  y  $\text{OH}^+$ ) y siguen la dirección del viento solar. Las tipo II están formadas principalmente de polvo, generalmente son más cortas y son curvadas respecto a las tipo I porque siguen la trayectoria del cometa y no la del viento solar (Brandt, 1968; McFadden y Britt, 2003; Voelzke, 2006; Gulyaev, 2015).

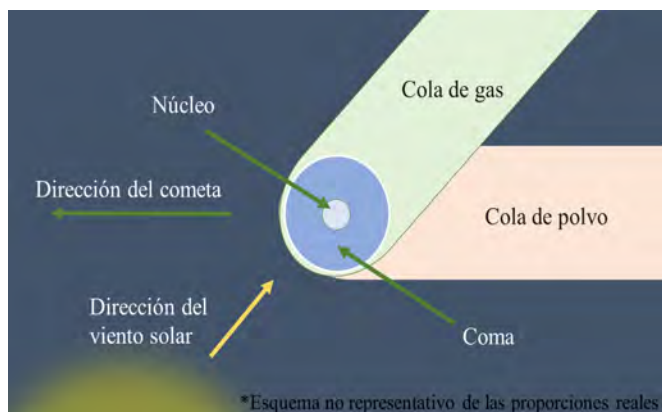


Figura 1. Esquema general de las partes de un cometa. Para fines ilustrativos no se encuentra en una escala proporcional a las dimensiones reales.

Existen diferentes formas de clasificar a los cometas, aunque casi todas guardan cierta relación. La primera diferenciación se realiza por el periodo orbital ( $p$ ), es decir, por el tiempo que tardan en dar una vuelta alrededor del Sol. De acuerdo con este criterio, se tienen los cometas de periodo corto y los cometas de periodo largo. Los primeros tienen periodos menores a 200 años y abarcan a los cometas “de la familia de Júpiter” (con un periodo menor a 20 años) y a los “tipo Halley” (con periodos entre 20 y 200 años). Los cometas de periodo largo tienen periodos mayores a 200 años (Levison, 1996). Un resumen de estos criterios se puede ver en la Figura 2. Una de las clasificaciones más recientes para cometas de periodo corto está en función del llamado “parámetro de Tisserand”, el cual hace referencia a la influencia gravitacional de Júpiter sobre los cometas (Spohn *et al.*, 2014), donde dados ciertos valores el cometa se clasifica como “de la familia de Júpiter” o tipo Halley. Cada clasificación tiene ventajas y desventajas, y siempre habrá algún cometa que escape a la norma.

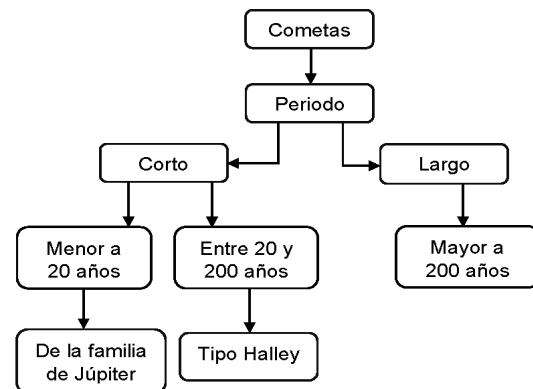


Figura 2. Mapa conceptual de la clasificación de los cometas por su periodo orbital. Esta es la clasificación más común actualmente.

## COMETAS QUE HAN DEJADO MARCA

En esta sección se encuentran diversas anécdotas, historias y datos recopilados sobre cometas que consideramos importantes compartir. No requiere que vaya leyendo una subsección tras otra obligadamente, puede ir directamente al cometa que sea de su interés y disfrutar de su lectura.

### El gran cometa de 1577

Fue avistado en muchas partes del mundo, desde Perú y México hasta Japón y Europa (Seargent, 2008). El cometa fue sumamente brillante, registros de diversas partes del mundo mencionan que era “tan brillante como la Luna misma”. Al ser visible por más de 70 días, se observaron cambios en su morfología, por ejemplo, que su cola se hiciera doble, fenómeno reportado por Cornelius Gamma en Bélgica (Seargent, 2009). El célebre astrónomo Tycho Brahe siguió al cometa todo lo que pudo desde su observatorio en Dinamarca, y midiendo su paralaje pudo determinar que dicho objeto se encontraba más allá de la Luna, fuera de la atmósfera terrestre (Iriarte Aguirrezabal y Churrua, 1996), algo extraño para la época, ya que al ser un objeto aparentemente errante, era una excepción al modelo de las esferas celestes de Aristóteles en el cual se proponía que “el reino celestial más allá de la Luna” era una región perfecta e inmutable. Medir un paralaje consiste en determinar el ángulo que se forma al observar un objeto desde dos sitios diametralmente opuestos, lo cual depende de la distancia entre esos dos puntos de observación y de la distancia entre el observador y el objeto: entre mayor sea esta última distancia, menor será el ángulo (Martínez, 2005).



## El gran cometa de 1680 (cometa Kirch)

Fue visible en el hemisferio norte desde varios continentes entre los meses de noviembre de 1680 y febrero de 1681, y fue documentado por primera vez por el astrónomo alemán Gottfried Kirch el 14 de noviembre de 1680 (Gauger-Quiroz, 2015). El paso de este cometa representa uno de los fenómenos celestes más impresionantes de los últimos siglos, pues pasó rápidamente de ser un punto en el cielo a mostrar una cola que, según diversos observadores en Filipinas, Inglaterra, Italia y Nueva York, llegó a verse más grueso que un arcoíris con un tono dorado distintivo (Seargent, 2008). Unas de las observaciones más interesantes fueron las realizadas por Kirch, el 7 y 8 de enero, quien señaló que además de la "cola grande y brillante que se aleja del Sol", el cometa también poseía una segunda cola muy débil que apuntaba directamente hacia el Sol (durante esas dos noches) (Seargent, 2009).

Cuando el cometa Kirch apareció, la ciencia cometaria enfrentaba varios problemas. La periodicidad, la física y el significado teleológico de los cometas era esencialmente desconocido. Pero causaba especial dilema la ignorancia de sus órbitas, problema que fue esclarecido por Newton, quien se percató que, contrario a lo que se suponía, no siguen trayectorias rectilíneas, sino cónicas. Expuso estas ideas y demostró las leyes de Kepler (Hughes, 1988) en su publicación *De Motu Corporum in Gyrum* (1684), texto donde sentó las bases para su famoso *Principia Mathematica* (1687) (Schechner, 1999), uno de los libros sobre los que se fundamenta el pensamiento científico actual. Newton establece que la órbita debe ser una cónica, y describe un método para calcularla. Al comprobarlo con el cometa de Kirch, la trayectoria coincide con un error de sólo 1 minuto de arco. El texto de los *Principia Mathematica* marcó una distinción entre el pensamiento astrológico y astronómico, y un paso hacia la revolución científica y la ciencia moderna.

Edmond Halley usó el método de Newton para publicar *Astronomiae Cometae Synopsis* en 1705, el cual contiene la descripción de numerosas órbitas cometarias. Las predicciones de este escrito fueron confirmadas con el regreso del cometa *Halley* en 1758 (Hughes, 1988).

En el continente americano se suscitaban intensas discusiones alrededor del cometa Kirch y su significado, debido a que en la Nueva España, al igual que en otros continentes, se consideraba a los cometas como presagio de desgracias y símbolo de desorden universal (Sáenz, 1986). La polémica desarrollada entre el jesuita Eusebio Francisco Kino (cartógrafo, geógrafo y astrónomo) y Carlos de Sigüenza y Góngora (historiador, escritor y cosmógrafo) es de las más estudiadas hasta ahora porque marca la pauta a uno de los primeros textos de argumentación científica como los conocemos hoy día, por ello, consideramos importante comentarlo (aunque sea brevemente) en este trabajo.

Debido al augurio de destrucción con el que se asociaba el paso de un cometa, Sigüenza y Góngora (1681) publicó el folleto *Manifiesto filosófico contra los cometas despojados del Imperio que tenían sobre los Tímidos*, como un intento de remediar el pánico que se propagaba, mencionando que eran sucesos naturales, sin significado o influencias perjudiciales para la humanidad. A este debate se unieron diversos personajes como el caballero flamenco Martín de la Torre, el médico universitario José de Escobar Salmerón y Castro, el matemático Gaspar Juan Evelino, entre otros (Aparicio-Sedano, 2015). Una de las respuestas más destacadas fue la de Kino (1681), en su libro *Exposición astronómica de el cometa*, donde

mezcla un análisis matemático certero sobre las características astronómicas del cometa, pero defiende la postura conservadora del presagio que anuncia. A propósito de este escrito, Sor Juana Inés de la Cruz le dedicó un soneto a Kino, titulado *Aplauda la ciencia astronómica del padre Francisco Kino*.

Posteriormente, Sigüenza escribió *Libra Astronómica y Filosófica*, su texto más ambicioso, un excelente ejemplo y pauta de texto científico y argumentativo (Bauer, 2009). En este libro rebate uno por uno los argumentos que se le opusieron (Aparicio-Sedano, 2015) usando autores y citas científicas. Este libro se centra en una conclusión reformadora: el valor científico de los hechos observables sobre la superstición. Para lograrlo, Sigüenza tuvo que separar su condición religiosa de la científica (Gauger-Quiroz, 2015); cimentando uno de los primeros antecedentes para separar de forma categórica a la astronomía de la astrología.

Al separarse la astronomía de la astrología, nació una nueva cosmología. Poco a poco se establecía el método científico que, con la prerrogativa de observar, registrar y analizar, alumbraba infinitas posibilidades en los nuevos estudios y descubrimientos que empezaron a surgir.

## El gran cometa de 1811 (C/1811 F1)

Fue descubierto por el astrónomo francés Honoré Flaugergues el 25 de marzo de 1811. Se tienen registros de avistamientos en Europa, Norteamérica, Rusia y Sudáfrica durante más de 16 meses, tiempo récord para la época. Este cometa pudo apreciarse a simple vista, pues se le describe como un cometa muy brillante, aunque con las estimaciones actuales parece poco probable que fuera visible durante el día. Algunas mediciones comparan el tamaño del Sol en el cielo con el diámetro de la coma del cometa, por lo que también se le considera un objeto especialmente grande, resultando impresionante para todas las personas que pudieron contemplarlo (Seargent, 2009; Lusher, 2011).

William Herschel reportó haber distinguido dos partes principales de la cabeza del cometa: una coma difusa y un "núcleo verdadero" sólido en su interior (Seargent, 2009). Notó además que el brillo aumentaba conforme el cometa se acercaba al perihelio, lo que le llevó a deducir que la coma del astro estaba compuesta por sustancias volátiles, las cuales son causantes de su luminosidad al acercarse al Sol (Schechner, 1999). Pierre-Simon Laplace retomó las observaciones de Herschel para exponerlas en una visión más universal que también incluía al resto del Sistema Solar: "la materia volátil y difusa que otorga su brillo a los cometas era diferente a las estrellas pero se encontraba presente en los sistemas planetarios, y era cuando un cometa la perdía que podía empezar a transformarse en un planeta" (Schechner, 1999). Esta es una idea primitiva de la evolución de los sistemas planetarios y los objetos dentro del mismo sistema solar. Laplace aún temía ciertos riesgos planetarios asociados a los cometas, como colisiones contra la Tierra, inundaciones o sequías por el intercambio de agua entre los dos cuerpos; a pesar de ello, estos recelos ya no estaban dentro del marco de la superstición y la magia.

Este cometa, como otros, es recordado por el torrente de interpretaciones supersticiosas que le fueron adjudicadas. Por ejemplo, en Europa se creía que era el presagio de plagas, maldiciones, revoluciones, e incluso del fin del mundo. Por el contrario, para los nativos americanos representó el signo de un "buen espíritu", señal de buen augurio (Lusher, 2011). Así, con el

tiempo, la leyenda del “Gran cometa de 1811” se fue permeando en la cultura popular, inspirando importantes obras literarias como *Manfred*, de Lord Byron; y se le menciona en ‘La Guerra y la Paz’, de León Tolstoi.

### 1P/Halley

Es indiscutiblemente el cometa más famoso y sobresaliente de la historia; en parte debido a su periodo orbital el cual varía entre los 74 y los 79 años, y que permite verlo en un tiempo comparable al de la vida humana. Su primer registro histórico formal fue hacia el año 240 a. C. en China, Babilonia y Roma, aunque probablemente fue observado por los seres humanos desde mucho tiempo atrás. En Roma lo describieron con una silueta parecida a una espada, por lo que se tomó como presagio de guerras y revoluciones (Emiliani, 1992). En sus retornos posteriores suele existir cierta incertidumbre pues los registros de varios cometas pueden confundirse o estar por completo ausentes. Este es un pequeño resumen de algunos de sus avistamientos más relevantes.

En el 684 d. C. se reportó que su paso provocó lluvias y relámpagos, nocivas para la gente y el ganado. El avistamiento del año 837 d. C. es el más documentado en la antigüedad, y se ha calculado que también fue el de mayor aproximación a la Tierra, pues fue visible desde todos los continentes. El regreso del año 1066 d. C. es de los más famosos porque pudo ser observado en Arabia, Hawái, Egipto, Medio Oriente, China, Europa (donde se creyó que anunciaba derrotas en guerras), y probablemente otras regiones, generando diversos mitos y leyendas. En 1222 d. C. pudo ser observado a simple vista durante el día, y fue descrito por japoneses y coreanos como “más grande que la Luna y más brillante que Venus”. Se piensa que el cometa de 1531 (llamado cometa de Apian), fue el primer registro desde la recién fundada Nueva España, y es desde este punto que los cometas comenzaron a ser vistos no sólo como mensajeros del destino, sino como un objeto de estudio de las ciencias naturales y las matemáticas (Seargent, 2008).

En 1607 fue observado y descrito en términos matemáticos por Johannes Kepler. En su retorno siguiente, en 1682, fue cuando realmente provocó una revolución en la ciencia porque pudo ser estudiado astronómicamente, e incluso se llegó a pensar que era el regreso del Gran Cometa de 1680. Entre los observadores más importantes destacan los ingleses John Flamsteed, Isaac Newton y Edmund Halley (Emiliani, 1992). Los tres eran colegas cercanos y mantuvieron correspondencia durante años, intercambiando ideas respecto a los cometas, su naturaleza y significado. A partir de estas discusiones (recordando que la labor científica surge colectivamente), fue que Halley publicó en 1705 su *Astronomiae Cometicarum Synopsis*, donde se retoma la obra de Newton sobre los cometas y establece un método para calcular las órbitas cometarias. De esta forma muestra que los cometas siguen órbitas cónicas y periódicas, al igual que los planetas. Esto, en consecuencia, sembró la idea de que la misma Ley de Gravitación se puede aplicar a muchos cuerpos del sistema solar e incluso más allá (Hughes, 1988; Webster *et al.*, 1988).

El aporte más famoso de Halley fue la comparación de las características orbitales de los cometas Apian de 1531, el Kepler de 1607 y el de 1682; basándose en su parecido concluyó que se trataba del mismo cometa, el cual tenía un periodo de unos 75 o 76 años y que habría de regresar en 1759, lo cual implicaba que los cometas son fenómenos naturales definibles y, por tanto, no tienen que ver con ningún concepto supersticioso. Halley, al igual que Newton,

nunca negó la voluntad divina en los fenómenos naturales, pero ya no los consideraron entes mágicos y temibles (Schechner, 1999).

En 1759 fue esperado con temor y expectación. Cuando finalmente se reportó su aparición y los cálculos confirmaron que se trataba del mismo cometa, se le bautizó con el nombre de *Halley*, quien había fallecido en 1742, convirtiéndolo en el primer cometa cuyo regreso fue predicho (Seargent, 2009). Desde entonces, con puntualidad, el cometa ha vuelto a aparecer. En 1910 se fotografió por primera vez y el 14 de marzo de 1986, la astronave *Giotto* tomó imágenes del núcleo cometario a 596 km de distancia, siendo la primera vez que se obtenían imágenes a tan corta distancia de un cometa. Ese año, el cometa *Halley* fue visible sin telescopios durante 7 meses. Se espera su retorno en el año 2061.

### Kohoutek (C/1937 f)

Fue detectado a principios de 1973 y visible desde la Tierra sin necesidad de equipamiento especial a finales de ese año y a principios de 1974. Es probablemente el cometa más brillante del siglo XX y el mejor estudiado hasta ese momento. Dado el tiempo entre su descubrimiento y su paso por la Tierra, se pudieron preparar diversos instrumentos, laboratorios y organizaciones para su observación, lo que resultó en la obtención de información en un amplio intervalo del espectro electromagnético (ultravioleta, visible, infrarrojo y radiofrecuencias) (Biermann, 1973), siendo el primer cometa observado por naves espaciales.

Uno de los descubrimientos más importantes fue la confirmación de agua en la cola del cometa (Wehinger *et al.*, 1974). Desde muchos años atrás se especulaba que el agua es uno de los principales componentes de los cometas, pero fue hasta entonces que se dio una confirmación directa de ello. Los cálculos indican que al estar a 1 ua de distancia del Sol, *Kohoutek* perdía cerca de 1 tonelada de agua por día. Por la excentricidad de su órbita, se estimó que ésta era la primera vez que pasaba cerca del Sol (Odell, 1976), y que se estructuró en las etapas tempranas de formación del sistema solar. En cuanto a moléculas orgánicas, se detectaron acetonitrilo ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ), ácido cianhídrico (HCN), carbono y oxígeno atómico (como productos de la descomposición de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ ) y cianuro ( $\text{CN}^-$ ), entre otros (Gary, 1975).

Su avistamiento en la Tierra no dejó de causar sorpresas, y tuvo impactos culturales amplios: una venta desproporcionada de telescopios en 1973, grupos radicales religiosos y cultos que interpretaron el cometa de diversas formas (algunas catastrofistas, otras hasta esperanzadoras), canciones tituladas “Kohoutek” de bandas como R.E.M. o Journey. El genio del jazz, Sun Ra, interpretó y grabó el *Concert for the Comet Kohoutek* (concierto para el cometa Kohoutek) en 1973. Se le hizo referencia en programas televisivos de la cultura popular como “Los Simpson”, “Peanuts” y “El Chavo del 8”, así como en el cómic de Marvel *The Defenders* (los defensores) #15 (página 11), donde Magnetó explica que el paso del cometa Kohoutek le ayudó a liberarse de su encierro en el núcleo de la Tierra (Lee *et al.*, 1974). Incluso Jaime Sabines se inspiró en él para escribir el poema *Veremos* (Sabines y Flores Liera, 2012):

#### VEREMOS

*Veremos el cometa Kohoutek estos días.*

*Calculan los astrónomos que volverá a ser visto dentro de cincuenta mil años.*

*¿Entiendes mi arrebató?*

*¿No es una dádiva generosa amada, amiga mía, tu presencia hoy?*

*-Jaime Sabines*

### Shoemaker-Levy 9

Fue el primer cometa descubierto que no orbitaba alrededor del Sol, pues en el año de 1993 se observó que se encontraba orbitando al planeta Júpiter, contra el cual terminó impactando en 1994. El cometa fue capturado por la influencia gravitacional de Júpiter y conforme se acercaba al planeta, 21 fragmentos del cometa impactaron al gigante gaseoso, dejando marcas temporales en su atmósfera, lo que permitió que telescopios en la Tierra y el espacio (entre ellos el telescopio espacial Hubble), observaran los diferentes eventos, pudiendo obtener información sobre el material que hay debajo de la capa superficial de nubes del planeta gigante (Zahnle y Low, 1994; Weaver *et al.*, 1995). Se detectaron diversas moléculas en la atmósfera de Júpiter, tales como monóxido de carbono (CO), azufre (S<sub>2</sub>), sulfuro de carbono (CS<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), y metanol (CH<sub>3</sub>OH), entre otras (Lellouch *et al.*, 1995).

### 9P/Tempel 1

A pesar de no ser un cometa particularmente brillante, es conocido porque en el año 2005 la sonda espacial *Deep Impact* (impacto profundo) lanzó un “impactador” a la superficie del cometa desde aproximadamente 500 km de distancia del núcleo, con el fin de obtener información de su composición interna, dejando un cráter de 150 m de diámetro aproximadamente (A’Hearn *et al.*, 2005). Posteriormente, en el año 2011, la sonda espacial *Stardust* se acercó al cometa para obtener imágenes del cráter dejado por el *Deep Impact* y observar su evolución (Schultz *et al.*, 2013).

### 55P/Tempel-Tuttle y 109P/Swift-Tuttle

La mayoría de las lluvias de meteoros (o lluvia de estrellas como se le conoce coloquialmente) son productos de los cometas, que al acercarse al Sol, pierden material tanto volátil como rocoso, dejando granos de polvo a lo largo de su órbita (Jenniskens, 2007). Cuando la Tierra u otro planeta se cruza con el rastro de los cometas, estos fragmentos entran a la atmósfera y generan el fenómeno lumínico conocido como meteoro, el cual es causado cuando el material cometario se funde, evapora e ioniza debido a su interacción con las moléculas de la atmósfera. Las Leónidas y las Perseidas son dos lluvias de meteoros muy famosas, que se originan por el paso de los cometas *55P/Tempel-Tuttle* y *109P/Swift-Tuttle*, respectivamente (Borovička, 2004).

### 2P/Encke

Tiene un periodo orbital corto, aproximadamente de 3 años, y fue muy estudiado porque este periodo se modifica constantemente, debido a dos razones principales: perturbaciones planetarias por Júpiter, Mercurio y Saturno, y a la desgasificación de su núcleo, pues cada que se acerca al Sol, su material sublima y pierde masa (Sekanina, 1991). Los estudios sobre *2P/Encke* contribuyeron al actual modelo de los cometas como “una bola de nieve sucia” (Whipple, 1950, 1951).

En 1908 entró a la atmósfera terrestre un cuerpo menor sobre la región de Tunguska, Rusia, el cual se fragmentó súbitamente alrededor de los 8 km de altura, lo que sonó como una gran explosión; aún se debate si fue un asteroide o un núcleo cometario. La energía liberada por el objeto en la atmósfera se estima entre 3 y 50 megatonnes. Dicha energía empujó al aire con una fuerza tal que cuando éste llegó a la superficie derribó 2150 ± 50 km<sup>2</sup> de árboles

de la taiga siberiana, arrasando con más de 80 millones de árboles y arbustos (Longo, 2007). Dentro y cerca del área de caída de árboles había aproximadamente 30 personas, de las cuales fallecieron al menos 3 (Jenniskens *et al.*, 2019). Hubo muchas hipótesis alrededor del origen de la explosión, desde antimateria o un agujero negro miniatura, hasta la caída de un asteroide, pero nunca se encontró evidencia. Shapley (1930), fue el primero en sugerir que el evento pudo ser originado por un cometa. Posteriormente, Kresak (1978) mostró, a partir de cálculos orbitales, que el objeto que cayó pudo ser un fragmento desprendido del cometa *Encke*. Este evento denota la importancia que tiene la investigación espacial actualmente, en particular, la búsqueda de objetos peligrosos que puedan impactar en la Tierra y generar cráteres o explosiones que pongan en riesgo la seguridad de las personas; objetos tales como asteroides, cometas o basura espacial.

Las Táuridas son una lluvia de meteoros que tienen su origen en un cometa más grande, que al fragmentarse dio origen al cometa *Encke* hace 20 000 años (Olano, 2021). El satélite *MESSENGER* (NASA) observó que material desprendido de este cometa también impacta en Mercurio (Killen y Hahn, 2015). Existe una observación realizada por la misión STEREO en el 2007, donde se ve la cola del cometa siendo “arrancada” por una eyección de masa coronal del Sol; el cual fue un evento increíble y de una belleza implícita singular (el lector puede encontrarlo si busca “cometa *Encke*” en Wikipedia). También tomó relevancia en el siglo XIX dentro de la discusión sobre el éter, una sustancia la cual se creía era el medio por el que se desplazaban las partículas de luz (teoría desacreditada hoy día), ya que notaron que el cometa acertaba su órbita con cada periodo, y esta cualidad fue atribuida a la resistencia que se generaba por el éter en el espacio (Mossotti, 1826); hoy en día se puede atribuir ese efecto a que la desgasificación del cometa puede inducir cambios en su curso. Por último, existe una hipótesis de que un cometa, el cual podría ir rotando sobre sí mismo, generaría una cola irregular similar a una espiral de varios brazos, lo cual pudo originar el símbolo de la esvástica en diferentes culturas del mundo separadas geográficamente (Sagan y Druyan, 1997). Aunque esta hipótesis debe ser tomada con extrema precaución, es interesante.

### 19P/Borrelly

Pertenece a la familia de los cometas jovianos, su núcleo y coma fueron observados y analizados por la sonda espacial *Deep Space 1* (Espacio profundo 1) en septiembre del 2001, con un equipo de sensores remotos llamado MICA (*Miniature Integrated Camera Spectrometer* / Espectrómetro Miniatura de Cámara Integrada) (Buratti *et al.*, 2004). Así pudo medirse un núcleo de 8 kilómetros de largo, con albedo variable (cociente de luz reflejada respecto a la luz incidente) y temperaturas superficiales de hasta 345 K. También se analizó el material y trayectorias de la coma; dando como resultado unas de las mejores imágenes de un cometa y mostrando que la formación de la coma es más compleja de lo que se pensaba debido a la presencia de un chorro de polvo principal que se dividía en tres más pequeños (Soderblom *et al.*, 2002). Análisis con un espectrómetro de masas mostró los iones predominantes: OH<sup>+</sup> (57 %), H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> (29 %), O<sup>+</sup> (13 %), CH<sub>3</sub><sup>+</sup> (5 %), CH<sub>2</sub><sup>+</sup> (4 %). De particular interés fue la pequeña cantidad detectada del ion H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> (<9 %), ya que fue la molécula más abundante observada en el cometa *Halley* durante una misión de acercamiento (Nordholt *et al.*, 2003).

**81P/Wild 2**

Pertenece actualmente a los cometas de la familia de Júpiter. En 1974 el gigante gaseoso le hizo cambiar su órbita drásticamente, pasando de tener un perihelio de 4.9 ua y un afelio de 25 ua, a unos de 1.58 ua y 5.2 ua, respectivamente (Tsou *et al.*, 2004). En enero del 2004, la sonda espacial *Stardust* de la NASA realizó análisis remotos de su núcleo y coma; así mismo colectó polvo de su coma que impactó en celdas de aerogel (material ultraligero poroso hecho a base de sílica similar a una esponja) y láminas de aluminio (Flynn, 2008). *Stardust* tuvo la capacidad de regresar a la Tierra con las muestras colectadas para su análisis en enero del 2006.

El análisis de los pequeños cráteres de impacto hechos por el polvo en el aerogel y en las láminas de aluminio, muestran diversidad de tamaños y tipos de minerales, siendo la mayoría olivino, piroxeno con bajo contenido de calcio y sulfuros de hierro, aunque en una celda dominaron los minerales refractarios (minerales que resisten temperaturas mayores a 1850 K sin descomponerse) similares a las inclusiones de calcio-aluminio presentes en las meteoritas primitivas (Flynn, 2008), lo cual es importante porque pueden ser indicadores de los primeros minerales formados en todo el sistema solar. También se encontraron compuestos orgánicos muy interesantes, tales como hidrocarburos aromáticos con masa atómica desde 78 hasta 800 unidades y compuestos alifáticos de baja masa como alcoholes, éteres, aminas y aminoácidos (glicina, L-alanina, metilamina, y etilamina), entre otros (Sandford *et al.*, 2006). La presencia de glicina en un cometa es un descubrimiento muy relevante, dado que es uno de los aminoácidos formadores de proteínas en los seres vivos, por lo cual es un bloque fundamental para la vida misma. Su descubrimiento apoya la teoría de que algunos componentes para el origen de la vida en la Tierra provinieron del espacio exterior.

**Hale-Bopp (C/1995 O1)**

Es uno de los cometas más famosos y relevantes de la era moderna. Fue descubierto simultáneamente por Alan Hale y Thomas Bopp el 23 de julio de 1995 en los Estados Unidos, es el cometa de mayor tamaño, brillo y tiempo de visibilidad del que se tiene registro (Combi, 2002), por lo que ha recibido indiscutiblemente el apelativo de "Gran Cometa". Gozó de interés en una extensa variedad de regiones del globo, y fue observable a través de telescopios durante años. Debido a su insólita intensidad luminosa (unas 11 000 veces más brillante que *Halley* en 1986) pudo distinguirse intensidad lumínica en el cielo del hemisferio norte a simple vista durante el día y la noche durante casi 21 meses; por lo que rompió el récord de tiempo de visibilidad que había establecido el Gran Cometa de 1811 (Seargent, 2009). El que apareciera a finales del siglo XX hizo posible que se tenga registro completo y detallado de su recorrido, dinámica y comportamiento.

*Hale-Bopp* es un cometa inusual, pues presentó fenómenos en su coma que nunca se habían advertido (Combi, 2002; Seargent, 2009): explosiones con la forma de jets y espirales, una tercera cola de sodio eléctricamente neutro y una alta tasa de escape de agua (Combi, 2002; Seargent, 2009). Los nuevos descubrimientos sobre su composición química motivaron estudios relacionados con el papel de la materia orgánica cometaria para la química prebiótica y el origen de la vida (Ehrenfreund y Charnley, 2000).

**67P/Churyumov-Gerasimenko**

Fue descubierto en 1969 por Klim Churyumov, al examinar fotos de otro cometa tomadas por Svetlana Gerasimenko (ESA, s/f). Es observable desde la Tierra cada 6.6 años. La sonda espacial Rosetta de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), fue lanzada el año 2004 y tuvo una compleja trayectoria espacial, donde aprovechó la influencia gravitacional de Marte y la Tierra para llegar al cometa en noviembre del año 2014. Posteriormente desplegó un módulo de aterrizaje (*Philae*) sobre la superficie, para así poder estudiar la coma y el núcleo, caracterizando el gas, polvo, morfología y compuestos orgánicos (Barucci y Fulchignoni, 2017).

Esta misión tuvo muchísimos resultados interesantes pero nos gustaría mencionar tres en especial: 1) La información detallada sobre su morfología, siendo un cometa compuesto por un lóbulo principal y uno secundario más pequeño, se identificaron 26 regiones geológicas (El-Maarry *et al.*, 2016) y diversas zonas de actividad donde se generan la coma y la cola. 2) El análisis de su superficie muestra una compleja mezcla de compuestos orgánicos, agua y dióxido de carbono. El espectrómetro de gases COSAC analizó directamente el núcleo del cometa y mostró 16 compuestos orgánicos, entre ellos algunos con relevancia prebiótica: acetaldehído, glicolaldehído, acetona y etilamina, entre otros; algunos detectados por primera vez en un cometa (Goesmann *et al.*, 2015). 3) La medición de la relación isotópica entre Deuterio e Hidrógeno (D/H) en el agua del cometa muestra valores tres veces mayores a los del agua terrestre (Altwegg *et al.*, 2015). Al comparar los valores de D/H de diversos cometas (jovianos y provenientes de la nube de Oort) y asteroides, se obtiene que existe una heterogeneidad en las relaciones isotópicas del agua en el sistema solar, indicando la importancia de la zona en la cual se formó el agua; lo que aporta mucho a la discusión del origen del agua en la Tierra, sugiriendo que el agua en nuestro planeta se acumuló desde su formación, y si hubo una contribución por parte de cometas en la Tierra primitiva, no fue en cantidades significativas.

**COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES**

Los cometas han generado reacciones de todo tipo en la humanidad, entre ellas una fascinación y sorpresa que han impulsado descubrimientos, muchas teorías científicas, avances tecnológicos y numerosas discusiones teológicas y sociales; así como cambios de paradigma en diferentes religiones y culturas a lo largo de la historia humana; el gran cometa de 1680 es el ejemplo perfecto de esto.

En los siglos XX y XXI, los cometas han sido blanco de numerosas investigaciones científicas, permitiendo la innovación y generación de nuevas tecnologías para su exploración y análisis, al grado de que ahora se han podido realizar trabajos *in situ* y hasta recuperar material para su investigación más detallada en la Tierra.

Parece que los cometas no dejan de guardar secretos y es emocionante pensar hasta dónde se llegará para desvelarlos. Cada nueva contribución nos lleva un paso más cerca de descubrimientos sobre el origen del sistema solar, su desarrollo, la influencia gravitacional de diferentes planetas, sus propios cambios morfológicos y la dinámica de sus partículas, las reacciones químicas a diversas temperaturas y bajas presiones, la evolución química y, posiblemente, el origen de la vida.

Si quisiera el lector profundizar más en la historia de los cometas, les recomendamos el libro *The Greatest Comets in History* (Seargent,

2009), que ha sido citado varias veces en este texto, y tiene una compilación histórica de más de 70 cometas, algunos de registros con antigüedad mayor a los 2000 años; lamentablemente no cuenta con una versión en español; este escrito busca hacer un acercamiento al tema en este idioma. En español, sugerimos el libro *De Paracelso a Newton: La magia en la creación de la ciencia moderna* (Webster et al., 1988), que es un acercamiento al desarrollo del pensamiento científico y filosófico. También recomendamos el texto *José Guadalupe Posada entre cometas y terremotos* (Sáenz, 1986), donde se relatan diversas historias Sobre cómo se vivieron fenómenos naturales (terremotos y el paso de cometas) en la sociedad, y cuenta con ilustraciones de los grabados que Posada realizó de estos eventos. Por último, invitamos al lector a buscar en internet las pinturas que se realizaron en su respectiva época sobre “Los Grandes Cometas” de 1577, 1680 y 1811, las cuales estamos seguros que les parecerán más que interesantes.

## AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra por el apoyo académico y a CONAHCYT por el apoyo económico (CVU 929149). A la Dra. Guadalupe Cordero por sus imprescindibles revisiones, correcciones y aportes a este trabajo, al M. en C. Claudio A. Fuentes-Carreón por su revisión del Abstract, a la M. en C. María F. Martínez-Velarde por sus continuas charlas en torno al tema, y a la Dra. Alicia Negrón por su constante asesoría.

## REFERENCIAS

- A'Hearn, M. F., Belton, M. J. S., Delamere, W. A., Kissel, J., Klaasen, K. P., McFadden, L. A., Meech, K. J., Melosh, H. J., Schultz, P. H., Sunshine, J. M., Thomas, P. C., Veveřka, J., Yeomans, D. K., Baca, M. W., Busko, I., Crockett, C. J., Collins, S. M., Desnoyer, M., Eberhardt, C. A., ... White, R. L. (2005). Deep Impact: Excavating Comet Tempel 1. *Science*, 310(5746), 258–264. <https://doi.org/10.1126/science.1118923>
- Altwegg, K., Balsiger, H., Bar-Nun, A., Berthelier, J. J., Bieler, A., Bochslers, P., Briois, C., Calmonte, U., Combi, M., De Keyser, J., Eberhardt, P., Fiethe, B., Fuselier, S., Gasc, S., Gombosi, T. I., Hansen, K. C., Hässig, M., Jäckel, A., Kopp, E., ... Würz, P. (2015). 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science*, 347(6220), 1261952. <https://doi.org/10.1126/science.1261952>
- Aparicio-Sedano, H. R. (2015). Análisis de la controversia novohispana sobre el cometa de 1680-1681. Una aproximación histórica desde el campo científico. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.
- Barucci, M. A., y Fulchignoni, M. (2017). Major achievements of the Rosetta mission in connection with the origin of the solar system. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 25(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s00159-017-0103-8>
- Bauer, R. (2009). Los grandes cometas de 1680/1681 y la política del saber criollo en la Nueva España y la Nueva Inglaterra. *Revista Iberoamericana*, 75(228), 697–715. <https://doi.org/10.5195/REVIBEROAMER.2009.6603>
- Biermann, L. (1973). Comet Kohoutek. *Nature*, 246(5433), Article 5433. <https://www.nature.com/articles/246400a0.pdf>
- Borovička, J. (2004). Elemental Abundances in Leonid and Perseid Meteoroids. *Earth, Moon, and Planets*, 95(1–4), 245–253. <https://doi.org/10.1007/s11038-005-4340-x>
- Brandt, J. C. (1968). The Physics of Comet Tails. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 6(1), 267–286. <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.06.090168.001411>
- Buratti, B. J., Hicks, M. D., Soderblom, L. A., Britt, D., Oberst, J., y Hillier, J. K. (2004). Deep Space 1 photometry of the nucleus of Comet 19P/Borrelly. *Icarus*, 167(1), 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2003.05.002>
- Combi, M. (2002). Hale-Bopp: What Makes a Big Comet Different? *Coma Dynamics: Observations and Theory*. In H. Boehnhardt, M. Combi, M. R. Kidger, y R. Schulz (Eds.), *Cometary Science after Hale-Bopp* (pp. 73–90). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1086-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1086-2_4)
- Dávila-Martínez, J. F. J. (2012). El gran cometa de 1680 y la polémica de Kino y Sigüenza [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM].
- Ehrenfreund, P., y Charnley, S. B. (2000). Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets, and Meteorites: A Voyage from Dark Clouds to the Early Earth. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 38(1), 427–483. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.38.1.427>
- El-Maarry, M. R., Thomas, N., Gracia-Berná, A., Pajola, M., Lee, J.-C., Massironi, M., Davidsson, B., Marchi, S., Keller, H. U., Hviid, S. F., Besse, S., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., Koschny, D., Rickman, H., Rodrigo, R., A'Hearn, M. F., Auger, A.-T., ... Vincent, J.-B. (2016). Regional surface morphology of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/OSIRIS images: The southern hemisphere. *Astronomy and Astrophysics*, 593, A110. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628634>
- Emiliani, C. (1992). Planet earth: Cosmology, geology, and the evolution of life and environment. Cambridge University Press.
- Erickson, J., y Erickson, J. (2003). Asteroids, comets, and meteorites: Cosmic invaders of the Earth. Facts on file science library.
- ESA. (s/f). Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Rosetta/Comet\\_67P\\_Churyumov-Gerasimenko](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta/Comet_67P_Churyumov-Gerasimenko)
- Flynn, G. J. (2008). Physical, Chemical, and Mineralogical Properties of Comet 81P/Wild 2 Particles Collected by Stardust. *Earth, Moon, and Planets*, 102(1–4), 447–459. <https://doi.org/10.1007/s11038-007-9214-y>
- Gary, G. A. (1975). Comet Kohoutek: A Workshop Held at Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama, June 13-14, 1974 : [papers]. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration.
- Gauger-Quiroz, J. M. (2015). Autoridad Jesuita y saber universal: La polémica comentaria entre Carlos de Sigüenza y Góngora y Eusebio Francisco Kino. IDEAS/IGAS.
- Goesmann, F., Rosenbauer, H., Bredehöft, J. H., Cabane, M., Ehrenfreund, P., Gautier, T., Giri, C., Krüger, H., Le Roy, L., MacDermott, A. J., McKenna-Lawlor, S., Meierhenrich, U. J., Caro, G. M. M., Raulin, F., Roll, R., Steele, A., Steining, H., Sternberg, R., Szopa, C., ... Ulamec, S. (2015). Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry. *Science*, 349(6247), aab0689. <https://doi.org/10.1126/science.aab0689>
- Gulyaev, R. A. (2015). Type I cometary tails and the solar wind at the epoch of the Maunder minimum. *Astronomy Reports*, 59(8), 791–794. <https://doi.org/10.1134/S106377291508003X>
- Hughes, D. W. (1988). The Principia and comets. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 42(1), 53–74. <https://doi.org/10.1098/rsnr.1988.0007>
- Iriarte Aguirrezabal, J., y Churrua, J. de. (1996). La canción del Cometa de 1577. Universidad de Deusto.
- Jenniskens, P. (2007). Meteor showers and their parent comets (pp. 56–62). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007pimo.conf...56J>
- Jenniskens, P., Popova, O. P., Glazachev, D. O., Podobnaya, E. D., y Kartashova, A. P. (2019). Tunguska eyewitness accounts, injuries, and casualties. *Icarus*, 327, 4–18. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.01.001>
- Killen, R. M., y Hahn, J. M. (2015). Impact vaporization as a possible source of Mercury's calcium exosphere. *Icarus*, 250, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.11.035>
- Kino E.F. (1681). Exposicion astronomica de el cometa: Que el año de 1680. Por los meses de noviembre, y diciembre, y este año de 1681. Por los meses de enero y febrero, se ha visto en todo el mundo, y le ha observado en la ciudad de Cadiz.
- Kresak, L. (1978). The Tunguska Object: A Fragment of Comet Encke? *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 29, 129.
- Lee, S., Wein, L., Buscema, S., Janson, K., Wein, G., Costanza, J., y Thomas, R. (1974). The Defenders vs. Magneto and his

- Brotherhood of Evil Mutants: Vol. 1 #15. Marvel Comics Group.
- Lellouch, E., Paubert, G., Moreno, R., Festou, M. C., Bézard, B., Bockelée-Morvan, D., Colom, P., Crovisier, J., Encrenaz, T., Gautier, D., Marten, A., Despois, D., Strobel, D. F., y Sievers, A. (1995). Chemical and thermal response of Jupiter's atmosphere following the impact of comet Shoemaker-Levy 9. *Nature*, 373(6515), Article 6515. <https://doi.org/10.1038/373592a0>
- Levison, H. F. (1996). Comet taxonomy. In *Completing the Inventory of the Solar System* (Vol. 107, pp. 173-191).
- Longo, G. (2007). The Tunguska Event. In P. T. Bobrowsky y H. Rickman (Eds.), *Comet/Asteroid Impacts and Human Society: An Interdisciplinary Approach* (pp. 303-330). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-32711-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32711-0_18)
- Lusher, R. (2011). Comet culture. *Astronomy y Geophysics*, 52(5), 5.16-5.17. <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2011.52516.x>
- Vicent, J., Martínez, M., Joan, A., Marco, E., & Galadí-Enríquez, D. (2005). *Astronomía Fundamental*. Publicaciones de la Universidad de Valencia.
- McFadden, L.-A., y Britt, D. T. (2003). Primitive Solar System Objects: Asteroids and Comets. In *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (pp. 73-85). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00031-4>
- Mossotti, O. F. (1826). On the Variation in the Mean Motion of the Comet of Encke, produced by the resistance of an ether. *Memoirs of the Royal Astronomical Society*, 2, 55.
- Nordholt, J. E., Reisenfeld, D. B., Wiens, R. C., Gary, S. P., Crary, S. P., Delapp, D. M., Elphic, R. C., Funsten, H. O., Hanley, J. J., Lawrence, D. J., McComas, D. J., Shappirio, M., Steinberg, J. T., Wang, J., y Young, D. T. (2003). Deep Space 1 encounter with Comet 19P/Borrelly: Ion composition measurements by the PEPE mass spectrometer. *Geophysical Research Letters*, 30(9), 1465. <https://doi.org/10.1029/2002GL016840>
- Odell, C. R. (1976). Physical processes in Comet Kohoutek. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 88, 342. <https://doi.org/10.1086/129954>
- Olano, C. A. (2021). Influencias astronómicas sobre la evolución geológica y biológica de la Tierra (parte I). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2107.04719>
- Sabines, J., y Flores Liera, G. (2012). *Antología poética (4a ed)*. Fondo de Cultura Económica.
- Sáenz, O. (1986). José Guadalupe Posada entre cometas y terremotos. *Anales Del Instituto de Investigaciones Estéticas*, 14(56), 205. <https://doi.org/10.22201/iiie.18703062e.1986.56.1303>
- Sagan, C., y Druyan, A. (1997). *Comet (1st Ballantine books ed)*. Ballantine Books.
- Sandford, S. A., Aléon, J., Alexander, C. M. O., Araki, T., Bajt, S., Baratta, G. A., Borg, J., Bradley, J. P., Brownlee, D. E., Brucato, J. R., Burchell, M. J., Busemann, H., Butterworth, A., Clemett, S. J., Cody, G., Colangeli, L., Cooper, G., D'Hendecourt, L., Djouadi, Z., Zolensky, M. E. (2006). Organics Captured from Comet 81P/Wild 2 by the Stardust Spacecraft. *Science*, 314(5806), 1720-1724. <https://doi.org/10.1126/science.1135841>
- Schechner, S. J. (1999). *Comets, popular culture, and the birth of modern cosmology* (3. print. and 1. paperback print). Princeton University Press.
- Schultz, P. H., Hermalyn, B., y Veverka, J. (2013). The Deep Impact crater on 9P/Tempel-1 from Stardust-NExT. *Icarus*, 222(2), 502-515. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.06.018>
- Seargent, D. A. J. (2008). The Greatest Comets from A.D. 1000 to 1800. In D. A. J. Seargent, *The Greatest Comets in History* (pp. 91-124). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-09513-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-0-387-09513-4_4)
- Seargent, D. A. J. (2009). *The Greatest Comets in History: Broom Stars and Celestial Scimitars*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09513-4>
- Sekanina, Z. (1991). Encke, the comet. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 85, 324-376.
- Shapley, H. (1930). *Flights from chaos; a survey of material systems from atoms to galaxies, adapted from lectures at the College of the city of New York, Class of 1872 foundation*. In New York. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1930fcsm.book.....S>
- Sigüenza y Góngora, C. de. (1681). *Manifiesto filosófico contra los cometas despojados del imperio que tenían sobre los tímidos*. <https://www.revistadeluniversidad.mx/download/453be1d6-612d-49d0-b050-efb559726e39?filename=manifiesto-filosofico-contra-los-cometas-despojados-del-imperio-que-tenian-sobre-los-timidos>
- Soderblom, L. A., Becker, T. L., Bennett, G., Boice, D. C., Britt, D. T., Brown, R. H., Buratti, B. J., Isbell, C., Giese, B., Hare, T., Hicks, M. D., Howington-Kraus, E., Kirk, R. L., Lee, M., Nelson, R. M., Oberst, J., Owen, T. C., Rayman, M. D., Sandel, B. R., ... Yelle, R. V. (2002). Observations of Comet 19P/Borrelly by the Miniature Integrated Camera and Spectrometer Aboard Deep Space 1. *Science*, 296(5570), 1087-1091. <https://doi.org/10.1126/science.1069527>
- Spohn, T., Breuer, D., y Johnson, T. V. (Eds.). (2014). *Encyclopedia of the solar system* (Third edition). Elsevier.
- Tsou, P., Brownlee, D. E., Anderson, J. D., Bhaskaran, S., Chevront, A. R., Clark, B. C., Duxbury, T., Economou, T., Green, S. F., Hanner, M. S., Hörz, F., Kissel, J., McDonnell, J. A. M., Newburn, R. L., Ryan, R. E., Sandford, S. A., Sekanina, Z., Tuzzolino, A. J., Vellinga, J. M., y Zolensky, M. E. (2004). Stardust encounters comet 81P/Wild 2. *Journal of Geophysical Research*, 109(E12), E12S01. <https://doi.org/10.1029/2004JE002317>
- Voelzke, M. R. (2006). Disconnection Events Processes in Cometary Tails. *Earth, Moon, and Planets*, 97(3-4), 399-409. <https://doi.org/10.1007/s11038-006-9073-y>
- Weaver, H. A., A'Hearn, M. F., Arpigny, C., Boice, D. C., Feldman, P. D., Larson, S. M., Lamy, P., Levy, D. H., Marsden, B. G., Meech, K. J., Noll, K. S., Scotti, J. V., Sekanina, Z., Shoemaker, C. S., Shoemaker, E. M., Smith, T. E., Stern, S. A., Storrs, A. D., Trauger, J. T., ... Zellner, B. (1995). The Hubble Space Telescope (HST) Observing Campaign on Comet Shoemaker-Levy 9. *Science*, 267(5202), 1282-1288. <https://doi.org/10.1126/science.7871424>
- Webster, C., Lucotti, C., y miquel, Án. (1988). *De Paracelso a Newton: La magia en la creación de la ciencia moderna*. Fondo de Cultura Económica.
- Wehinger, P. A., Wyckoff, S., Herbig, G. H., Herzberg, G., y Lew, H. (1974). Identification of H<sub>2</sub>O in the Tail of Comet Kohoutek (1973f). *The Astrophysical Journal*, 190, L43. <https://doi.org/10.1086/181500>
- Whipple, F. L. (1950). A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. *The Astrophysical Journal*, 111, 375. <https://doi.org/10.1086/145272>
- Whipple, F. L. (1951). A Comet Model. II. Physical Relations for Comets and Meteors. *The Astrophysical Journal*, 113, 464. <https://doi.org/10.1086/145416>
- Wilkening, L. L., y Matthews, M. S. (1982). *Comets*. University of Arizona Press.
- Zahnle, K., y Low, M.-M. M. (1994). The Collision of Jupiter and Comet Shoemaker-Levy 9. *Icarus*, 108(1), 1-17. <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1038>
- Zakharov, V. V., Rotundi, A., Della Corte, V., Fulle, M., Ivanovski, S. L., Rodionov, A. V., y Bykov, N. Y. (2021). On the similarity of dust flows in the inner coma of comets. *Icarus*, 364, 114476. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114476>

Manuscrito recibido: 27 de marzo de 2023

Manuscrito corregido recibido: 23 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 29 de mayo de 2023

# ESTRUCTURA VERTICAL DE LOS OCEÁNOS: DE LA PRÁCTICA A LA COMPRENSIÓN

Alejandro Estradas-Romero <sup>1\*</sup> y Ana Margarita Hermoso-Salazar <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510. Ciudad de México, México.

\*estradas@ciencias.unam.mx (autor para correspondencia)

## RESUMEN

Los océanos se encuentran estratificados verticalmente debido a diferencias de densidad del agua. Estas diferencias ocurren como resultado de la temperatura y/o la salinidad del agua. Este documento describe cómo representar de manera práctica y sencilla la estratificación y formación de masas de agua en el océano, causadas por las diferencias de densidad. Los experimentos aquí descritos pueden ser realizados en grupos de tres o cuatro personas. El material requerido es simple, de bajo costo y de fácil acceso.

**Palabras clave:** Oceanografía, masas de agua, salinidad, temperatura, densidad, estratificación, mezcla.

## ABSTRACT

*The oceans are vertically stratified due to differences in the water density. These differences occur as a result of water temperature and/or salinity. This document describes how to represent in a practical and simple way, the stratification and formation of water masses in the ocean caused by the differences in water density. The experiments here described can be conducted by groups of three or four people. The required material is simple, inexpensive, and easily accessible.*

**Keywords:** Oceanography, water masses, salinity, temperature, density, stratification, mixing.

## INTRODUCCIÓN

Los océanos se encuentran divididos verticalmente en diferentes zonas y capas debido a las diferencias de densidad, que se presentan como resultado de la temperatura y la salinidad (Pabón *et al.*, 1998). De tal manera que, en relación con la temperatura, siempre tendremos agua menos densa (más caliente y ligera) en la superficie y, por debajo de ella, una capa de mezcla donde se presentan variaciones de temperatura seguida de una zona de transición llamada termoclina, que es el resultado de un fuerte gradiente de temperatura que, junto con la salinidad, gobiernan la densidad del agua de mar (The Open University, 1999). El agua más densa (fría, salada) se encuentra en promedio por debajo de los 2000 m de profundidad (Figura 1). Al estar estratificado el mar durante períodos largos, se pueden afectar los procesos biológicos en la zona costera. La zona de contacto entre dos masas de agua actúa como una barrera física que va a impedir que la capa superior se renueve provocando hipoxia (falta de oxígeno) debido a la respiración, lo que produce la muerte de peces y otros organismos. También puede asociarse una baja densidad en la biomasa del fitoplancton debido a la eliminación del transporte de nutrientes a capas superficiales (Behrenfeld *et al.*, 2006; Doney, 2006).

Una masa de agua se define como un cuerpo de agua con una historia de formación común, que tiene su origen en una región física del océano. Son entidades físicas con un volumen medible y por lo tanto ocupan un cuerpo finito en el océano (Tomczak, 1999).

Existen muchos procesos en el mar controlados por la densidad como, por ejemplo, la formación de masas de agua; su caracterización y seguimiento permite el estudio de la circulación oceánica (circulación termohalina). En su zona de formación, las masas de agua ocupan una región determinada del océano; en otras regiones se localizan varias masas de agua, las cuales se pueden mezclar generando en algunos casos nuevas masas de agua, como, por ejemplo, la capa de la masa de agua denominada Agua Común del Golfo (GCW, por sus siglas en inglés) en el Golfo de México. Esta masa de agua se origina a partir de la mezcla de dos masas de agua, una superficial y otra capa más profunda, la primera llamada Agua Superficial del Caribe (CSW, por sus siglas en inglés) y la segunda Subsuperficial Subtropical del Atlántico Norte (NASUW, por sus siglas en inglés).

Existen dos factores principales que hacen que el agua de los océanos sea más o menos densa: la temperatura del agua y la salinidad del agua. Cuando se incrementa la temperatura el agua se hace más ligera disminuyendo así su densidad y, por el contrario, al disminuir la temperatura el agua aumenta su densidad debido a que la distancia entre sus moléculas se reduce. Con respecto a la salinidad, ésta se va a incrementar con la formación de hielo o cuando la tasa de evaporación es alta (Denny, 2007; Garrison, 2007).

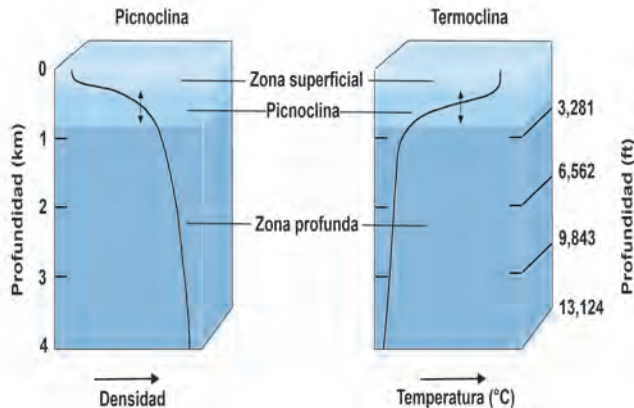


Figura 1. Estructura vertical del océano en función de la profundidad, densidad y temperatura. Modificada de: <https://cmapspublic.ihmc.us/rid=1LHPRFL1Y-1LT98JY-TH4/Estructura%20vertical%20de%20masa%20marina.jpg>.

## METODOLOGÍA

**Actividad 1. Evaluar el efecto de los cambios de la salinidad y la temperatura sobre la densidad y la estratificación de un volumen de agua.**

### Materiales

- 1 pecera rectangular con una placa que lo divida en dos,
- colorantes comestibles o anilina (tres colores diferentes),
- agua,
- hielo,
- sal de grano o de mesa,
- 2 recipientes de 1 litro.

### Instrucciones

#### a) La salinidad como variable

1. Preparar una solución salina saturada y teñida con alguno de los colorantes (p. ej. azul) y depositarla en uno de los compartimentos de la pecera.
2. Teñir agua de la llave con un color diferente (p. ej. naranja) y colocarla en el segundo compartimento de la pecera.
3. Retirar la pared divisoria de la pecera con cuidado y observar lo que ocurre.

#### b) La temperatura como variable

1. Calentar agua (~60 °C), teñirla con alguno de los colorantes (p. ej. naranja) y depositarla en uno de los compartimentos de la pecera. En el segundo compartimento colocar agua fría (agua enfriada previamente con hielo) teñida de algún color diferente (p. ej. azul).
2. Estimar la temperatura con los dedos en cada uno de los compartimentos.
3. Retirar la pared divisoria de pecera con cuidado. Una vez

equilibrada el agua en el tanque, introducir la mano muy lentamente, iniciando con los dedos (para no perturbar el agua), hasta el fondo de la pecera. ¿Se puede sentir el cambio de temperatura entre las dos capas de agua?

### Explicación

En esta actividad, los estudiantes observarán y comprobarán que los fluidos se distribuyen en capas de acuerdo con su densidad (como cuando juntamos agua con aceite). Cuando se retira la barrera divisoria de la pecera que contiene las dos “masas de agua”, la más densa (salada o fría, azul) se hunde al fondo del tanque y el agua menos densa (dulce o caliente, naranja) se mantiene en la capa superior, formando una columna estratificada (Figura 2).

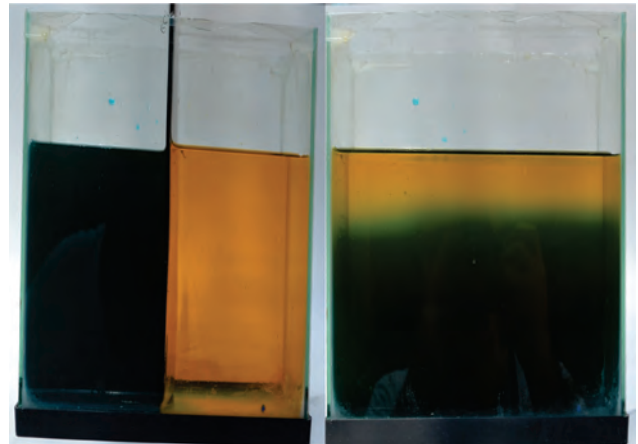


Figura 2. La fotografía de la izquierda muestra la pecera antes de retirar la división: los dos cuerpos de agua tienen diferentes densidades. La fotografía derecha muestra el resultado de retirar la división: el agua más densa (color azul) se va al fondo y la menos densa queda en la superficie. La zona de color verde representa la pycnoclina.

**Actividad 2. Evaluar los efectos de la estratificación sobre la mezcla.**

### Materiales

- 1 pecera rectangular con agua de la llave,
- 1 pecera rectangular que contenga un fluido estratificado,
- secadora de cabello,
- colorantes comestibles o anilina (dos colores diferentes, por ejemplo rojo y azul),
- pipetas largas o goteros,

### Instrucciones

1. Antes de empezar, responder la siguiente pregunta ¿En cuál de las dos peceras el colorante puesto en la superficie se mezclará más fácilmente?
2. En la pecera no estratificada agregar, con cuidado, unas cuantas gotas de colorante en la superficie del agua.
3. Con la secadora de cabello generar una corriente superficial cuidando que fluya únicamente cerca de la superficie y observar cómo se mezcla el colorante.
4. Preparar una pecera con fluido estratificado. Para preparar la pecera estratificada, verter una solución fuertemente salina hasta la mitad del tanque. Con mucho cuidado, verter agua caliente sobre la capa salina sin provocar turbulencia para evitar que haya mezcla entre las dos capas.
5. Con la pecera estratificada, agregar con cuidado unas cuantas gotas de uno de los colorantes en la superficie del estrato



superior y, por medio de una pipeta o gotero largo, también agregar unas cuantas gotas de un colorante diferente en la parte superficial del estrato inferior.

6. Repetir el paso 3.
7. Comparar los resultados de las dos peceras.

### Explicación

Al realizar este experimento, los estudiantes observarán que el colorante que se añade al agua de la pecera no estratificada se hunde porque es ligeramente más denso que el agua (Figura 3). Cuando se expone la superficie del agua a la fricción creada por la secadora de cabello por corto tiempo, el colorante se mezcla a través de la columna de agua (Figura 3), mientras que, en la pecera estratificada, la pycnoclina formará una barrera que va a impedir la mezcla (Figura 4). Al aplicar fricción en la superficie en ambas peceras, no va a ser suficiente para mezclar la columna entera (se requerirá más energía para mezclar las dos capas), por lo que el colorante rojo sólo se mezclará en la capa superior del agua: esto es similar a la capa de mezcla superficial en los océanos (Figura 4). Los resultados observados en el experimento serían equivalentes a los que se producen cuando se prepara un aderezo a la vinagreta que se utiliza en las ensaladas, donde el vinagre y el aceite tienen diferentes densidades y para mezclar ambas sustancias hay que agitarlas.

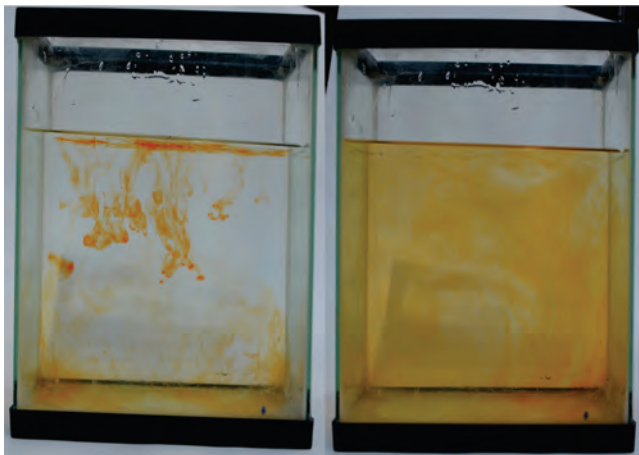


Figura 3. Pecera con la columna de agua no estratificada. La fotografía izquierda muestra el estado antes de aplicar fricción en la superficie del agua con la secadora de pelo; la fotografía de la derecha, después de aplicar la fricción, lo que genera la mezcla en la columna de agua.

## PROPUESTA PEDAGÓGICA

Esta actividad puede ser adaptada según el nivel académico al que sea dirigido (secundaria, preparatoria o licenciatura) con los cambios apropiados en el contenido del contexto teórico-práctico y las discusiones en clase. Este experimento está diseñado para realizarse en una hora de clase, tiempo suficiente para que los alumnos desarrollen las actividades indicadas en esta práctica. Se sugiere que durante los primeros 40 minutos se realice la parte experimental y el tiempo restante se dedique a la discusión de los resultados.

Puede ser realizada en grupos de tres o cuatro personas, ya que el material que se utiliza es simple, de bajo costo y de fácil acceso.

Al final de la clase teórico-práctica, se puede proponer de tarea contestar las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo podrían los efectos del cambio climático, tales como el calentamiento y la fusión del hielo marino, afectar a la estructura vertical de la columna de agua? Discutir y predecir algunos efectos potenciales sobre la estratificación y mezcla en los océanos.
2. ¿Cuáles podrían ser las consecuencias para los organismos marinos?

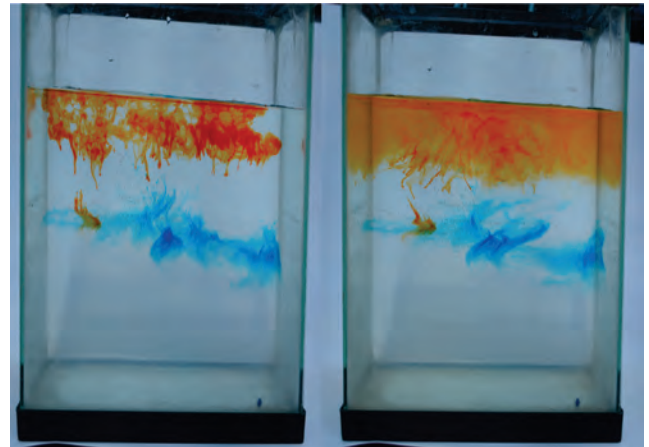


Figura 4. Pecera con el agua estratificada en dos capas. En la fotografía de la izquierda se muestran los dos colorantes antes de aplicar la fricción en la superficie. En la fotografía derecha, sólo la capa superficial se mezcla con la fricción en la superficie. Se requiere de más fuerza en la superficie para poder mezclar las dos capas.

## CONCLUSIÓN

Con los cambios apropiados incluidos en esta propuesta, los alumnos, ya sean de secundaria, preparatoria o universidad, comprenderán y visualizarán de manera práctica los factores que controlan la estratificación vertical de los océanos y entenderán los principales procesos físicos que experimentan las masas de agua. Los estudiantes comprobarán la distribución de los fluidos en capas debido a su densidad. En el primer experimento, los estudiantes detectarán la separación de las dos masas de agua con diferentes temperaturas o salinidades: la más pesada o densa se irá al fondo de la pecera mientras que la menos pesada o densa se situará por encima de la anterior formando una columna de agua estratificada. En el segundo y tercer experimento, cuando se añade un colorante al agua, los estudiantes observarán que éste se hunde por ser ligeramente más denso que el agua; al aplicar fricción con el aire de la secadora sobre la superficie del agua se detectará el proceso de mezcla.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a C. Illescas-Monterroso del Laboratorio de Ecología Bentónica de la Universidad Nacional Autónoma de México por darnos la facilidad de utilizar el laboratorio y el material para realizar los experimentos propuestos. Así mismo, a los revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias que mejoraron su contenido.

## GLOSARIO

**Biomasa.** Cantidad total de materia viva presente en una comunidad o ecosistema.

**Circulación termohalina.** Circulación oceánica global generada por diferencias en la densidad del agua en los océanos debido a variaciones de temperatura (termo) o salinidad (halina).

**Densidad.** Cantidad de materia que hay en un determinado espacio. Se define como la cantidad de masa de una sustancia por unidad de volumen.

**Fitoplancton.** Seres vivos de origen vegetal que viven flotando en la columna de agua, y cuya capacidad natatoria no logra nunca superar la inercia de las mareas, las olas o las corrientes. Son organismos autótrofos capaces de realizar la fotosíntesis. Su importancia es fundamental dado que son los productores primarios más importantes en el océano.

**Hipoxia.** Un estado de deficiencia de oxígeno en el agua de mar.

**Picnoclina.** Capa de agua en la que se evidencia un cambio brusco en su densidad vinculado con la profundidad; puede ser causado tanto por cambios en la temperatura como por cambios en la salinidad del agua.

**Termoclina.** Capa o rango de profundidad en el que la temperatura del agua disminuye muy rápidamente a medida que descendemos.

## REFERENCIAS

- Behrenfeld, M.J., OíMalley, R., Siegel, D., McClain, C. Sarmiento, J., Feldman, G., Milligan, A., Falkowski, P., Letelier, R. y Boss, E. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444, 752–755.  
<https://doi.org/10.1038/nature05317>
- Denny, M. (2007). *How the Ocean Works: An Introduction to Oceanography*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 344 pp
- Doney, S. (2006). Plankton in a warmer world. *Nature*, 444, 695–696.  
<https://doi.org/10.1038/444695a>
- Garrison, T.S. (2007). *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. Sixth edition. Thomson Brooks/Cole, 608 pp.
- Pabón Caicedo, J.D., Rojas, P.J., Montealegre Bocanegra, J.E., Robertson, K., Ceballos Lievano, J.L., Martínez Ardila, N.J., y Ñañez, E. (1998). *El océano*.
- The Open University. (1999). Waves. In *Open University Oceanography* (Eds.) Waves, Tides and Shallow-Water Processes, Chapter 1 Waves. Butterworth-Heinemann. Oxford.  
<https://doi.org/10.1016/B978-008036372-1/50002-7>
- Tomczak M. (1999). Some historical, theoretical, and applied aspects of quantitative water mass analysis. *Journal of Marine Research*, 57 (2): 275–303.

Manuscrito recibido: 15 de marzo de 2023

Manuscrito corregido recibido: 15 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2023

# DETECCIÓN DE LAS FRECUENCIAS DEL LÉXICO DE UN TEXTO CIENTÍFICO CON LA APLICACIÓN WEB LEX-A PARA APOYAR EL APRENDIZAJE DE LENGUAS EXTRANJERAS

Yadira A. Hernández-Pérez <sup>1\*</sup>, Susana A. Alaniz-Álvarez <sup>2</sup>, Julio C. Martínez-Troncoso <sup>3</sup>, Michelangelo Martini <sup>4</sup> y Ana D. Esparza-Herrera <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Escuela Nacional Preparatoria, Plantel 5, Universidad Nacional Autónoma de México, Calz. Del Hueso 729, Coapa, Ex Hacienda Coapa, Tlalpan, C.P. 14300, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Centro de Geociencias, Campus Juriquilla Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, C.P. 76230, Querétaro, Querétaro.

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

<sup>4</sup> Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510 Ciudad de México, México.

<sup>5</sup> Escuela Nacional Preparatoria, Plantel 3, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Ing. Eduardo Molina No. 1577, Delegación Gustavo A. Madero, C.P. 07469, Ciudad de México, México.

\*[yadira.hernandez@enp.unam.mx](mailto:yadira.hernandez@enp.unam.mx) (autora para correspondencia)

## RESUMEN

Se presenta una lista de vocabulario italiano-español con las palabras más recurrentes en un texto de divulgación científica de Ciencias de la Tierra escrito en la lengua extranjera. La lista se creó a partir de los resultados arrojados por el analizador léxico LEX-A (Martínez y Hernández, 2020), que es una aplicación web en construcción. Se aborda la creación del listado en tres etapas, así como el tratamiento de la aplicación piloto con un grupo de estudiantes de italiano como lengua extranjera con nivel A1. La versión final de la lista de vocabulario fue validada por un geocientífico nativo hablante del italiano. La lista fue creada como herramienta para facilitar la comprensión de lectura del texto base usado en un taller de Ciencias de la Tierra dirigido a docentes y estudiantes de diferentes áreas de conocimiento con nivel A1 de italiano.

**Palabras clave:** Ciencias de la Tierra, italiano, divulgación científica, comprensión de lectura, vocabulario, aplicación web.

## ABSTRACT

*A list of Italian-Spanish vocabulary is presented with the most recurrent lexical items (words) in a science dissemination text written on Earth Sciences in a foreign language. The list was created on the basis of the results of the LEX-A lexical analyzer (Martínez and Hernández, 2020), which is the web app under construction. The creation of the list is addressed in three stages, as well as the pilot application treatment with a group of students of Italian as a foreign language with A1 level. The final version of the vocabulary list was validated by a native Italian-speaking geoscientist. The list was created as a tool to facilitate the reading comprehension of the basic text used in an elementary Earth Sciences course aimed at teachers and students from different areas of knowledge, with A1 level of Italian.*

**Keywords:** Earth Sciences, Italian, science dissemination, reading comprehension, vocabulary, web app

## INTRODUCCIÓN

La lengua siempre ha acompañado al conocimiento científico, ya sea para plantearlo, para cuestionarlo, para comunicarlo o para preservarlo. Lengua y ciencia son inseparables.

En el caso de un texto de ciencia escrito en una lengua extranjera, conocer su léxico (entendido el léxico como el acervo de palabras que lo conforman) agiliza los procesos de comprensión de lectura. En principio, se asume que el lector ya conoce el tema de ciencia por instrucción formal en su lengua nativa, de modo que el texto plantea la posibilidad de que el lector recicle<sup>1</sup> conocimientos científicos mientras se enfoca en el aprendizaje de la ciencia en una lengua distinta a la suya.

La construcción de listas de palabras ha sido cuestionada en múltiples ocasiones dentro del campo de la enseñanza de lenguas extranjeras debido a que, en múltiples ocasiones, su uso se ha limitado a resolver superficial y momentáneamente problemas de desconocimiento léxico. Tal es el caso de las listas de vocabulario que acompañan a un texto, o la inserción de ligas intratextuales que conducen al significado de una palabra.

Por el contrario, la introducción de listas de vocabulario para apoyar la comprensión de textos dentro de un curso de enseñanza de lengua extranjera cobra relevancia cuando se acompaña de actividades complementarias para el aprendizaje de ese léxico en contexto (Schmidt, 1990; Laufer y Hustijn, 2001; Hustijn y Laufer, 2001; Kim, 2008; Rott, 2012). En este marco, una lista de palabras puede apoyar los procesos de inferencia (deducción razonada) que se promueven durante la lectura (Hughes, 2023). Este es el caso del curso de introducción al italiano para estudiantes mexicanos por medio del estudio de experimentos de Galileo. La experiencia se reporta en este mismo número de la Revista ECG.

La construcción de listas de vocabulario que serán objeto de aprendizaje se lleva a cabo mediante el análisis léxico del texto base, dicho análisis solía hacerse manualmente. En la actualidad existen programas de cómputo que lo realizan en segundos y arrojan resultados precisos. Uno de los ejemplos más completos de analizador léxico digital es el *Compleat Lexical Tutor* de Tom Cobb (1997).

El *Compleat Lexical Tutor* es un software de procesamiento de datos que ofrece una serie de opciones al estudiante de vocabulario de inglés y francés. Las herramientas permiten evaluar el conocimiento léxico, leer y escuchar vocabulario en contexto, determinar el tamaño y profundidad del léxico mental en estado pasivo con el fin de convertirlo en activo, así como medir la presencia y corrección de la información gramatical de las piezas léxicas y de grupos de palabras, entre otros. La asunción teórica sobre la que se diseñó el *Lex Tutor*, como se le conoce comúnmente, es que el lector que sabe al menos las 200 palabras más frecuentes de una lengua, sumadas a las 570 piezas léxicas más comunes del discurso académico (según la *Academic Word List*, AWL), puede comprender cualquier texto académico (cf. Morris y Cobb, 2004).

<sup>1</sup> Debe hacerse referencia al modelo pedagógico de la Teoría del Cambio Conceptual (Chi, 2008; Carey, 2011) que propone la existencia de interacción entre los conocimientos previos y los nuevos siempre que inicia el aprendizaje. Tal interacción sucede a través de dos procesos de construcción: asimilación (que es una adaptación del proceso piagetiano del mismo nombre), y acomodación o reestructuración.

<sup>2</sup> *Backend* es el código de programación que opera del lado del servidor incluyendo las funciones CRUD, la base de datos y la lógica del servidor.

<sup>3</sup> *Frontend* se refiere a la parte de un sitio web que interactúa directamente con el usuario.

## LEX-A

En el presente estudio se implementó el analizador léxico LEX-A (Martínez y Hernández, 2020). Esta aplicación web usa *Python* como lenguaje primario de programación, los módulos científicos *Pandas* y *Matplotlib* para el *backend*<sup>2</sup> y *Flask* para el *frontend*<sup>3</sup>, todos son de código abierto. A fin de que LEX-A sea capaz de manejar grandes volúmenes de texto en tiempo real, se eligió un marco ligero como lo es *Flask*, para asegurar rapidez y eficacia. El código se almacena en un repositorio privado, lo que permite rastrear los cambios con el transcurso del tiempo (Figura 1). La combinación de estas tecnologías dió como resultado una poderosa aplicación web para el análisis léxico a partir de textos auténticos. Nuestra *app* es accesible, confiable, eficiente y escalable, lo que hace posible obtener datos a partir de un texto a fin de apoyar una amplia variedad de propósitos académicos y de investigación.

LEX-A permite obtener resultados de análisis léxico de textos de hasta 50 cuartillas de longitud en formatos de archivos como: .docx, .pdf y .txt. A la fecha, LEX-A realiza el procesamiento detallado del texto y arroja los resultados en cuatro formas de organización distintas: número de frecuencia, conteo de todas las palabras del texto, conteo de palabras que excluye las palabras repetidas, lista de frecuencia de ocurrencias (ascendente o descendente), análisis léxico descartando todas las palabras de función (artículos, preposiciones, pronombres, verbos auxiliares) y gráficas con las ocho palabras más frecuentes en el texto.

LEX-A realiza las mismas tareas en alemán, español, francés, inglés, italiano y purépecha. Los resultados pueden servir de punto de partida para la construcción de corpus léxicos y glosarios y para realizar el análisis de extensión y profundidad léxicos de un texto. Estos recursos han sido reconocidos por su pertinencia para promover el aprendizaje de vocabulario así como el diseño de materiales y de instrumentos para la evaluación del conocimiento léxico. Para mostrar el uso de LEX-A como auxiliar en la enseñanza de una lengua extranjera, se hizo el análisis léxico del texto *La pressione atmosferica e la caduta dei corpi* (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2017) de la colección *Esperimenti semplici per capire una Terra complessa*.

En primera instancia, se construyó un listado con todas las palabras del texto. El proceso comprendió los siguientes pasos:

- Análisis léxico del texto por medio de LEX-A.
- Exportación de la lista a una base de datos tipo Excel.
- Integración de la información semántica y categoría gramatical.
- Clasificación de las piezas léxicas de acuerdo con su categoría gramatical conservando el orden de frecuencia.



Figura 1. Página de acceso de la aplicación web LEX-A en: <http://cuatromiradas.herokuapp.com>

## ANÁLISIS LÉXICO DE UN TEXTO MEDIANTE LEX-A

Una vez seleccionado el texto a analizar, el primer paso consistió en pegarlo en la ventana que aparece en la primera pantalla. Para este estudio se usó el listado por orden de frecuencia descendente, esto es, de la palabra que aparece más frecuentemente en el texto a la que menos. Este orden de frecuencia permitió:

- Enlistar las piezas léxicas de función (artículos, pronombres, preposiciones, conjunciones, verbos copulativos y verbos auxiliares) que normalmente constituyen el mayor porcentaje de palabras en un texto. La jerarquización por frecuencia de todas estas piezas del corpus obedece a que se concentrará el aprendizaje en los vocablos más comunes de cada categoría.
- Recabar en los últimos lugares las piezas léxicas cuyos significados tengan la menor aportación a la comprensión del texto.
- Asegurar que todas las piezas léxicas que formen parte del texto estén incluidas en el corpus.
- Conocer la frecuencia con que cada palabra aparece en el texto, ya que ésta se asoció con su aportación a nivel conceptual para la comprensión.

### Selección de las piezas léxicas

Se contabilizaron 4704 palabras que corresponden a 1272 piezas léxicas diferentes (Tabla 1) del libro *La pressione atmosferica e la caduta dei corpi* (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2017).

El siguiente paso fue agruparlas por su categoría gramatical conservando el orden de frecuencia. La lista consta de 103 sustantivos de los cuales 9 corresponden a unidades de medida, 3 nombres propios, 57 a verbos, 43 a adjetivos, 25 a preposiciones, 18 a adverbios, 10 a conjunciones y 4 a pronombres. A cada sustantivo se le agregó la forma plural entre paréntesis (Tabla 2). Se insertó una columna con todos los significados en español, otra con significados alternativos posibles (cuando los hubiera) y, una más con el género de cada sustantivo (Tabla 3).

Este listado se sometió al escrutinio de un especialista en el área, nativo hablante del italiano.

## IMPLEMENTACIÓN DE LEX-A

### Prueba piloto

Esta primera versión se puso a prueba con un grupo de 6 estudiantes del sexto grado de bachillerato con nivel A1+ en italiano, según el Marco Común Europeo de Referencia para las lenguas. El procedimiento llevó a cabo las siguientes acciones:

- Presentación del texto base al grupo. Fase de prelectura: los estudiantes revisaron el texto a nivel de percepción visual para identificar elementos gráficos y tipográficos que orientaran sus inferencias acerca del tema general.
- Reconocimiento de la idea principal. Fase de prelectura: los estudiantes leyeron superficialmente el texto para ubicar las palabras de contenido (sustantivos, verbos, adjetivos y adverbios) que aparecían con mayor frecuencia. A partir de esa información y la obtenida de las imágenes, títulos y subtítulos, se realizó una lluvia de ideas hasta establecer cuál era la idea principal.
- Detección de problemas en la comprensión del texto por desconocimiento léxico. Fase de lectura: 1ª lectura. Los estudiantes leyeron el texto resaltando con color las oraciones que no pudieron entender ya fuera parcial o totalmente. Siempre que fue posible,

usaron un color distinto para señalar las palabras que impedían o nublaban la comprensión.

- Presentación del listado (1ª versión). Los estudiantes recibieron el listado con las siguientes indicaciones: observar su estructura, leerlo completo con atención, subrayar las palabras que habían encontrado en el texto y que impedían la comprensión de algún fragmento.
- Aplicación a la lectura. Los estudiantes volvieron a leer el texto completo, en esta ocasión consultando el listado cada vez que encontraban una oración o palabra de las que habían marcado anteriormente. A fin de promover una mayor profundidad en el procesamiento, se les indicó no escribir los significados en el texto.
- Evaluación de la comprensión del texto. Se solicitó a los estudiantes que elaboraran 10 preguntas sobre el texto que involucraran las palabras que habían marcado en el segundo paso, sin tener la lista a la mano. Al terminar, se intercambiaron los cuestionarios para que los resolvieran. Concluido el trabajo, se requirió a los estudiantes que compartieran la mayor información que les fuera posible recordar sobre el texto en equipos de tres personas. Se observó que los estudiantes habían comprendido el texto completo.
- Retroalimentación. Los estudiantes señalaron aquellas palabras que les resultaron más útiles para la comprensión del texto y escribieron un párrafo corto con sus sugerencias.

A partir de los resultados obtenidos de la aplicación piloto, se elaboró la versión actual del listado, la cual consta de 126 piezas léxicas. Las acciones incluyeron: eliminar 51 sustantivos, 3 nombres propios, 35 verbos, 7 unidades de medida, 37 adjetivos y 10 adverbios. Se excluyeron los datos relativos a la frecuencia. Se conservó la clasificación por categorías gramaticales a fin de promover la atención sobre la sintaxis de la lengua italiana y se ordenaron alfabéticamente las piezas de cada categoría. Asimismo, se mantuvieron las formas del plural y los significados de todas las piezas léxicas (Tabla 3). El listado actual se conforma de los contenidos de la Tabla 1 y Figura 2, el formato se modificó para facilitar la búsqueda.



The screenshot shows the application interface with the title 'LESSICO - VOCABOLARIO' and the book title 'La pressione atmosferica e la caduta dei corpi'. Below the title, it lists 'SOSTANTIVI - SUSTANTIVOS' and provides a two-column list of Italian words and their Spanish equivalents. The words are listed in a table format with alternating light green and white rows.

SOSTANTIVI - SUSTANTIVOS	
tempo (pl. tempi)	tiempo (pl. tiempos), clima (pl. climas)
pressione (pl. pressioni)	presión (pl. presiones)
aria (pl. arie)	aire (pl. aires)
palloncino (pl. palloncini)	globo (pl. globos)
terra (pl. terre)	tierra (pl. tierras)
bicchiere (pl. bicchieri)	vaso (pl. vasos)
oggetto (pl. oggetti)	objeto (pl. objetos)
bottiglia (pl. bottiglie)	botella (pl. botellas)
contagocce (pl. contagocce)	gotero (pl. goteros)
gravità (pl. gravità)	gravedad (pl. gravedades)
corpo (pl. corpi)	cuerpo (pl. cuerpos)
massa (pl. masse)	masa (pl. masas)
successo (pl. successi)	éxito (pl. éxitos)
candela (pl. candele)	vela (pl. velas)
legge (pl. leggi)	ley (pl. leyes)
svolgimento (pl. svolgimenti)	ejecución (pl. ejecuciones)
velocità (pl. velocità)	velocidad (pl. velocidades)
vita (pl. vite)	vida (pl. vidas)
spazio (pl. spazi)	espacio (pl. espacios)
barattolo (pl. barattoli)	frasco (pl. frascos)
carta (pl. carte)	papel (pl. papeles)
densità (pl. densità)	densidad (pl. densidades)
foglio (pl. fogli)	hoja (pl. hojas)
livello (pl. livelli)	nivel (pl. niveles)
moto (pl. moti)	moto (pl. motos), movimiento (pl. movimientos)
natura (pl. nature)	naturaleza (pl. naturalezas)
pavimento (pl. pavimenti)	piso (pl. pisos)
estratto (pl. estratti)	capa (pl. capas), estrato (pl. estratos)
volta (pl. volte)	vez (pl. veces)
cannuccia (pl. cannucce)	popote (pl. popotes)
gravitazione (pl. gravitazioni)	gravitación (pl. gravitaciones)
misura (pl. misure)	medida (pl. medidas)
biglia (pl. biglie)	canica (pl. canicas)

Figura 2. Fragmento de la Tabla 3. Consulta la [Tabla completa](#).

## APLICACIÓN DE LEX-A EN EL TALLER DE ITALIANO CON EXPERIMENTOS DE GALILEO

Se presenta aquí el caso de aplicación en el "Taller de introducción al italiano a través de los experimentos de Galileo" ofrecido a estudiantes mexicanos que están aprendiendo italiano, en donde se usa como texto base *La pressione atmosferica e la caduta dei corpi* (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2017) de la colección *Esperimenti semplici per capire una Terra complessa*. El artículo que reporta esa experiencia se publica en este mismo número con el título 'Acercamiento a la lengua italiana con experimentos de Galileo' (Alaniz-Álvarez, et al. 2023).

### CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el analizador léxico LEX-A, una aplicación web que facilita los procesos de análisis léxico de textos en alemán, francés, inglés, italiano y purépecha.

Se propone el uso de LEX-A como apoyo para la elaboración de material didáctico en un curso de lenguas extranjeras con propósitos académicos. En este texto se presentó un ejemplo de su implementación en un taller de italiano dirigido a estudiantes de bachillerato que aspiran a una licenciatura relacionada con las Ciencias de la Tierra: Geociencias, Geomática, Geología y Ciencias de la Tierra.

Las diferentes experiencias en su implementación aportarán nuevos usos de la aplicación web LEX-A, a fin de tener una herramienta cada vez más útil para el diseño de materiales didácticos para la comprensión de textos, así como para mejorar el aprendizaje de vocabulario en cualquier lengua extranjera.

### AGRADECIMIENTOS

El listado de palabras que se presenta en este artículo es uno de los productos del proyecto 'A las lenguas por la Ciencia', (Centro de Geociencias, CGEO y Escuela Nacional Preparatoria, ENP de la Universidad Nacional Autónoma de México). El proyecto busca impulsar el aprendizaje de las Geociencias desde el nivel de bachillerato mediante cursos de Ciencias de la Tierra en alemán, francés, inglés e italiano. La planeación y diseño de estos cursos demanda la creación de glosarios terminológicos que favorezcan la comprensión de textos del área.

### REFERENCIAS

- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., 2017, *Esperimenti Semplici per Capire una Terra Complessa: 1. La Pressione Atmosferica e la Caduta dei Corpi*, Verónica Nájera Martínez, María Luisa Pedraglio, traductores. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, 26 p., ISBN: 978-607-02-9408-2.
- Alaniz-Álvarez S.A., Martini M. , Esparza A.D., Gutiérrez-Navarro R., Hernández-Pérez Y.A., Mori L. y Nieto-Samaniego A.F. (2023). Acercamiento a la lengua italiana con experimentos de Galileo. *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, vol. 2, núm. 1.
- Carey, S. (2011). Précis of the origin of concepts. *Behavioral and Brain Sciences*, 34(3), 113-124..
- Chi, M. T. (2009). Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In

- International handbook of research on conceptual change (pp. 89-110). Routledge.
- Cobb, T. (1997). Version (8.5). Compleat Lexical Tutor. Retrieved April 9, 2023, from <https://www.lex tutor.ca/>.
- COLMEX. (2023). Diccionario del español de México. DEM. Retrieved April 12, 2023, from <https://dem.colmex.mx/>
- Hughes, L. S. (2019). Contextualized Versus Decontextualized Vocabulary Learning as a Pre-reading Task. Research Gate. Seoul; Korea.
- Hulstijn, J., y Laufer, B. (2001). Some empirical evidence for the Involvement Load Hypothesis in vocabulary acquisition. *Language Learning*, 51(3), 539–558. <https://doi.org/10.1111/0023-8333.00164>
- Kim, Y. (2008). The role of task-induced involvement and learner proficiency in L2 vocabulary acquisition. *Language Learning*, 58, 285–325. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9922.2008.00442.x>
- Laufer, B., y Hulstijn, J. (2001). Incidental vocabulary acquisition in a second language: The construct of task-induced involvement. *Applied Linguistics*, 22(1), 1–26. <https://doi.org/10.1093/applin/22.1.1>
- Martínez, J.C. y Hernández, Y. A. (2020). LEX-A Version (1.3). LEX-A App. Retrieved April 12, 2023. <http://cuatromiradas.herokuapp.com/>.
- Morris, L., y Cobb, T. (2004). Vocabulary profiles as predictors of the academic performance of Teaching English as a Second Language trainees. *System*, 32(1), 75-87.
- (N.d.). Version (Understanding complex systems series). In *Towards a Theoretical Framework for Analyzing Complex Linguistic Networks*. Retrieved May 8, 2023, from [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-47238-5\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-47238-5_3).
- Rott, S. (2012). The effect of task-induced involvement on vocabulary acquisition: An approximate replication of Hulstijn and Laufer (2001). In G. Porte (Ed.), *Replication research in applied linguistics* (pp. 228–267). Cambridge University Press.
- Schmidt, R. (1990). The role of consciousness in second language learning. *Applied Linguistics*, 11(2), 129–158. <https://doi.org/10.1093/applin/11.2.129>
- Trautwein, J. (2019). *The Mental Lexicon. Assessment, size and structure* (dissertation). Retrieved May 8, 2023 NRC-1. *Saline systems*, 2, 1-13.

Manuscrito recibido: 17 de marzo de 2023

Manuscrito corregido recibido: 16 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 24 de mayo de 2023

# ACERCAMIENTO A LA LENGUA ITALIANA CON EXPERIMENTOS DE GALILEO

Susana A. Alaniz-Álvarez <sup>1\*</sup>, Michelangelo Martini <sup>2</sup>, Ana D. Esparza-Herrera <sup>3</sup>, Rodrigo Gutiérrez-Navarro <sup>1</sup>, Yadira A. Hernández-Pérez <sup>4</sup>, Laura Mori <sup>5</sup> y Ángel F. Nieto-Samaniego<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Geociencias, Campus Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, Querétaro, Qro. 76230, México.

<sup>2</sup> Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

<sup>3</sup> Escuela Nacional Preparatoria, Plantel 3, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Ing. Eduardo Molina No. 1577, Delegación Gustavo A. Madero, Ciudad de México, C.P. 07469, México.

<sup>4</sup> Escuela Nacional Preparatoria, Plantel 5, Universidad Nacional Autónoma de México, Calz. Del Hueso 729, Coapa, Ex Hacienda Coapa, Tlalpan, 14300, Ciudad de México, C.P. 14300, México.

<sup>5</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

\*alaniz@geociencias.unam.mx (autora para correspondencia)

## RESUMEN

Se presenta un taller que tiene como propósito enseñar terminología científica en lengua italiana a partir de la realización de experimentos para entender la gravedad, se usan experimentos diseñados por Galileo Galilei. Con el aprendizaje integrado de lenguas y ciencia se impulsa la interdisciplinariedad y la transversalidad en la enseñanza. El taller consiste en una introducción, cuatro clases y un anexo. Cada clase contiene un experimento, cuestionarios cortos sobre la aplicación del experimento en la vida cotidiana, ejercicios de pronunciación y escritura, uno o varios cuestionarios cortos sobre la gramática italiana y los lineamientos para la realización de un video en italiano explicando cada experimento. En la Introducción se presentan las contribuciones de Galileo al desarrollo del concepto de gravedad y, en la parte final del taller, se explica el fundamento teórico de los experimentos. El taller está disponible en dos niveles: Principiantes e Intermedios y Avanzados, y están en acceso abierto desde la página: <https://sites.google.com/view/experimentosdegalileo/nivel-principiante-e-intermedio>.

Está dirigido a todo público mayor de 9 años. Se prevé la entrega de una constancia de acreditación del taller a las personas que llenen el formulario de inscripción, entreguen el material solicitado en las clases y aprueben los cuestionarios.

**Palabras clave:** enseñanza de italiano, ciencia experimental, Galileo Galilei, aprendizaje transversal.

## ABSTRACT

*The text describes a workshop that aims to teach scientific terminology in Italian through experiments designed by Galileo Galilei to understand gravity. The workshop promotes interdisciplinary learning by integrating language and science. It consists of an introduction, four classes, and an annex. Each class contains an experiment, short questionnaires, pronunciation and writing exercises, grammar quizzes, and guidelines for creating a video in Italian explaining the experiment. The workshop concludes with an explanation of the theoretical basis of the experiments. The workshop is useful for anyone over the age of 9 and is accessible on the website:*

*<https://sites.google.com/view/experimentosdegalileo/nivel-principiante-e-intermedio>*

*The website provides access to the workshop materials, including videos, handouts, and quizzes. Participants who complete the workshop and pass the quizzes will receive a certificate of completion.*

**Keywords:** Italian language teaching, experimental science, Galileo Galilei, cross-curricular learning.

## INTRODUCCIÓN

El acercamiento a la lengua italiana se lleva a cabo a través de dos vías: usando los experimentos de Galileo que fueron marcadores de la ciencia moderna, y con la gramática y el vocabulario básico del italiano.

Galileo Galilei (1564-1642) es considerado como el padre de la ciencia moderna porque utilizó un experimento verificable, repetible y medible para probar una hipótesis en competencia sobre un fenómeno natural. Uno de los experimentos más significativos de Galileo es el de la caída de los cuerpos desde la Torre de Pisa (tratado en la Clase 2 del Taller), gracias al cual el científico demostró algo que iba en contra de la creencia popular: la velocidad de caída de los cuerpos no depende de su peso. Este experimento fue mencionado como uno de los diez más bellos de la Física en una encuesta realizada por Robert Crease en la revista *Physics World* en mayo (página 17) y septiembre de 2002 (páginas 19-20). En la misma encuesta se menciona otro experimento de Galileo, el del plano inclinado (Clase 3), el cual permitió descubrir y medir la aceleración de la gravedad. Para llegar al experimento de la caída de los cuerpos en la Torre de Pisa, Galileo cuestionó primero si los cuerpos más pesados caían antes que los ligeros; entonces, si ponía un objeto más ligero por encima de uno más pesado y los dejaba caer, habría un lapso entre la caída de uno y otro (Clase 1). Otro experimento que se le atribuye a Galileo es el de la Clase 4, donde estando dos objetos iguales a la misma altura se le imprime un golpe horizontal a uno de ellos, iniciando simultáneamente la caída de ambos y, sorprendentemente, caen al mismo tiempo aunque uno de los objetos recorra una distancia mucho más larga. Lo interesante de estos experimentos es que, al hacerlos con rigor científico, llevan a resultados contraintuitivos.

Lo más importante de Galileo es que fue quien inició el estudio de la gravedad, cuantificando la distancia y el tiempo de un cuerpo en movimiento. Con estos datos experimentales, Galileo conceptualizó la velocidad y la aceleración y con esto introdujo términos científicos en la lengua italiana coloquial.

Por otro lado, desde el punto de vista lingüístico, el italiano y el español son lenguas romances, lo que implica que son muy similares entre sí, con una similitud léxica del 82 %. También son similares en la gramática y el vocabulario: por ejemplo, ambos idiomas tienen un orden de palabras sujeto-verbo-objeto, y ambos usan género gramatical, aunque por supuesto tienen diferencias. No obstante que ambas lenguas son fonéticas, es decir se escriben como se leen, hay diferencias importantes en la pronunciación, siendo el italiano el que se pronuncia con más precisión. Con esto en mente, en este taller nos enfocamos en la pronunciación, el género y número de sustantivos, artículos y adjetivos, en el léxico, y en la conjugación simple de los verbos más comunes.

## METODOLOGÍA

Este taller es una propuesta para realizar cuatro experimentos científicos basados en el libro: “1. *La pressione atmosferica e la caduta dei corpi*” (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2017), traducción al italiano del número 1 de la Colección “Experimentos simples para entender una Tierra complicada” (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2007). De forma paralela se busca que con el taller los participantes aprendan algunas reglas básicas del italiano.

Para la parte lingüística, se ofrecen las bases del italiano mostrando las reglas para: 1) la pronunciación, 2) el uso del singular y del plural, basándose en el género y cambiando la terminación de la palabra, 3) la terminación de los adjetivos en singular/plural y femenino/masculino y 4) la conjugación de los verbos *essere* (ser o estar) y *avere* (tener o haber).

Para este taller se analizó la frecuencia de palabras usadas en el libro “1 *La pressione atmosferica e la caduta dei corpi*” con el programa LEX-A (<http://cuatromiradas.herokuapp.com/>) (Hernández-Pérez et al., 2023, en este número). El propósito de esta actividad en un taller de enseñanza de lenguas es utilizar los vocablos más importantes en cada categoría gramatical: sustantivos, verbos, adjetivos, pronombres, adverbios, unidades de medida, conjunciones y preposiciones.

El diseño del sitio y de la interfaz está basado en un flujo descendente con acceso a los recursos ya mencionados. El taller está alojado en *Google Sites* y utiliza otros recursos de acceso abierto como Google Translator, formularios de Google y audios y videos para el aprendizaje tanto del idioma como de los experimentos base. Tiene dos niveles: “Principiante e Intermedio” (<https://sites.google.com/view/experimentosdegaleilo/nivel-principiante-e-intermedio>) con las instrucciones en español y “Avanzados” (<https://sites.google.com/view/experimentosdegaleilo/nivel-avanzado>) escrito completamente en italiano.

Se calcula que una persona que inicia en la lengua italiana puede realizar todas las actividades en 40 horas.

## ESTRUCTURA DEL TALLER

Las instrucciones del Taller son actividades consecutivas con una interfaz amigable que incluyen diferentes recursos multimedia, como actividades de diagnóstico (cuestionarios cortos) en formularios, materiales educativos de apoyo que pueden ser lecturas a partir de fragmentos del libro base, presentaciones, tablas con palabras clave o audios con la lectura de las instrucciones por parte de académicos italo-parlantes. Además, se incluyen videos propios y externos que reproducen los experimentos. Las actividades pueden ser evaluadas por un profesor o bien autoevaluadas con la respuesta correcta señalada en el mismo curso. El Taller consta de una introducción, cuatro clases y un anexo (Figura 1).

### Introducción

Se presenta un resumen de las aportaciones de Galileo Galilei a la ciencia moderna.

### Clase 1. Experimento Gravedad y la resistencia del aire. Pronunciación del italiano.

Siendo el italiano una de las pocas lenguas con una ortografía bastante fonética, es decir que se escribe como se pronuncia (con sus excepciones, por supuesto), en la primera clase se presentan las reglas de la pronunciación del italiano.

La Clase 1 consta de ocho actividades. Tres de ellas son cuestionarios cortos (*quizzes*): dos sobre el experimento y el tercero sobre la pronunciación en italiano. Tres actividades son de lectura en italiano y dos sobre el léxico. Para terminar la clase hay que entregar un video en el cual se realiza y describe el experimento *Mandali a volare* en italiano.





Figura 1. Esquema y banner del Taller de Italiano con experimentos de Galileo.

**Clase 2. Experimento La Caída de los cuerpos (Si Scende!). Reglas de género y número en italiano**

La Clase 2 consta de cinco actividades. Tres de ellas son cuestionarios cortos (algunos llamados *quizzes* en el taller): dos sobre el experimento de la caída de los cuerpos (*Si Scende!*) de Galileo, incluyendo un ejemplo de cómo actúa en la naturaleza, y el tercero sobre la conversión de sustantivos del singular al plural y viceversa, de acuerdo con su género. La cuarta actividad consiste en la lectura en voz alta del experimento en italiano, mientras que la quinta actividad propone trabajar sobre el archivo Excel que contiene el léxico. Para terminar, hay que realizar un video de un minuto del experimento en italiano.

En esta clase se presentan ligas a cuatro videos del experimento: uno llevado a cabo en la Luna, otro en una de las cámaras de vacío más grandes del mundo y otros dos realizados en ambientes naturales en presencia de aire. A pesar de que hayan sido realizados en ambientes diferentes, todos los experimentos muestran el mismo resultado.

**Clase 3. Experimento sobre el Plano inclinado. Artículos y adjetivos**

La Clase 3 consta de ocho actividades: cuatro de ellas son cuestionarios cortos, dos son presentaciones (una sobre los artículos y otra sobre los adjetivos), una lectura en voz alta y el análisis de un video sobre el experimento *Sullo Scivolo*, un ejercicio para realizarse en el archivo del léxico, y el proyecto de la clase consiste en la elaboración de un video de dos minutos del experimento en italiano.

**Clase 4. Experimento El Cazador y el chango. Conjugación de verbos ser y haber**

En esta clase se demuestra de manera experimental parte de un problema clásico de la Física que se conoce como el Cazador y el Chango. Si un cazador apunta a un chango que está a una cierta distancia arriba de un árbol y el chango se deja caer en cuanto le disparan, la bala lo alcanzará recorriendo una trayectoria parabólica, siempre que la distancia al árbol sea menor que la requerida para el arribo de la bala al suelo. En el experimento *Cosa cade per prima?*, propuesto en esta clase, el punto de partida de los dos objetos corresponde al punto más alto de la trayectoria parabólica. De cualquier manera, la bala también alcanzaría al chango.

El experimento consta de ocho actividades: dos cuestionarios cortos (*quizzes*) sobre la parte física del experimento y un examen sobre la conjugación de los verbos ser y haber; dos presentaciones, una sobre la conjugación del verbo *essere* y la otra del verbo *avere*; una lectura en voz alta sobre el experimento *Cosa cade per prima?*; así como dos videos del experimento, uno realizado con dos pelotas de unice! y el otro con dos balas.

La Tabla 1 presenta un resumen de las actividades de cada clase, señalando en amarillo las actividades relacionadas con la parte científica y en naranja las relacionadas con la gramática y el vocabulario italiano.

**ANEXO: Explicación teórica de los experimentos**

Para finalizar el taller se incluye la explicación teórica en italiano de dos de los experimentos, uno tomado del libro *La pressione atmosferica e la caduta dei corpi* (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2017) correspondiente al experimento *Si Scende!* (Clase 2), y el segundo del experimento *Cosa cade per prima?* (Clase 4) que fue tomado del video “*moto del proiettile 6 - cacciatore scimmia*” del canal de Youtube *L'Alfabeto dell'Universo*:

<https://youtu.be/bWgIM963UWw>.

Tabla 1. Actividades por clase	
Actividades	
Clase 1	1. Quiz Caída
	2.2 Grabación
	4. Lectura en voz alta
	6. Plural de sustantivos
	7. Quiz caída
	8. Categorías gramaticales
	Proyecto Video
Clase 2	1. Quiz Experimento
	2. Léxico género y número
	3. Quiz Plural y Singular
	4. Lectura en voz alta
	5. Quiz Experimento
	Proyecto Video
Clase 3	1. Quiz Aceleración
	3. Quiz Artículos /género y números
	6. Quiz Plano inclinado
	7. Léxico Artículos singular y plural
	8. Quiz Adjetivos
	Proyecto Video
Clase 4	1. Quiz Experimento
	3. Verbos
	6. Quiz Experimento
	Proyecto Video

En amarillo actividades relacionadas con los experimentos científicos y en naranja con la lengua italiana.

## IMPLEMENTACIÓN DEL TALLER

El taller se probó de manera informal en tres situaciones: a) se invitó a diez estudiantes de posgrado sin conocimientos de italiano a llevar a cabo el taller; b) se invitó a seis estudiantes de italiano de la Escuela Nacional Preparatoria a llevar a cabo el taller como tarea dentro del curso y c) las actividades de la Clase 1 fueron realizadas por un niño de 9 años; con seguimiento personal, y se pudo constatar que pudo llevar a cabo todas las actividades sin ningún problema.

De estas experiencias podemos concluir que, estando en acceso abierto en una página web, el taller puede ser tomado por cualquier persona mayor de 9 años, o bien puede ser utilizado por cualquier docente de un curso de italiano como complemento de sus clases. En el primer caso, el Centro de Geociencias otorgará una constancia de acreditación a las personas que llenen el formulario de inscripción, envíen las evidencias de las actividades solicitadas en las cuatro clases al correo [cadenaporlaciencia@gmail.com](mailto:cadenaporlaciencia@gmail.com) y aprueben los cuestionarios.

En el caso de que un docente de un curso de italiano lo implemente en sus aulas, él mismo podrá pedirles a sus estudiantes que envíen la evidencia a su correo electrónico y podrá evaluar el desempeño de sus alumnos.

## VENTAJAS DE LA PROPUESTA DIDÁCTICA

¿Por qué habría que aprender italiano a través de un taller de ciencias si ya existen aplicaciones en internet que pueden realizar automáticamente, y sin costo alguno, traducciones italiano-español y español-italiano?

Planteamos las siguientes razones:

- a) Algunas nuevas herramientas tecnológicas virtuales para el aprendizaje de lenguas extranjeras, como Duolingo, han sido muy exitosas; sin embargo, han sido criticadas por la repetición mecánica de ejercicios que inhiben la comprensión práctica de la lengua. En este taller, al incluir experimentos científicos y la grabación de videos, se estimulan la creatividad y el entendimiento no solo de la lengua sino también de los conceptos científicos involucrados.
- b) Se ha recomendado aprender un nuevo idioma para mejorar la capacidad cognitiva (Fleming, 2019; Spence, 2022) y retrasar el envejecimiento cerebral (Alban, 2022).
- c) Al integrar el aprendizaje de una lengua con el aprendizaje de ciencia, se ofrece una experiencia educativa transversal.
- d) El resultado de los experimentos de Galileo que se incluyen en el taller va en contra de la intuición, por lo que proponerlos paralelamente a una nueva experiencia lingüística permite integrar nuevas dimensiones cognitivas y formativas.

## CONCLUSIONES

- Se propone un taller de aprendizaje de italiano usando experimentos científicos. Está dirigido a todo público, puede ser de autoaprendizaje o como un curso formal con constancia de acreditación entregada por el Centro de Geociencias, UNAM.
- El taller está alojado en páginas de acceso abierto en dos modalidades: la primera, para los niveles principiante e intermedio, y la segunda para un nivel avanzado: La dirección electrónica es: <https://sites.google.com/view/experimentosdegalileo/nivel-principiante-e-intermedio> con instrucciones en español.
- <https://sites.google.com/view/experimentosdegalileo/nivel-avanzado> con instrucciones en italiano.
- Pedagógicamente hablando, este taller permite 1) saber si el estudiante se equivocó y puede corregir sus errores; 2) escuchar los textos científicos de investigadores nativos de Italia; 3) probar con software libre si el estudiante pronuncia correctamente el italiano, y 4) ofrecer la oportunidad de aprender italiano con los experimentos que iniciaron la ciencia moderna.
- Los instrumentos lingüísticos utilizados fueron: 1) la explicación gramatical básica y 2) el léxico básico utilizado en los textos presentados.
- Los instrumentos cognitivos que desarrolla el taller son: 1) memoria, 2) necesidad de concentración, 3) aprender nuevas cosas y 4) la creatividad.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto “A la Lengua por las Ciencias” elaborado entre la Escuela Nacional Preparatoria y el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México para la enseñanza de las Lenguas Extranjeras. Agradecemos a Edwin Donovan Camacho, Andrés Julián Guevara, Jared Elhiu Ortega, Ada Abyade Herrera, Jesús Eduardo Mora, Adrián Cruz y Lydia Yasojara Zárate Jiménez por haber probado exitosamente las actividades de este taller. También queremos agradecer a Gabriela Sadurni, a Viridiana Jiménez y a Sandra Fuentes por haber hecho sugerencias importantes para mejorar la comprensión de este artículo.

## REFERENCIAS

- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., 2007, Experimentos simples para entender una Tierra complicada: 1: La presión atmosférica y la caída de los cuerpos, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, 19 p., ISBN: 978-970-32-4389-1.  
[https://tellus.geociencias.unam.mx/wp-content/uploads/2020/01/libro1\\_expgalileo.pdf](https://tellus.geociencias.unam.mx/wp-content/uploads/2020/01/libro1_expgalileo.pdf)
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., 2017, *Esperimenti Semplici per Capire una Terra Complessa: 1. La Pressione Atmosferica e la Caduta dei Corpe*, Verónica Nájera Martínez, María Luisa Pedraglio, traductores. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, 26 p., ISBN: 978-607-02-9408-2.  
[https://tellus.geociencias.unam.mx/wp-content/uploads/2023/02/libro1\\_italiano\\_R.pdf](https://tellus.geociencias.unam.mx/wp-content/uploads/2023/02/libro1_italiano_R.pdf)

- Alban, 2022, The Brain Benefits of Learning a Second Language | Be Brain Fit.  
<https://bebrainfit.com/benefits-learning-second-language/>
- Fleming, S. 2019, World Economic Forum, These are the benefits of learning a second language | World Economic Forum (weforum.org). <https://www.weforum.org/agenda/2019/03/these-are-the-benefits-of-learning-a-second-language/>
- Hernández-Pérez, Y.A., Alaniz-Álvarez, S.A., Martínez-Troncoso, J.C., Martini, M., Esparza-Herrera, Ana D. (2023). Detección de las frecuencias del léxico de un texto científico con la aplicación web LEX-A para apoyar el aprendizaje de lenguas extranjeras. Enseñanza y Comunicación de las Geociencias, vol. 2, núm. 1.
- Spence, C. 2022, How learning a new language changes your brain | Cambridge English.  
<https://www.cambridge.org/elt/blog/2022/04/29/learning-language-changes-your-brain/>

Manuscrito recibido: 19 de abril de 2023

Manuscrito corregido recibido: 19 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 24 de mayo de 2023

# IMPLEMENTACIÓN DE UN CURSO EN LÍNEA PARA MODELAR E INVERTIR DATOS DE PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

Aide Esmeralda López-González <sup>1\*</sup>, Andrés Tejero-Andrade <sup>1</sup>, Alejandro García-Serrano<sup>1</sup>, Miguel Ángel Velasco-Lindero <sup>1</sup>, Mauricio Damián Navedo-Cruz <sup>1</sup>, Emmanuel Ortiz-Jiménez <sup>1</sup>, David Armando Uc-Canul <sup>1</sup>, Pablo Ochoa-León <sup>1</sup> y Alfonso Villavicencio-García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

\*aide.lopez@ingenieria.unam.edu (autora para correspondencia)

## RESUMEN

Se desarrolló un curso en línea de modelado e inversión de datos geoelectrónicos empleando software libre o comercial demostrativo, con el propósito de eficientar, enriquecer y complementar el desarrollo académico y la experiencia educativa del alumnado en la asignatura de Prospección Eléctrica (PE) del 8° semestre de la carrera de Ingeniería Geofísica de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Otro propósito que se persigue con este desarrollo es mejorar la oferta educativa en línea que ofrece la UNAM en materia de Ciencias de la Tierra. Este curso fue implementado por primera vez de febrero a mayo de 2022 de forma híbrida (presencial y a distancia). En comparación con cursos previos, en éste los estudiantes necesitaron menos tiempo para conocer y utilizar software de interpretación de datos geoelectrónicos en corriente continua (o DC por sus siglas en inglés). Adicionalmente, mediante videos demostrativos se mejoró la comprensión del proceso de adquisición de datos reales en prácticas de campo, y finalmente, se generó un espacio virtual como apoyo a la comunidad en el proceso de enseñanza-aprendizaje, durante y después de la pandemia.

**Palabras clave:** Ingeniería Geofísica, prospección eléctrica, modelación e inversión geoelectrónica en 1D, 2D y 3D, software de interpretación de datos geoelectrónicos en corriente continua.

## ABSTRACT

*A geoelectrical data modeling and inversion online course was developed to complement and improve teaching and learning focused on electrical prospecting, in the 8th semester of Geophysical Engineering from Facultad de Ingeniería (FI) from Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Another purpose of this course is to improve online education offered by UNAM in the field of earth sciences with the aim of enriching both the academic development and the educational experience of students. This course was implemented for the first time between January and May*

*of 2022 in a hybrid way (face-to-face and online). By comparison with previous courses, at this one, students needed less time to understand and employ software to interpret direct current (DC) geoelectrical data. In addition, because demonstrative videos, show a better comprehension in data acquisition in field test. Finally, a virtual space was created as a community teaching-learning support within and after the pandemic time.*

**Keywords:** Geophysical Engineering, electrical surveying; 1D, 2D and 3D geoelectrical modelling and inversion, geo-electrical data interpretation software.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado la matrícula en la licenciatura de Ingeniería Geofísica ofrecida en la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Estadística UNAM, 2022). El Departamento de Ingeniería Geofísica de la FI cuenta con un pequeño número de licencias de software comercial para interpretar datos geoelectrónicos para la materia de Prospección Eléctrica (PE). Estas licencias son insuficientes para cubrir el programa de la materia, ya que hay que realizar 2 prácticas parciales y una final por semestre, además de las Prácticas Profesionales Intersemestrales (como un requisito de titulación). Los recursos de software disponibles en el departamento de ingeniería son insuficientes para procesar e interpretar el enorme volumen de información, por lo que hay que hacer uso de las opciones disponibles de software de modelado e inversión, libre o comercial demostrativos.

Con el objetivo de mostrar y proporcionar opciones de este tipo de software, se diseñó el "Curso de Modelación e inversión de datos de PE en 1D, 2D y 3D con software libre", en el que los alumnos reciben apoyo o guía educativa para utilizar estas herramientas de forma responsable y significativa. Con este curso también se busca mejorar el desempeño del alumno en la realización de prácticas de campo.

El "Curso de Modelación e inversión de datos de PE en 1D, 2D y 3D con software libre", creado en la plataforma MOODLE de la Aulas Virtuales de la UNAM, contiene 9 videos tutoriales para poder utilizar 4 opciones de software, adicionalmente se elaboraron los manuales en PDF y 3 videos demostrativos del uso del equipo de medición de datos geoelectrónicos en DC. El material se complementa con 3 videos que contienen entrevistas a profesionales del área y con recursos de evaluación. El curso se dió a un grupo de 18 estudiantes de la asignatura de PE en la FI del 31 de enero al 28 de mayo de 2022.

Tradicionalmente, en los cursos de PE los estudiantes descargaban e instalaban el software en sus equipos de cómputo personales y aprendían a utilizarlo mediante manuales y guías audiovisuales, que obtenían por sus propios medios. La falta de normalización en los procedimientos para el manejo del software provocaba una enorme pérdida de tiempo, ya que los instructores tenían que responder los cuestionamientos de manera individual. El desarrollo y aplicación ha permitido a los estudiantes reducir el tiempo de instalación y aprendizaje del uso del software de interpretación disponible (en un 50 %) y comprender el funcionamiento de los equipos de adquisición de datos de campo.

## PROPUESTA

Para cumplir con el perfil de egreso del profesional en Ingeniería Geofísica (Facultad de Ingeniería, UNAM, 2015a), se contemplan 4 objetivos específicos sobre conocimientos (Figura 1) y 5 sobre las habilidades y las aptitudes (Figura 2), los cuales convergen en las asignaturas relacionadas con la prospección geofísica.

Con base en lo anterior y con apoyo del Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (PAPIME-PE-106521) de la UNAM (del año 2021), se creó un aula virtual con un conjunto de materiales para la enseñanza virtual, híbrida o presencial de la materia de PE, que pretende reemplazar o minimizar la presencia de los estudiantes en las aulas y en las prácticas de campo. Dicho material consta de:

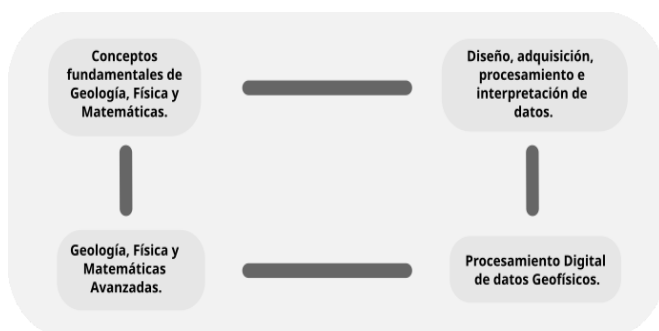


Figura 1. Conocimientos conceptuales esperados del perfil de egreso del estudiante de Ingeniería Geofísica.

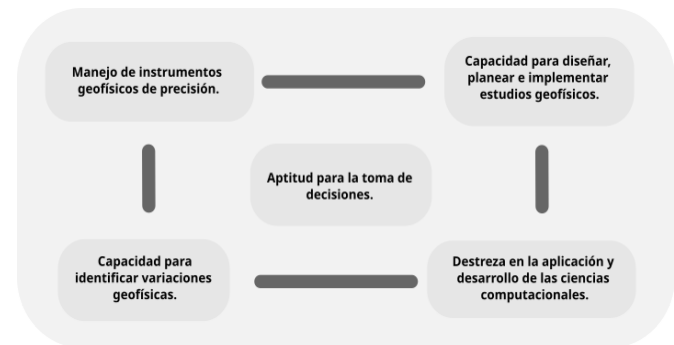


Figura 2. Habilidades y aptitudes esperadas del perfil de egreso del estudiante de Ingeniería Geofísica.

- Videos: 3 videos sobre instrumentación y elaboración de los métodos Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Tomografía Eléctrica (TE) en campo; 3 videos sobre modelación e inversión de datos en 1D, 2D y 3D; 3 videos de entrevistas a profesores sobre las asignaturas y el quehacer profesional relacionado con PE. Estos videos requieren conexión a internet para su visualización.
- Manuales del uso del software para modelar e invertir en 1D, 2D y 3D en formato PDF (para su estudio desde cualquier dispositivo, con o sin conexión a internet).
- Libro de notas sobre prospección eléctrica, inversión de datos geofísicos y procesamiento de datos geofísicos (unidad de datos eléctricos).
- Guía de elaboración de reportes.
- Rúbrica de evaluación de reportes.
- Base de preguntas para elaborar un examen de conocimientos.
- Encuesta de evaluación del curso (8 preguntas).

La función que cumple cada uno de los elementos del curso es la siguiente:

- Los videos sobre instrumentación sirven para que el estudiante incursione en aspectos técnicos de los equipos de medición, y que los conozca físicamente, que aprenda cómo se utilizan y los cuidados que requieren. Los videos del software especializado incluyen un tutorial para uso "rápido" para comenzar a modelar e invertir datos sintéticos o numéricos y utilizar posteriormente datos reales adquiridos en campo.
- Las notas proporcionan los fundamentos para la comprensión de PE, Teoría de Inversión y Procesamiento de datos geoelectrónicos.
- La sección de preguntas permite que el profesor elija algunas de ellas como complemento, para evaluar a los estudiantes o agregue nuevas para enriquecer los exámenes.
- La encuesta de evaluación del curso que se aplica a los usuarios proporciona información para mejorar los contenidos y la plataforma.

## Materiales del aula virtual

Los videos sobre el uso de equipo de medición en campo muestran aspectos generales, como su clasificación, su evolución en el tiempo, sus componentes, incluidos artículos complementarios (carretes, electrodos, cables, conectores y equipo de nivelación), así como equipo de protección personal recomendado cuando se usa el equipo de medición y sugerencias de cuidado y mantenimiento. Los videos también muestran técnicas de SEV (arreglo Schlumberger) y TE (arreglo dipolo-dipolo) con un máximo de 12 electrodos de cobre

(FI-UNAM, 2015b). Se describe la logística básica, la colocación de los artículos complementarios, el manejo de la consola de adquisición para programar las lecturas y resguardar la información.

Por otro lado, los videos (mp4) y manuales (PDF) sobre modelación e inversión se elaboraron con el software: IPI2WIN (libre 1D; Updatestar, 2023), ZONDIP1D (comercial demostrativo o con llave de manejo; Zond software, 2023), EARTHIMAGER (comercial demostrativo o con llave de manejo adquirido por la FI para 1D, 2D y 3D; AGI, 2023), RES2DMOD - RES2INV - RES3DMOD - RES3DINV (comercial demostrativo o con llave de manejo; Geotomo software, 2023), RESIPY (libre 2D y 3D; GitLab, 2023). Los modelos que se construyeron para 3 dimensiones se pueden observar en la Figura 3. Cada modelo se ingresó al software correspondiente con el espaciamiento apropiado entre los electrodos para facilitar la detección de anomalías a partir de datos aparentes.

Los videos de las entrevistas contienen preguntas formuladas a partir de información proporcionada por los alumnos, que se utilizó como base para entrevistar en línea a los profesores Andrés Tejero, Alejandro Arroyo, René Chávez, Denisse Argote y Josué Tago, sobre temas académicos y de aplicación profesional.

Las notas (Ortiz-Jiménez y Uc-Canul, 2022) contienen información para la modelación e inversión de datos de PE y se divide en 4 unidades temáticas: 1) Fundamentos teóricos de la prospección eléctrica, 2). Procesamiento de datos, 3) Conceptos básicos de modelación y 4) Teoría de inversión.

La Guía de elaboración de reportes se creó como complemento en la plataforma para apoyar al estudiante en la elaboración de informes técnicos, y se tomó como base para la creación de la rúbrica de evaluación. La Guía describe cada uno de los tópicos que deben contener los informes: objetivo, introducción, fundamentos teóricos del método, técnicas geofísicas empleadas, procesamiento e inversión de datos geoeléctricos en corriente continua, resultados y discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones, referencias, anexos y recomendaciones generales. La Rúbrica contiene las 11 secciones descritas en la Guía con 4 niveles (excelente, bueno, suficiente e insuficiente) y una puntuación sugerida. Los materiales se agregaron a la plataforma de Classroom de Google, con el código de acceso **yira7en** a través de la liga:

<https://classroom.google.com/c/NTkyMDcxNDA0NDg2?hl=es&cjc=yira7en>

### Propuesta del aula virtual

El curso en línea está dirigido a estudiantes de Licenciatura en Ingeniería Geofísica de la UNAM, y se puede encontrar en las Aulas Virtuales de la Coordinación de Universidad Abierta, Innovación Educativa y Educación a Distancia (CUAIEED-UNAM, acceso solo para estudiante de la UNAM) es tipo xMOOC, esto es, que se basa exclusivamente en el contenido que hay dentro de esta (Ochoa-León, 2022). Para evitar que los alumnos sucumban ante distractores que no tengan que ver con el contenido. El curso se fundamenta en el modelo pedagógico de comunidad de indagación, esto es, que se puede trabajar en subgrupos para llevar a cabo las actividades de aprendizaje, en donde se utiliza el concepto de presencia cognitiva, que es la forma en la que el docente está presente en el desarrollo del pensamiento crítico del alumno, por medio de preguntas emergentes en los videos, para incentivarlo y mantener su atención.

**Tabla 1.** Comparativa entre plataformas que se ofrecen en Aulas Virtuales de la UNAM.

Cualidad	Moodle	Google Classroom	EDUCAFI
Permite contenido educativo	Si	No	Si
Personalizable	Si	Si	Si
Permite foros de discusión entre alumnos	Si	Si	Si
Tiene aplicación nativa para celulares	Si	Si	No
La UNAM tiene un dominio especial para esta plataforma	Si	No	Si
Permite matricular usuarios masivamente por medio de CSV (valores separados por comas, por sus siglas en inglés).	Si	No	Si
Permite cambiar idiomas dentro del curso	Si	Si	Si
Permite el uso de grupos	Si	No	Si
Permite planificar el inicio y el fin de cada curso	Si	No	Si
Permite estructurar los cursos por temas	Si	No	Si

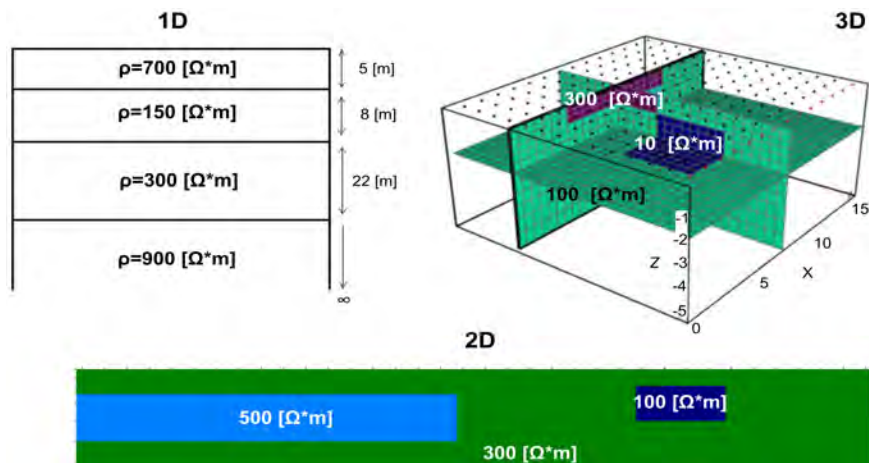


Figura 3. Modelos empleados para realizar los videos tutoriales con software de interpretación de datos geoeléctricos en corriente continua en 1D, 2D y3D.

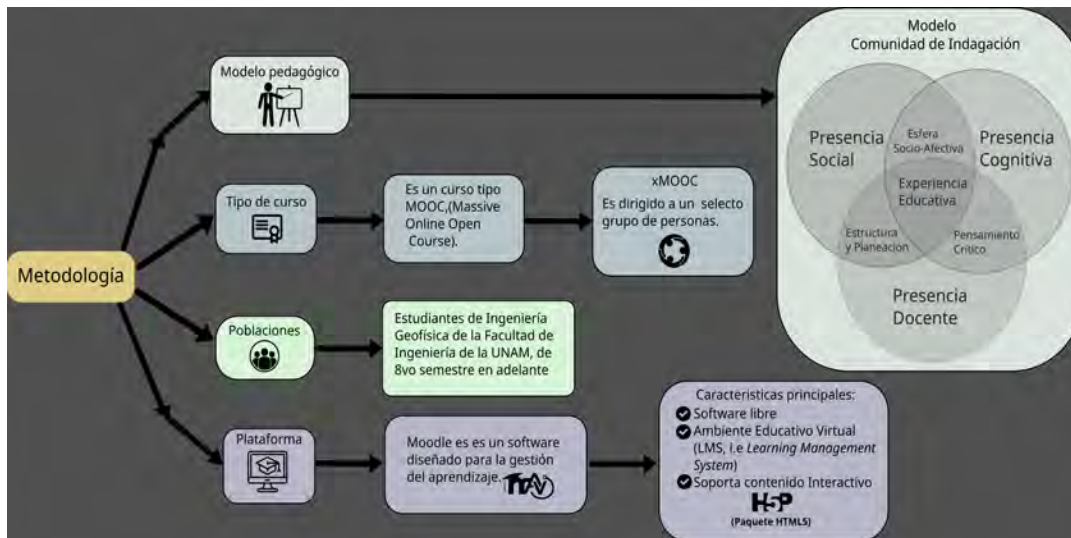


Figura 4. Cuadro sinóptico que muestra la metodología para la creación del curso.

Se eligió a la plataforma MOODLE para ubicar el curso, es una de las que ofrecen las Aulas Virtuales de la UNAM (Figura 4). Esta plataforma se eligió porque tiene algunas ventajas sobre otras (Google Classroom, Zoom, EDUAFI), como el poder crear grupos dentro del aula, y permite el uso gratuito del complemento H5P para la edición de los videos. En la Tabla 1 hay un listado de las diferencias a favor de MOODLE. Al final de cada video, hay un conjunto de preguntas que el alumno debe responder.

**Propuesta didáctica y estrategia de medición del aprendizaje**

Este curso puede ser preinstruccional (para la asignatura de Procesamiento de Datos Geofísico en el 10° semestre, debido a que los materiales del aula podrían emplearse como recordatorio de temas de la prospección o de inversión de datos), coinstruccional (para PE del 8° semestre, e Inversión de Datos Geofísicos del 9° semestre, como herramienta formativa y evaluativa) y postinstruccional (para PE, mediante las actividades en línea que se solicitan después de ver los videos y manuales; FI-UNAM, 2020). Por otro lado, de acuerdo a la Taxonomía de Bloom (FI-UNAM, 2020), en la elaboración del curso se consideraron los 6 niveles de complejidad, desde las bases del conocimiento hasta la evaluación (autónoma) y, las estrategias cognitivas, como la organización, la realización y la repetición.

Entre enero y mayo de 2022, las clases en la FI no se habían normalizado, por lo que el curso se impartió de manera híbrida o en proceso de readaptación. Por otro lado, se dio de alta al grupo de estudiantes de Prospección Eléctrica (Grupo 1, marzo de 2022) en el Aula Virtual con las indicaciones correspondientes para acceder a la plataforma y se formaron equipos de trabajo. Se propuso que la evaluación fuera formativa en las actividades de modelación e inversión, y sumativa (examen final) para los conocimientos adquiridos semiformales y formales (Sánchez y Martínez, 2020), con el propósito de que los estudiantes aprendan por su cuenta, o bien darle a los profesores la oportunidad de elegir algunas opciones.

Al final de la exposición del Tema 2 (SEV) de PE en el salón de clase (FI-UNAM, 2023), se dió la instrucción de realizar una actividad de modelación e inversión de datos en 1D en casa y por equipos, estableciendo fecha de entrega. De la misma manera, se asignó la actividad de modelación e inversión después del Tema 3 o Tomografía eléctrica. Durante la implementación del curso, se llevó a cabo un proceso de retroalimentación de los estudiantes de manera directa y a través de la plataforma.

Al finalizar el curso, se estableció una fecha límite para la realización del examen final y para responder la encuesta de opinión.

**Tabla 2. Preguntas de la encuesta de calidad del curso.**

1	En una escala del 1 al 10 evalúa la calidad del contenido del curso.
2	En una escala del 1 al 10 evalúa la cantidad de materiales proporcionados, esto es, si faltaron (calificación de 1) o si fueron más que suficientes (calificación 10).
3	En una escala del 1 al 10 evalúa la claridad del curso.
4	En una escala del 1 al 10 evalúa la cantidad de tiempo que invertiste en terminar el curso. Considera 1 si el tiempo fue demasiado y 10 si el tiempo fue suficiente para acabar el contenido.
5	En una escala del 1 al 10 evalúa la atención recibida durante el curso. Considera 1 si no recibiste atención y 10 si recibiste ayuda en tiempo y forma.
6	En una escala del 1 al 10 evalúa tu aprovechamiento del curso.
7	En una escala del 1 al 10 evalúa el nivel de contribución del curso a tu desarrollo académico.
8	Escribe comentarios, observaciones y/o recomendaciones acerca del curso, sus contenidos, actividades y evaluaciones.

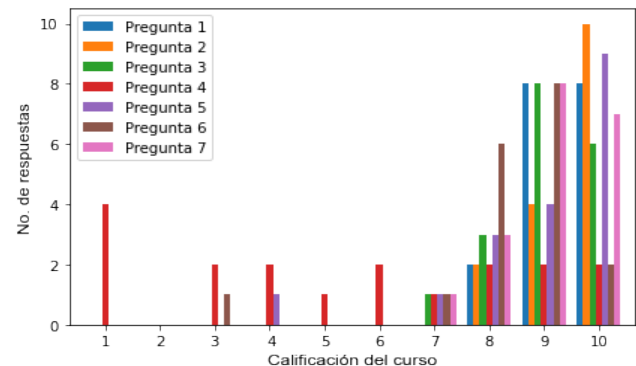


Figura 5. Resultados de la encuesta sobre el curso respondida por los estudiantes. P1 a P7 preguntas de la encuesta descritas en la Tabla 2.

## RESULTADOS

Para efectuar la evaluación del desarrollo del curso se consideró al grupo de 18 alumnos al que se le impartió entre enero y mayo de 2022 y se tomaron en cuenta dos parámetros: el examen final y la encuesta sobre el curso y los materiales (Tabla 2).

La calidad y cantidad de materiales suministrados recibieron una calificación alta en promedio (Figura 5, P1 y P2 respectivamente). En cuanto a la claridad de contenidos (P3), tiempo invertido (P4), atención recibida (P5), aprovechamiento del curso (P6) y aportación al desarrollo académico (P7), las calificaciones estuvieron cerca de la excelencia en promedio.

El examen final consistió en 20 preguntas. En promedio el grupo obtuvo una calificación de 8.25 con una desviación estándar de 2.11, el 77.7% de los alumnos (14 de 18) aprobaron con calificación mayor a 6, y el 55.5% del grupo obtuvo una calificación mayor a 8. Esto refleja el éxito del curso.

### Resultados conductuales

El curso, que originalmente fue diseñado para transmitirse a distancia, se impartió de manera híbrida lo cual representó algunos retos de adaptación pero también beneficios inesperados para estudiantes y profesores. Se observó menor ansiedad en la conducta estudiantil con respecto a grupos anteriores, ya que contaron con antelación con material bibliográfico y audiovisual, y pudieron centrar su atención en aspectos relevantes del curso, como la simulación e interpretación. En consecuencia, hubo un mejor aprovechamiento del curso, debido a que se redujo el tiempo destinado a resolver dudas operativas y se dedicó más tiempo a los temas trascendentes del curso, mejorando la eficiencia en la transferencia de conocimientos (Figura 6).

Respecto a las prácticas de campo, debido al conocimiento previo adquirido con el material audiovisual, los estudiantes mejoraron sustancialmente su desempeño operativo en campo, en comparación con el obtenido en prácticas de campo realizadas en años anteriores. Se registraron problemas menores, básicamente por la falta de compromiso de algunos estudiantes, quienes no revisaron los materiales en tiempo y forma sugeridos, lo cual se hacía evidente en las deficiencias del análisis y discusión de resultados en sus reportes, así como en la demora de entrega de estos.



Figura 6. Nube de palabras generada con las palabras clave de los comentarios que escribieron las y los estudiantes en la encuesta de calidad. Creada con la aplicación *Mentimeter* (2023).

## CONCLUSIONES

Los resultados de las encuestas y las calificaciones obtenidas por los alumnos, muestran que, para la mayoría de ellos, el curso virtual fue completo y les facilitó la comprensión teórico-práctica del contenido, así como el uso del software requerido en la asignatura de PE.

Por otro lado, la implementación de este curso apoya al Plan de desarrollo Institucional de la Facultad de Ingeniería-UNAM (2019), para ayudar a ampliar los alcances de la educación continua y a distancia, con lo que se incentiva a la comunidad a la creación de más cursos para complementar los aprendizajes en diversas asignaturas dentro y fuera de las Ciencias de la Tierra.

Sin embargo, algo que se puede señalar sobre el curso y, se observó en las respuestas de las encuestas, es que el trabajo que se pide para acreditar el curso es “muy pesado” y esto puede llegar a ser un poco contraproducente, pero si se toma como material de apoyo, sí beneficia al estudiante en su formación, tomando en cuenta que, al sumar más trabajo a una materia, puede hacer que los alumnos pierdan el interés en aprender y se enfoquen solo en hacer el trabajo para acreditar.

Este curso fue planeado originalmente para el trabajo en línea, sin embargo, los resultados indican que es necesario mostrar el material en el salón de clase, que se aclaren dudas respecto a las actividades a realizar, y mantener constantemente la comunicación con el estudiante por vía presencial o digital.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con apoyo de DGAPA-PAPIME-UNAM (Clave PE-106521). Agradecemos el apoyo y la colaboración de J. Esteban Hernández Quintero, Ana Cacavari Garza, Antonio López Rodríguez y Yosselin L. Ángeles Rojo. Adicionalmente, agradecemos a los investigadores, profesores y profesionistas que participaron en las entrevistas: Ing. Alejandro Arroyo, Dr. René Chávez, Dra. Denisse Argote y al Dr. Josué Tago.

## REFERENCIAS

- Advanced Geosciences Inc. [AGI] (2023a). <https://www.agiusa.com/products/software>
- Estadística UNAM. (2022) Estadística UNAM. Portal de estadísticas universitarias. (Acceso 1 de diciembre de 2022). [https://www.estadistica.unam.mx/series\\_inst/index.php](https://www.estadistica.unam.mx/series_inst/index.php).
- Facultad de Ingeniería. (2015a). Proyecto de Modificación del Plan de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Geofísica, Tomo I, Plan 2016-2023. UNAM.
- Facultad de Ingeniería. (2015b). Proyecto de Modificación del Plan de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Geofísica, Tomo II, Plan 2016-2023. UNAM. (Acceso 23 de febrero de 2023). [https://www.ingenieria.unam.mx/programas\\_academicos/licenciatura/Geofisica/2023/asignaturas\\_geofisica\\_2023.pdf](https://www.ingenieria.unam.mx/programas_academicos/licenciatura/Geofisica/2023/asignaturas_geofisica_2023.pdf)
- Facultad de Ingeniería, UNAM. (2019). Plan de Desarrollo 2019-2023. [https://www.ingenieria.unam.mx/planeacion/eg/plan19\\_23/pdd2019-2023.pdf](https://www.ingenieria.unam.mx/planeacion/eg/plan19_23/pdd2019-2023.pdf).
- Facultad de Ingeniería [FAI-UNAM]. (2020). Programa de capacitación para la educación en línea. [https://www.ingenieria.unam.mx/protocoloTI/capacitacionOnLine/material\\_consulta.php](https://www.ingenieria.unam.mx/protocoloTI/capacitacionOnLine/material_consulta.php)



- Geotomo Software. (19 de mayo de 2023).  
<https://www.geotomosoft.com/downloads.php>
- GitLab. (19 de mayo de 2023). <https://gitlab.com/hkex/resipy>
- Mentimeter. (19 de mayo de 2023).  
<https://www.mentimeter.com/es-ES>
- Ochoa-León, Pablo. (2022). Modelación e inversión de datos de prospección eléctrica en 1D, 2D y 3D usando software libre. [Manual para obtener el título de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM].  
<http://132.248.9.195/ptd2022/noviembre/0833546/Index.html>
- Ortiz Jiménez, E.; Uc Canul, D. A. (2022). Libro de apuntes de fundamentos teóricos de la modelación e inversión de datos de prospección eléctrica en 1D, 2D y 3D. [Material didáctico para obtener el título de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM].  
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/17844>
- Sánchez, M. Martínez, A. (2020). Evaluación del y para el aprendizaje: instrumentos y estrategias. 1a ed. Ciudad de México, UNAM.
- Updatestar. (2010). Repositorio de software.  
<https://ipi2win.updatestar.com/es>
- Zond software (2023).  
<http://zond-geo.com/english/zond-software/ert-and-ves/zondip1d/>

Manuscrito recibido: 23 de febrero de 2023  
Manuscrito corregido recibido: 21 de mayo de 2023  
Manuscrito aceptado: 29 de mayo de 2023

# RETENCIÓN DE CO<sub>2</sub> POR MINERALIZACIÓN EN ROCAS. UNA PROPUESTA DE PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS EN EL LABORATORIO

Josué H. Almazán-Mendoza <sup>1</sup>, A. Paulina Gómora-Figueroa <sup>1\*</sup>,  
Laura Mori <sup>2</sup> y Enrique A. González-Torres <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Petrolera, División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria., Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Geológica, División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

\*[p.gomora@unam.mx](mailto:p.gomora@unam.mx) (autora para correspondencia)

## RESUMEN

En este trabajo se plantea una propuesta de laboratorio para valorar diferentes muestras de rocas ígneas y seleccionar, mediante análisis geoquímico y petrográfico, las mejores candidatas para exponerse a dióxido de carbono acuoso. Lo anterior sirve como guía a estudiantes de licenciatura y posgrado interesados en el tema de almacenamiento de CO<sub>2</sub> que deseen conocer algunas de las técnicas de análisis geoquímico que se emplean en el laboratorio. Los protocolos experimentales diseñados fueron validados en el laboratorio por alumnos de los últimos semestres de la carrera de Ingeniería Petrolera y del Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, los cuales permitieron identificar los parámetros críticos para la mineralización de CO<sub>2</sub> en rocas ígneas y olivino, que es un mineral común en las rocas ígneas máficas y se ha reportado como uno de los mejores prospectos para la mineralización de CO<sub>2</sub>.

Las muestras de roca fueron expuestas a dióxido de carbono disuelto en agua, a una presión entre 5860 y 6550 kPa y una temperatura de 20 a 25 °C. Para confirmar la mineralización del dióxido de carbono se emplearon las técnicas de espectroscopía infrarroja, difracción de rayos X de polvos, microscopía electrónica de barrido y plasma de acoplamiento inductivo acoplado con espectrofotometría de emisión óptica. Se observó que, después de exponer el olivino a CO<sub>2</sub> durante 21 y 60 días, se formaron bicarbonatos y carbonatos, respectivamente. Para el caso de las rocas ígneas, se identificaron bicarbonatos después de 30 días de exposición y se observó la liberación de iones Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Fe<sup>3+</sup> en el agua, que son críticos para la formación de carbonatos. Aunque la mineralización de CO<sub>2</sub> en este tipo de rocas se ha reportado previamente, es necesario continuar la investigación en este tema para elaborar una base de datos con las muestras más idóneas que favorezcan la mineralización de dióxido de carbono y se genere conocimiento de la capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Estas experiencias son relevantes para las y los estudiantes de licenciatura y posgrado afines a Ciencias de la Tierra, así como para complementar su formación en temas relacionados con el calentamiento global, la mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub> y la transición energética.

**Palabras clave:** mineralización de CO<sub>2</sub>, almacenamiento geológico, geoquímica, rocas ígneas, olivino, piroxeno, calentamiento global.

## ABSTRACT

*The present work sets a lab proposal for evaluating and selecting among different igneous rocks samples, using geochemical and petrographic analysis, the best candidates for aqueous CO<sub>2</sub> exposure. This work aims to guide students (B.S. and Graduates) interested in practical techniques employed for evaluating carbon dioxide storage through geochemical analysis in the lab. The designed protocols were validated by B.S. and graduate students in the Petroleum Engineering Department at UNAM, to identify of some critical parameters for CO<sub>2</sub> mineralization in igneous rocks and olivine, which is a common mineral present in mafic igneous rocks, and it has been reported as one of the best prospects for carbon dioxide mineralization.*

*The rock samples were exposed to CO<sub>2</sub> dissolved in water at a pressure range of 5860 - 6550 kPa and a temperature range of 20 to 25 °C. We used infrared spectroscopy, X-ray powder diffraction, scanning electron microscopy, and inductively coupled plasma-mass spectrometry to confirm the CO<sub>2</sub> mineralization. After exposing the olivine to CO<sub>2</sub> for 21 to 60 days, we observed the formation of bicarbonates and carbonates, respectively. For the igneous rocks, we identified bicarbonates after 30 days of exposure and the liberation of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and Fe<sup>3+</sup> ions in water, which are critical for carbonate formation.*

*Although the CO<sub>2</sub> mineralization in these rocks has been reported previously it is necessary to continue investigating this topic to enrich the database with the ideal samples and broaden the knowledge about the igneous rocks' capacity for CO<sub>2</sub> storage. This type of experience is relevant for graduate and B.S. students majoring in Earth Sciences and areas alike. Also, it helps to fulfill the education in topics related to global warming, CO<sub>2</sub> emissions mitigation, and energy transition.*

**Keywords:** mineralization of CO<sub>2</sub>, geological storage, geochemistry, igneous rocks, olivine, piroxene, global warming

## INTRODUCCIÓN

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (COP26) se llevó a cabo en Glasgow en 2021 donde se reunieron 120 líderes mundiales que durante dos semanas trabajaron para discutir fundamentos científicos, soluciones, voluntad política para la toma de decisiones e indicaciones para la acción por el clima. Desafortunadamente, la reducción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero sigue estando muy por debajo de lo necesario para preservar un clima habitable, y el apoyo a los países más vulnerables afectados por los efectos del cambio climático continúa siendo insuficiente (Naciones Unidas, 2023).

Ahora bien, los combustibles fósiles se han usado como fuente de energía por más de 6000 años y actualmente siguen siendo las fuentes más utilizadas. En la Figura 1 se observa que el carbón (44,473 TWh) y el gas natural (40,375 TWh) fueron las dos fuentes de energía más usadas globalmente en 2021 después del petróleo (51,170 TWh). Esto implica que el 83 % de la demanda mundial (163,709 TWh) en energía se cubrió con combustibles fósiles.

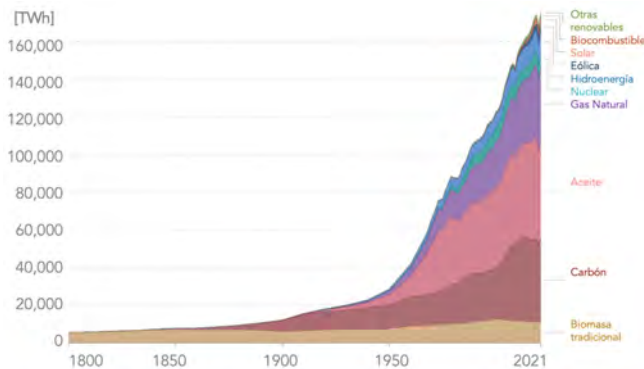


Figura 1. Consumo de energía mundial proveniente de fuentes distintas. Un terawatt-hora (TWh) equivale a la energía necesaria para mantener la potencia de un Watt durante una hora y equivale a 3600 Julios (el Watt no pertenece al Sistema Internacional de Unidades). Tomada de Ritchie et al., 2022 con datos de BP Statistical Review of World Energy.

Según cifras de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), en el 2020 las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera se redujeron en un 8 % con respecto al 2019, debido a la pandemia por COVID. Sin embargo, en el 2022 se restableció la tendencia pre-pandémica y se emitieron 36.8 gigatoneladas (Gt) de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, alcanzando un nuevo índice histórico. El sector con mayores emisiones de CO<sub>2</sub> fue el de energía, seguido del industrial (ej. industria cementera, industria siderúrgica, refinación y petroquímica). Figura 2, IEA, 2022.

Lo anterior es consecuencia, en gran parte, del incremento global de la población; según proyecciones de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), en el 2050 habrá cerca de 10 mil millones de habitantes, lo que resultará en mayor demanda de energía, agua y alimentos y, por lo tanto, en más emisiones de CO<sub>2</sub>. (Macías, 2020) Una de las acciones para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera es la implementación de la tecnología CCUS (Captura, Uso y Almacenamiento de CO<sub>2</sub>, por sus siglas en inglés). En el 2014, la Secretaría de Energía de México conformó y oficializó el mapa de la ruta tecnológica CCUS, en el cual se plantea el ordenamiento de los esfuerzos dirigidos a la articulación de actividades de investigación en captura, transporte, uso y almacenamiento de CO<sub>2</sub> con la intención de impulsar su desarrollo

y la implementación de dicha tecnología en el país; su actualización se publicó en el 2018 (Figura 3). Por lo tanto, el desarrollo de proyectos de investigación que atiendan las necesidades de esta ruta es sumamente deseable (Secretaría de Energía, 2018; MeCCS, s.f.; Enerdata, 2023).

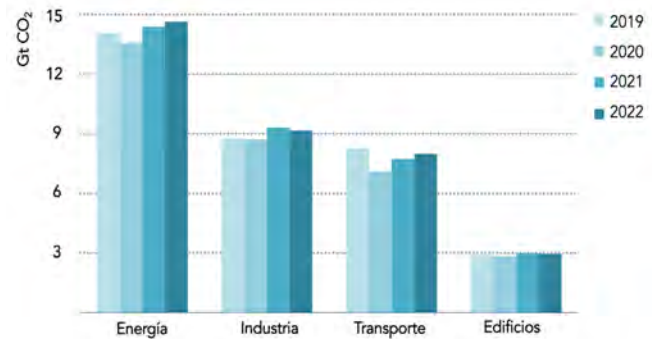


Figura 2. Emisiones globales de CO<sub>2</sub> por sector, 2019 – 2022 en gigatoneladas (Gt) de CO<sub>2</sub> equivalente. El transporte incluye barcos de carga (international bunkers, IEA, 2022). Gt es una unidad de medida que no pertenece al Sistema Internacional de Unidades. Sirve para medir masa o energía. Como medida de masa equivale a 1.000.000.000 (mil millones) de toneladas.



Figura 3. Cadena CCUS, incluye el monitoreo. Modificado de Secretaría de Energía, 2018.

### Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>

Existen diferentes opciones para el almacenamiento geológico que se considera como la disposición final del CO<sub>2</sub>. La capacidad global para el secuestro geológico se estima en más de 4,000 billones de toneladas de CO<sub>2</sub>, lo cual incluye yacimientos de petróleo y gas exhaustos, formaciones salinas y vetas de carbón. Por lo tanto, los proyectos CCUS pueden jugar un papel importante en la mitigación de emisiones. (Global CCS Institute, 2020). En la Tabla 1 se muestra un resumen de algunas formas de almacenamiento del dióxido de carbono en diferentes sistemas. (Gómora-Figueroa, comunicación personal).

Para las diferentes opciones o métodos de almacenamiento disponibles, existen cuatro mecanismos de entrapamiento a través de los cuales el CO<sub>2</sub> queda contenido en el medio poroso: estructural, residual, disolución y mineralización. La Figura 4 muestra una representación gráfica de cada uno de los mecanismos mencionados, los cuales pueden ocurrir simultáneamente en el espacio poroso de un yacimiento tras la inyección de dióxido de carbono (Shukla, 2010).

La mineralización ocurre cuando algunos minerales liberan iones a partir de interacciones con el CO<sub>2</sub> y se forman especies sólidas estables, generalmente carbonatos o bicarbonatos. La

Tabla 1. Algunas opciones de almacenamiento geológico de dióxido de carbono. Adaptado de Gómora-Figueroa (comunicación personal).	
Yacimientos de petróleo y gas	La infraestructura existente podría reutilizarse; sin embargo, es necesario evaluar el riesgo asociado por fugas. La inyección de CO <sub>2</sub> para la movilización del petróleo residual en los yacimientos (CO <sub>2</sub> -EOR) por sus siglas en inglés, recuperación mejorada de hidrocarburos— ha resultado ser eficaz. Las pérdidas de CO <sub>2</sub> a la atmósfera son cercanas a cero en CO <sub>2</sub> -EOR. Sin embargo, el objetivo principal es maximizar la producción de petróleo, no inyectar la máxima cantidad de CO <sub>2</sub> . La industria del petróleo continua siendo reacia a almacenar CO <sub>2</sub> en yacimientos de hidrocarburos exhaustos, ya que es posible que en el futuro se desarrollen tecnologías para producir los hidrocarburos restantes.
Formaciones salinas profundas	Son estratos de roca porosa y permeable en los que los espacios porosos están saturados de agua altamente salina. Los acuíferos salinos profundos tienen la capacidad potencial más alta a nivel mundial para el almacenamiento de CO <sub>2</sub> . La cinética de los mecanismos de captura y su impacto a largo plazo sobre las características del yacimiento, en particular la captura geoquímica, necesitan más investigación. Las propiedades de las formaciones salinas profundas no son tan conocidas como las formaciones de petróleo y gas, ya que es difícil y costoso caracterizarlas.
Vetas de carbón	El CO <sub>2</sub> se puede utilizar para mejorar la recuperación del metano en capas de carbón (CBM) por medio de adsorción. Esta tecnología es usada en varias cuencas alrededor del mundo ya que por cada molécula de gas producida se absorben al menos dos moléculas de CO <sub>2</sub> en la matriz de las vetas. Uno de los principales problemas asociados con el desarrollo de este tipo de recuperación es la baja permeabilidad de las capas de carbón. La inyección continua de CO <sub>2</sub> provoca la disminución de la permeabilidad cercana al área de inyección.
Profundidades oceánicas	Es fundamental considerar el impacto ambiental sobre el calentamiento del océano, la acidificación y la pérdida de oxígeno debido a la adsorción del CO <sub>2</sub> atmosférico que ha aumentado en las últimas décadas. Aún existen brechas respecto a los procesos físicos, biogeoquímicos y biológicos para comprender las consecuencias, límites y capacidad de los ecosistemas y organismos debido al almacenamiento de CO <sub>2</sub> .
Mineralización	La mineralización <i>ex-situ</i> se lleva a cabo en zonas cercanas a minas con desechos bajo condiciones de temperatura y presión diversas. El CO <sub>2</sub> reacciona exotérmicamente con silicatos de Mg o Ca para formar carbonatos. Suelen usarse aditivos para acelerar la reacción. Los costos pueden reducirse si los carbonatos producidos tienen aplicaciones industriales. La mineralización <i>in-situ</i> consiste en inyectar CO <sub>2</sub> en el subsuelo, rico en silicatos de Ca, Mg y Fe para formar carbonatos. Los productos son estables durante millones de años.



Figura 4. Mecanismos de entrapamiento durante el almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Modificado de Staib *et al.*, 2021.

mineralización en rocas se puede dividir en dos categorías: *in-situ* y *ex-situ*. La mineralización *in-situ* consiste en la inyección de CO<sub>2</sub> en el subsuelo bajo condiciones optimizadas con el fin de acelerar el proceso natural de carbonatación mineral. Este proceso puede darse en presencia o ausencia de agua y en condiciones supercríticas del CO<sub>2</sub> (31 °C y 7295.4 kPa). En cambio, la mineralización *ex-situ* se produce en la superficie y suele ser un proceso industrial; usualmente se emplea pedacería de rocas, imitando la meteorización natural donde los silicatos de magnesio o calcio se transforman en carbonatos mediante la reacción con CO<sub>2</sub>; sin embargo, el proceso se acelera con el empleo de reactores, catalizadores, ácidos y bases.

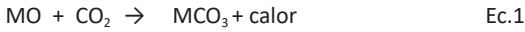
La mineralización natural requiere cientos o miles de años; sin embargo, recientemente se ha demostrado que la mineralización *in-situ* puede ocurrir mucho más rápidamente en basaltos. Un ejemplo es el proyecto Carbfix en Islandia, donde se probó de manera efectiva la mineralización de 90 % de dos toneladas de dióxido de carbono inyectado en aproximadamente dos años. El CO<sub>2</sub> proviene de una central eléctrica y es inyectado simultáneamente con agua en

rocas máficas a una profundidad cercana a los 800 m. A la fecha de elaboración de este trabajo, Carbfix ha inyectado 90 521.9 toneladas de CO<sub>2</sub> (Carbfix, 2023; Staib *et al.*, 2021). La siguiente etapa del proyecto consiste en capturar dióxido de carbono de la atmósfera. Este proyecto ha recibido premios y distinciones múltiples y aunque aún no se considera como un proyecto comercial, otros países (por ejemplo, Suecia) han firmado convenios de colaboración para implementar la tecnología en el corto plazo.

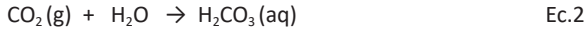
Otro ejemplo es el proyecto Wallula, que se encuentra en el área industrial de Atlatia, en el condado de Walla Washington, Estados Unidos. Este proyecto comenzó en el año 2009 y hasta el año 2013 el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico llevó a cabo una prueba piloto de almacenamiento en la que se inyectaron cerca de 1000 Mt de CO<sub>2</sub> en basaltos del río Columbia, cerca de Wallula. En junio del 2015 se realizó la caracterización detallada de muestras de roca, encontrando la presencia de carbonatos en el yacimiento, lo que reveló que el CO<sub>2</sub> inyectado se había mineralizado dos años después de su inyección. Según cálculos, el 65 % (650 Mt) del CO<sub>2</sub> inyectado quedó entrapado a través de la mineralización y los carbonatos resultantes ocuparon sólo el 4.3 % del espacio poroso disponible en el yacimiento (McGrail *et al.*, 2017; White *et al.*, 2020).

#### Proceso de mineralización de CO<sub>2</sub> en rocas

El proceso de retención de CO<sub>2</sub> en rocas (ya sea *in-situ* o *ex-situ*) ocurre cuando el CO<sub>2</sub> reacciona con óxidos metálicos presentes en las rocas ígneas, MO, donde M puede ser calcio, magnesio o hierro, para generar el carbonato correspondiente (MCO<sub>3</sub>) con la liberación de calor.



La cantidad de calor liberado dependerá de M y del material de partida que contiene el óxido metálico. La reacción química comienza con la disolución del CO<sub>2</sub> para formar ácido carbónico (Ecuación 2), el cual se disocia en pasos, liberando primero iones bicarbonato y protones (Ecuación 3) y posteriormente iones carbonato y protones (Ecuación 4).



El agua con CO<sub>2</sub> disuelto puede alcanzar un valor de pH = 4, dependiendo de la presión parcial de CO<sub>2</sub>, composición del agua y temperatura del sistema, lo cual promueve la disolución de silicatos, principalmente de los grupos del olivino  $-(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4-$  y los piroxenos  $-\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})\text{Si}_2\text{O}_6-$ , resultando en la mineralización de CO<sub>2</sub> en dos pasos: primero, se lleva a cabo la disolución de los minerales, durante la cual se consumen protones (Ecuaciones 3 y 4) y aumenta el pH del agua; posteriormente, los iones metálicos disueltos reaccionan con los iones carbonato y bicarbonato para formar especies carbonatadas sólidas y estables como la calcita (CaCO<sub>3</sub>), la magnesita (MgCO<sub>3</sub>), la dolomita (MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) o la siderita (FeCO<sub>3</sub>). (Rara vez se observa esta última: Figura 5; Snæbjörnsdóttir et al., 2020). La Ecuación 5 muestra una reacción de meteorización química de un típico clinopiroxeno, durante la cual se consumen protones y se liberan iones Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Fe<sup>2+</sup> en la disolución.



Figura 5. Proceso de retención de CO<sub>2</sub> en minerales. Modificado de Raza et al. 2022.

Los carbonatos formados ocupan el espacio poroso de la roca y por lo general suelen tener un volumen mayor al que ocupaban los minerales originales. Esto provoca que los poros se "taponen" y se obstruya el paso del agua con CO<sub>2</sub> disuelto. Sin embargo, la expansión del volumen durante la precipitación puede promover el agrietamiento y fracturamiento de la roca, lo que aumenta la porosidad, la permeabilidad y expone nuevas superficies. También hay que señalar que, debido a la acidez del agua, los minerales se disuelven durante la inyección, lo que puede abrir espacios porosos y caminos por donde fluya el agua (Snæbjörnsdóttir et al., 2020). Otros factores que afectan la mineralización del CO<sub>2</sub> son la permeabilidad y porosidad efectiva de las rocas. Los poros y fracturas proporcionan vías para la migración de fluidos y el acceso a superficies minerales.

En este trabajo se presentan algunos experimentos para llevar a cabo en el laboratorio con rocas ígneas de México y CO<sub>2</sub> disuelto en agua a presión elevada, con el objetivo de evaluar los cambios que

resulten de esta exposición en diferentes condiciones y periodos de tiempo para encontrar aquellas más favorables para la mineralización de CO<sub>2</sub> y la formación de otros minerales secundarios, tales como arcillas, zeolitas y anhidritas en las rocas ígneas estudiadas y aportar conocimiento sobre el potencial de almacenamiento de CO<sub>2</sub> en el país. Estas experiencias pueden ser muy enriquecedoras para las y los alumnos de las carreras de Ciencias de la Tierra debido al creciente interés en relación a la transición energética, la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> y el desarrollo de proyectos para mitigar las emisiones de dióxido de carbono de la industria del petróleo y el gas.

**Desarrollo experimental**

Se emplearon muestras de rocas ígneas, por su contenido de SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O (en porcentaje de masa) pueden denominarse basaltos o andesita (Zanettin, 1984), los cuales contienen plagioclasas de composición intermedia, sanidina, augita, enstatita y olivino tipo forsterita. Las muestras fueron recolectadas anteriormente por nuestro equipo para el desarrollo de la tesis "Análisis de la factibilidad para la eliminación de dióxido de carbono mediante la formación de carbonatos a través de basaltos", donde se reporta la recolección de siete muestras de rocas ígneas superficiales e intemperizadas (T01, T02, T03, T03a, T04, T05 y T06), correspondientes a edades de rocas volcánicas máficas del Plioceno Tardío-Cuaternario (<3 Ma) y rocas andesíticas del Mioceno (~19-10 Ma). Estas formaciones se encuentran entre los estados de Puebla, Tlaxcala e Hidalgo. Las muestras de roca seleccionadas para este estudio fueron T01 y T05, recuperadas en las coordenadas Longitud -98° 13'36.3" W, Latitud 19°25'54.0" N y Longitud -98°05'13.8" W y Latitud 19°41'24.4" N, respectivamente, (Figura 6, Cantú-Apodaca, 2018).

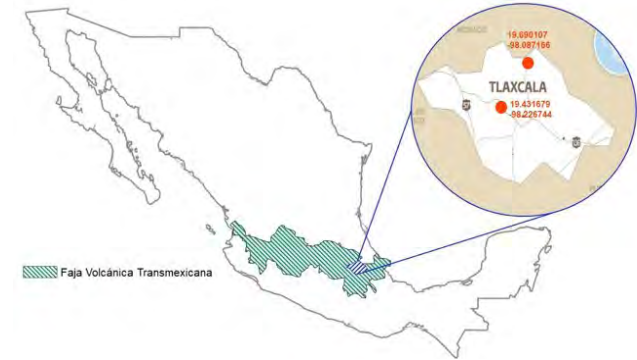


Figura 6. Mapa regional de México con ubicación de las muestras de roca T01 y T05 utilizadas para el desarrollo de este trabajo. Modificado de Cantú-Apodaca, 2018.

Además, se utilizó olivino como muestra control, debido a que este mineral comúnmente está presente en las rocas ígneas y existen diversos reportes en la literatura sobre su capacidad para reaccionar con el dióxido de carbono y fijarlo en forma de carbonatos estables (Kwon et al., 2011; Gadikota et al., 2020). La muestra se adquirió de Minerales Silvita. En la Figura 7 se presenta la metodología para el desarrollo de este trabajo.

Una vez que las muestras fueron limpiadas y pulverizadas, se sometieron a una caracterización previa, como se indica en la Figura 7, la cual consistió en la determinación de elementos mayores por fluorescencia de rayos X. Con la información generada se hizo un análisis de la composición química de las muestras y para las

pruebas experimentales se seleccionó T05, con la cual se realizaron cuatro experimentos (Tabla 2); además, simultáneamente se realizó el análisis petrográfico de todas las muestras de roca, lo cual auxilió en la selección de T05. Se ocuparon 3 g de roca molida (tamaño de partícula <74 µm), 1 kg de hielo seco y 1 L de agua destilada que se cargaron en una celda de acero inoxidable que soporta hasta 12 564 kPa (1800 psi) de presión y tiene una capacidad de 4.55 L. El intervalo de presión utilizado durante los experimentos fue de 5860 y 6550 kPa (800 a 950 psi) y se trabajó a temperatura ambiente. Los tiempos de exposición al CO<sub>2</sub> para cada experimento se muestran en la Tabla 2.

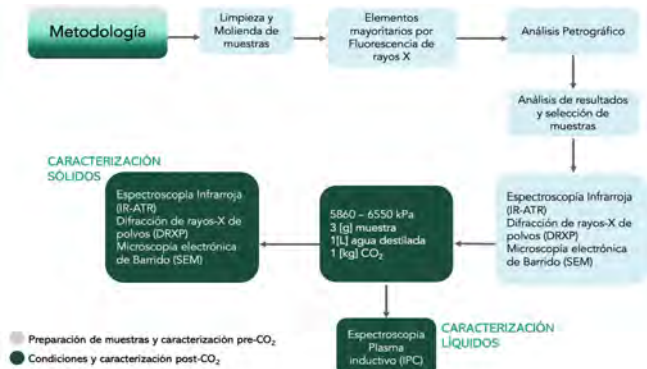


Figura 7. Diagrama de flujo indicando la metodología experimental seguida en este trabajo.

	Muestra	Tiempo de exposición (días)
1	Olivino	21
2		60
3	T05	21
4		30

Es importante señalar que, excluyendo el análisis petrográfico para el cual se usaron láminas delgadas de las rocas, en todos los experimentos se emplearon muestras pulverizadas para incrementar el área de contacto con CO<sub>2</sub> y reducir los tiempos de reacción para identificar evidencias de mineralización, además de facilitar el manejo y caracterización de las muestras.

Al concluir el tiempo de exposición, se abrió la celda para recuperar los sólidos y el agua. El sólido se filtró y se puso a secar en un horno a 40 °C por 24 h. El agua residual es recuperada y filtrada utilizando una membrana de la marca Corning de 0.20 µm y se caracteriza por espectroscopía de plasma inductivo (ICP por sus siglas en inglés). El sólido se analiza nuevamente por difracción de rayos X de polvos (DRXP), espectroscopía infrarroja (IR-ATR) y microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos.

Los equipos empleados para la caracterización de las muestras antes y después de los experimentos se enlistan a continuación (Almazán-Mendoza, J. 2022):

- Difracción de rayos X de polvos (PXR); equipo RX Bruker AX5 D8 Advance, 1°/min, potencia 30 kv, 30 mA, Instituto de Materiales UNAM.

- Fluorescencia de rayos X; con espectrómetro secuencial de rayos X (Rigaku Primus II) equipado con un tubo de rodio y ventana de berilio de 30 micras, Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM).

- Espectroscopía infrarroja (IR-ATR); *Agilent Instruments FTIR Cary 630 – ATR*, Laboratorio de Interacción Roca-Fluido, Fluido-Fluido, Facultad de Ingeniería UNAM.

- Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectrómetro de energía dispersiva (EDS) acoplado; Microscopio Electrónico de Barrido de ultra-alta resolución JSM-7800F, Instituto de Física de la UNAM.

- Espectroscopía de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) utilizando el equipo espectrómetro de masas con plasma inductivamente acoplado. Marca *Agilent Technologies*; Modelo: 7500ce LANGEM.

## RESULTADOS

### Caracterización pre-CO<sub>2</sub> y selección de muestras

La determinación de los elementos mayores (Tabla 3) por fluorescencia de rayos X y el análisis petrográfico de las muestras fueron esenciales para la selección de T05. De acuerdo con reportes en la literatura, al ser menos estables en condiciones ambientales respecto a los productos ígneos félsicos, las rocas máficas tienen mayor probabilidad de reaccionar con el CO<sub>2</sub> acuoso (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) mediante una reacción de meteorización de tipo ácido-base. Otra característica importante es la mayor concentración de iones calcio, magnesio y hierro que caracteriza las rocas máficas, los cuales forman carbonatos sólidos estables con el dióxido de carbono. Algunos minerales que presentan estas características son los olivinos y piroxenos que se encuentran típicamente en las rocas máficas. Por lo tanto, también se determinaron los elementos mayores en la muestra de referencia, el olivino. En la Tabla 3 se aprecian los resultados del análisis y resalta T05 como uno de los candidatos con menor contenido de SiO<sub>2</sub> (más máfico) y mayor contenido de MgO, CaO y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t, y presenta menores pérdidas por calcinación.

De manera simultánea se llevó a cabo el análisis petrográfico de todas las muestras de rocas. Por practicidad, en este trabajo sólo se presenta el análisis para T05; el análisis del resto de las muestras puede consultarse en la liga:

<https://drive.google.com/file/d/1OjoL1FFNTJRBfZ5OUiT9FW6egomBTRTj/view?usp=sharing>

La muestra T05 es una roca volcánica porfídica con fenocristales de olivino y plagioclasa embebidos en una matriz holocristalina de plagioclasa, clinopiroxeno, olivino y óxidos. Los fenocristales de olivino (Figura 8) son incoloros y de alto relieve en nicols paralelos, presentan formas subhedrales-anhedrales y exhiben una textura seriada con tamaños que varían desde finos hasta un máximo de 1.5 mm. Algunos cristales se encuentran típicamente fracturados, mientras que otros presentan alteración iddingsítica a lo largo de sus bordes. Algunos fenocristales están organizados en agregados glomerofídicos.

**Tabla 3.** Análisis de elementos mayores para las muestras de roca ígnea y olivino.

Componente	T01	T02	T03a	T03b	T04	T05	T06	Olivino
[%] masa								
SiO <sub>2</sub>	49.4	51.6	55	55	55.1	49.9	54.1	42.468
TiO <sub>2</sub>	1.96	1.58	1.01	1.01	1.1	1.68	0.95	0.064
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.8	16.3	17.8	17.7	17.8	17.9	17.2	0.791
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	11.1	9.32	7.02	6.98	7.22	10.1	8.22	9.197
MnO	0.11	0.13	0.08	0.08	0.08	0.12	0.08	0.106
MgO	5.76	6.12	5.58	5.52	5.08	6.87	5.94	46.977
CaO	8.65	8.1	8.31	8.28	7.82	8.67	7.86	0.482
Na <sub>2</sub> O	3.46	3.53	3.6	3.61	3.59	3.52	3.71	0.007
K <sub>2</sub> O	0.97	1.46	1.11	1.2	1.2	0.69	1.07	0.035
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.42	0.49	0.21	0.21	0.23	0.31	0.23	0.013
PXC	1.34	1.38	0.31	0.22	0.7	0.21	0.62	-0.14
Suma	100	100	100	99.8	100	100	100	100

Los escasos fenocristales de plagioclasa tienen formas anhedrales, tamaño fino (< 1 mm) y presentan evidencias de desequilibrio, como texturas de tamiz en el núcleo (Figura 9) o maclado cuneiforme. En la matriz se observan microlitos alargados de plagioclasa, clinopiroxeno verde pálido en nicols paralelos, microlitos de olivino parcial o completamente iddingsitizados, así como minerales opacos representados por magnetita y cristales alargados de ilmenita. En la matriz se reconocen dominios intergranulares y subófticos (cristales más grandes de clinopiroxeno engloban parcialmente a microlitos de plagioclasa; Figura 10).

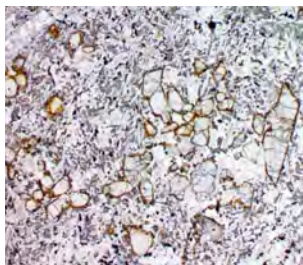


Figura 8.

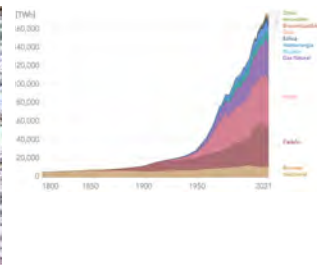


Figura 9.

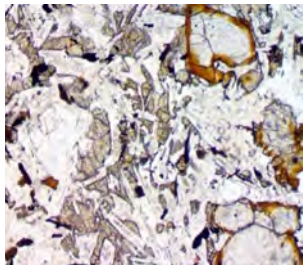


Figura 10.

Figura 8. La fotomicrografía, tomada en nicols paralelos, muestra fenocristales de olivino con textura seriata, los cuales están organizados en agregados glomerófidicos. Los olivinos se presentan típicamente fracturados y con bordes iddingsitizados. El lado largo de la imagen mide 4.2 mm.

Figura 9. La fotomicrografía, tomada en nicols cruzados, muestra un fenocristal de plagioclasa con textura de tamiz en su interior. El lado largo de la imagen mide 1 mm.

Figura 10. La fotomicrografía, tomada en nicols paralelos, muestra cristales de olivino con bordes iddingsitizados, así como cristales de clinopiroxeno y plagioclasa que forman una textura subóftica. El lado largo de la imagen mide 1 mm.

La caracterización del olivino y de T05 mediante DRXP, IR-ATR y SEM antes de llevar a cabo los experimentos, tiene como finalidad contar con una referencia del estado de las muestras previo a su exposición al dióxido de carbono. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4. Para la muestra de olivino se identificaron las fases forsterita y fayalita, lo cual coincide con los análisis por fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X de polvos (Figura 11). Cabe destacar que la fase mayoritaria es la forsterita. Es importante señalar que la muestra de olivino se adquirió en pedacera y el análisis más detallado reveló la presencia de enstatita, lo que dificultó la cuantificación de las fases del olivino, mientras que por microscopía electrónica de barrido (SEM) se encontró que el olivino presenta protuberancias o incrustaciones. En el caso de T05, se identificaron vibraciones que se asocian a la augita y andesina (Tabla 4) por el análisis de espectroscopía infrarroja.

El análisis por difracción de rayos X reveló que la composición de T05 presentaba minerales tipo olivino, ortopiroxenos (enstatita), piroxenos (augita) y plagioclasas (andesina). Como se mencionó anteriormente, en la literatura se ha reportado que los minerales con mayor potencial para la mineralización de CO<sub>2</sub> son los olivinos, seguidos de los piroxenos, y anfíboles. En el orden mencionado se incrementa la estabilidad de los minerales en condiciones ambientales y, por lo tanto, disminuye su capacidad para meteorizarse y reaccionar con el dióxido de carbono (Snæbjörnsdóttir *et al.*, 2020). En este sentido, las muestras seleccionadas para el desarrollo de este trabajo cuentan, teóricamente, con el potencial para reaccionar con dióxido de carbono disuelto en agua y formar sólidos estables como los carbonatos.

**Tabla 4.** Vibraciones obtenidas por espectroscopía infrarroja para el olivino y T05 antes de exponerlas a CO<sub>2</sub> (Lafuente *et al.*, 2015; Lazarev, 1972; Ortiz, 2020; Universidad del País Vasco, 2022; Johnson, 2012).

Vibración	Referencias Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Muestras utilizadas Número de onda (cm <sup>-1</sup> )
<b>Olivino</b>		
Fayalita; Fe <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )	1400, 860, 740, 400	836, 410
Forsterita; Mg <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )	980, 880, 610, 500, 410	950, 881, 605, 500, 410
<b>T05</b>		
Aluminosilicatos	1200, 1180, 960, 913, 888, 820, 751, 692	1160, 913, 744
Augita	1060, 950, 860, 630, 460	1095, 636, 422
Andesina	1007, 580, 536, 450, 366	1000, 573, 538, 420

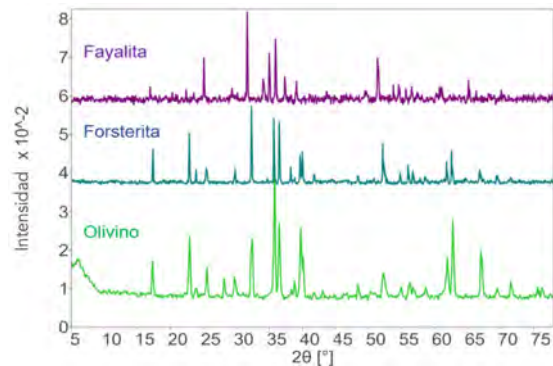


Figura 11. Gráfica comparativa de espectros de fayalita, forsterita y muestra de olivino sin exposición al CO<sub>2</sub> acuoso.

**Caracterización post-CO<sub>2</sub> de sólidos**  
**Muestra de olivino**

Después de 21 días de exposición a alta presión se encontraron vibraciones correspondientes a bicarbonatos en la muestra de olivino; sin embargo, su presencia no pudo confirmarse por ninguna otra técnica. Esto indica que la alteración de la muestra fue parcial, o bien, que los bicarbonatos no son un producto primario en la mineralización del CO<sub>2</sub>. Es importante señalar que no se observó ninguna otra evidencia de mineralización de dióxido de carbono a los 21 días de exposición. Por lo tanto, se llevó a cabo una prueba a presión elevada 6178 kPa (896 psi) por 60 días, sin alcanzarse las condiciones críticas del CO<sub>2</sub>. En este segundo experimento se observaron evidencias de carbonatos mediante espectroscopía infrarroja (Tabla 5) y no se observaron bicarbonatos a pesar de que se realizaron varias mediciones con distintas fracciones de la muestra. Lo anterior sugiere nuevamente que no toda la muestra expuesta al CO<sub>2</sub> reacciona al mismo tiempo y que hace falta homogeneizar el medio en el que está expuesto el olivino asegurando que el pH sea ácido, para que la roca se disuelva y posteriormente se formen carbonatos.

Otra posibilidad es que el medio no sea suficientemente ácido para llevar a cabo la mineralización de una mayor fracción de muestra. La presencia de carbonatos fue confirmada mediante el análisis de difracción de rayos X ya que se encontraron varias coincidencias con la magnesita (carbonato de magnesio), para los ángulos 2θ de 27°, 30°, 31°, 36°, 65° y 70°. (Figura 12). También se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM) para identificar cambios en la textura y el crecimiento de incrustaciones minerales sobre la superficie de la muestra. Después de 21 días de exposición a dióxido de carbono se observó (Figura 13) que la muestra sufrió cambios en la superficie, es decir, las caras del mineral presentan

Tabla 5. Vibraciones infrarrojo para las muestras de olivino antes de ser expuestas (Lafuente <i>et al.</i> , 2015; Lazarev, 1972; Ortiz, 2020; Universidad del País Vasco, 2022).			
Vibración	Referencia	Olivino, 21 días	Olivino, 60 días
<b>Número de onda (cm<sup>-1</sup>)</b>			
Fayalita; Fe <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )	1400,860, 740, 400	836, 410	836, 410
Forsterita; Mg <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )	980,880, 610, 500, 410	950,881, 605, 500, 410	950,881, 605, 500, 410
Carbonatos	875-850, 1450-1400	-	836, 881, 1380
Bicarbonatos	650-665, 685-720, 820-850, 990-1015	660, 720, 836, 1034	-

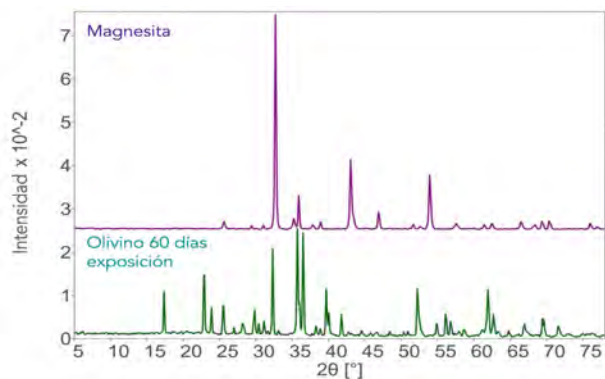


Figura 12. Gráfica comparativa de espectros DRXP del olivino expuesto a alta presión y magnesita (MgCO<sub>3</sub>).

considerablemente menos incrustaciones después de la exposición de CO<sub>2</sub>, lo cual puede deberse a la disolución parcial de la superficie de la muestra más lisa.

Para la muestra expuesta a CO<sub>2</sub> por 60 días se encontró un fragmento grisáceo de roca que llamó la atención por su forma y textura; al analizar detalladamente su composición por energía dispersiva se reveló que la roca estaba compuesta principalmente por átomos de C, O, Si y trazas de Ca y Fe, además presentaba incrustaciones de Mg. Esto permite confirmar la presencia de carbonatos de magnesio observados por medio de las otras técnicas utilizadas.

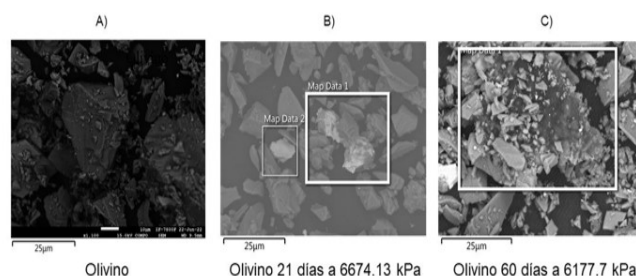


Figura 13. Imagen comparativa de las muestras de olivino después de ser expuestas a CO<sub>2</sub> en condiciones de alta presión. A) muestra de olivino sin exposición a dióxido de carbono. B) muestra de olivino expuesta a CO<sub>2</sub> acuoso (968 psi; 25 °C) por 21 días, C) olivino expuesto a CO<sub>2</sub> acuoso (896 psi; 25 °C) por 60 días. Los recuadros blancos indican la zona analizada por energía dispersiva para conocer la composición de la muestra.

**Muestra T05**

El análisis de T05 expuesta a dióxido de carbono por 21 días no arrojó ninguna evidencia de cambio. Por lo tanto, se llevó a cabo una prueba por 30 días. Después de transcurrido el tiempo de reacción se observó la aparición de vibraciones de bicarbonato; sin embargo, no fue posible corroborar su presencia con otra técnica. La Tabla 6 presenta las señales más representativas para la muestra T05. A los treinta días de exposición la formación de carbonatos aún no es evidente y prevalece la formación de compuestos secundarios y menos estables que los carbonatos. Lo anterior indica que se requiere más tiempo de reacción para las rocas ígneas, como T05, en comparación con el mineral olivino, debido a que T05 se trata de un sistema mucho más complejo y la formación de carbonatos toma más tiempo que para muestras composicionalmente más sencillas como el olivino. En la literatura se ha reportado que la exposición de basaltos a CO<sub>2</sub> puede formar arcillas, zeolitas, wollastonita, hidróxidos de aluminio y hierro, por mencionar algunos minerales, lo cual hace mucho más complejo y lento el proceso de mineralización de CO<sub>2</sub> en rocas ígneas (Zhenxue *et al.*, 2020; Akono *et al.*, 2019; Young *et al.*, 2012).

Tabla 6. Vibraciones infrarrojo para las muestras de roca ígnea antes de ser expuestas (Lafuente <i>et al.</i> , 2015; Lazarev, 1972; Ortiz, 2020; Universidad del País Vasco, 2022; Johnson, 2012).		
Vibración	Referencia	T05, 30 días
<b>Número de onda (cm<sup>-1</sup>)</b>		
Aluminosilicatos	1200, 1180, 960, 913, 888, 820, 751, 692	1211, 948
Augita	1060, 950, 860, 630, 460	1080, 615, 450
Andesina	1007, 580, 536, 450, 366	1000, 573, 538, 420
Bicarbonatos	650-665, 685-720, 820-850, 990-1015	654, 715, 815, 1080



Tras 30 días de prueba, la muestra T05 se analizó por difracción de rayos X de polvos y se comparó con la muestra sin exponer a dióxido de carbono (Figura 14). Se encontraron pocas diferencias entre los patrones de difracción, como la disminución en la cristalinidad y tres señales en los ángulos 2θ correspondientes a 20°, 34° y 75°. El análisis detallado de esta técnica permitió identificar trazas de arcillas de tipo caolinítico, lo cual coincide con lo discutido previamente. Para esta prueba también se utilizó microscopía electrónica de barrido y los resultados se presentan en la Figura 15; se observaron zonas brillantes en las caras de T05 a 21 y 30 días en comparación con la muestra sin exposición a CO<sub>2</sub>; en las zonas brillantes se acumula densidad electrónica alta, lo cual corresponde a elementos de masa molecular elevada, que es el caso de los metales, como el hierro.

Debido a que hubo una disolución de algunas especies minerales al entrar en contacto con el CO<sub>2</sub>, éstas se precipitan nuevamente formando sólidos estables. Además, se observó un fragmento amorfo y oscuro, muy diferente a las imágenes vistas anteriormente, que puede estar relacionado con la formación de bicarbonatos. Un análisis más detallado de composición por energía dispersiva (EDS) reveló que el fragmento amorfo estaba compuesto principalmente por átomos de oxígeno, hierro, silicio, aluminio y carbono (38.78, 19.13, 17.36, 9.81 y 2.63 %, respectivamente), además de sodio, magnesio, potasio, calcio y titanio con concentración menor al 2 %.

**Caracterización post-CO<sub>2</sub> de líquidos**

El agua de los experimentos se recuperó al término de los mismos y fue analizada mediante espectroscopía de plasma inductivo (ICP). Esta técnica permite cuantificar los iones disueltos en el agua, los

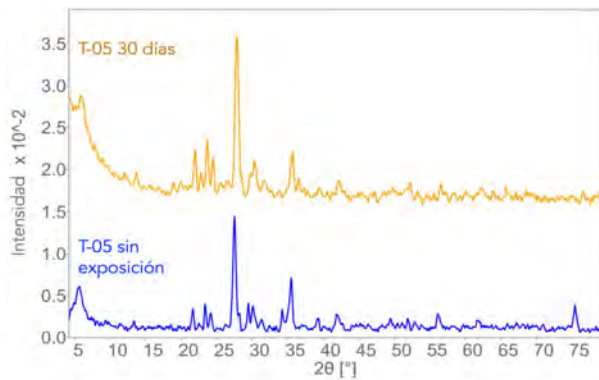


Figura 14. Comparación de espectros DRX de T05 antes y después de ser expuesta a CO<sub>2</sub>.

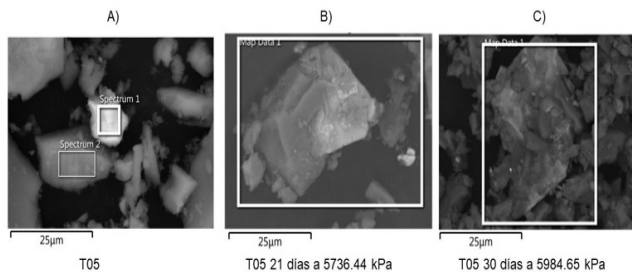


Figura 15. Comparativa de las muestras de roca ígnea después de ser expuestas a CO<sub>2</sub> a condiciones de alta presión. A) muestra T05 sin exposición a dióxido de carbono. B) muestra T05 expuesta a CO<sub>2</sub> acuoso (832 psia; 25 °C) por 21 días. C) muestra T05 expuesta a CO<sub>2</sub> acuoso (868 psia; 25 °C) por 30 días. Los recuadros blancos indican la zona analizada por energía dispersiva para conocer la composición de la muestra.

cuales son producto de la interacción entre las muestras de roca y el CO<sub>2</sub>. A continuación se presentan los resultados obtenidos para los experimentos post-exposición a dióxido de carbono para el olivino y T05 a 60 y 30 días, respectivamente (Tabla 7).

Es evidente que la interacción entre el agua ácida y las muestras de roca promueve la liberación de diferentes iones que se solubilizan, lo que confirma que las muestras de roca ígnea empleadas son sensibles al dióxido de carbono acuoso. Algunos de los iones de interés son el Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> y Si<sup>4+</sup>. Sin embargo, con estos datos no podemos conocer la concentración total de iones de interés que se disuelven al entrar en contacto con el CO<sub>2</sub> ni la concentración de iones que se combinan con otras especies en disolución y se reprecipitan en forma de carbonatos, bicarbonatos u otras especies minerales.

Cabe resaltar que la preservación de las muestras es importante para la cuantificación de los elementos; por ejemplo, en el caso del ion hierro, su determinación puede dificultarse, ya que éste se oxida con mucha facilidad produciendo óxidos de hierro (III) que forman sólidos rojizos muy finos. Al comparar los resultados obtenidos con los experimentos a presión elevada contra experimentos a condiciones de presión atmosférica se encontró que para alta presión hay una cantidad mucho menor de iones disueltos en agua. Es probable que las condiciones de alta presión promuevan la reprecipitación de otras especies en mucho menos tiempo, lo cual provoca las bajas concentraciones de hierro encontradas en el agua (Almazán-Mendoza, 2022).

**Tabla 7.** Análisis cuantitativo de iones disueltos en el agua residual de las muestras. \*Límite práctico de cuantificación.

Ion(mg/L)	Agua destilada	Olivino, 60 días	T-05, 30 días
Ca <sup>2+</sup>	0.088	4.542	7.393
Fe <sup>2+</sup>	<LPC*	9.106	2.482
Mg <sup>2+</sup>	0.035	49.092	3.543
K <sup>+</sup>	<LPC	2.520	0.990
Mn <sup>2+</sup>	<LPC	0.204	1.278
Na <sup>+</sup>	<LPC	1.444	2.734
Si <sup>4+</sup>	<LPC	26.017	7.261

**CONCLUSIONES**

Los resultados de este trabajo muestran que las rocas ígneas analizadas presentan propiedades prometedoras para mineralizar CO<sub>2</sub> de manera estable. La magnesita (MgCO<sub>3</sub>) identificada en el mineral de referencia indica que es necesario exponer por lo menos 60 días las rocas ígneas, ya que al olivino le tomó este tiempo para mostrar evidencias de mineralización con CO<sub>2</sub>. Muy probablemente, la muestra T05 tendrá que exponerse a más de 60 días para observar evidencias de carbonatos debido a su complejidad mineralógica y petrológica. Las muestras de rocas ígneas colectadas en este estudio contienen minerales necesarios para la mineralización de CO<sub>2</sub>; sin embargo, son rocas en algunos casos intemperizadas, lo que puede complicar el estudio. Otra característica importante de este tipo de rocas es que son bastante cristalinas: posiblemente el uso de muestras vítreas o vesiculares podrían ser de mayor utilidad para este tipo de experimentos y la obtención de carbonatos y bicarbonatos.

El desarrollo de este tipo de prácticas de laboratorio es altamente recomendable para alumnas y alumnos de servicio social y tesis de licenciatura y posgrado debido a que se requiere de una cantidad importante de horas para los experimentos. Actualmente, se trabaja en el desarrollo de otras propuestas de laboratorio que permitan reducir considerablemente los tiempos con el empleo de ácidos y bases para catalizar la mineralización del dióxido de carbono en el laboratorio, inclusive utilizando condiciones de presión atmosférica. Además, se trabaja en el análisis de las diferentes rocas ígneas del país para identificar localidades y muestras más prometedoras e incrementar las pruebas de laboratorio, con base en el trabajo de Gómez-Tuena *et al.*, (2018).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto PAPIIT IA105621 "Evaluación de rocas ígneas para almacenar dióxido de carbono a través de la formación de carbonatos", así como al Dr. Samuel Tehuacanero Cuapa (Instituto de Física, UNAM), a la Mtra. Adriana Tejada Cruz (Instituto de Ingeniería de Materiales, UNAM), al M. en C. Javier Tadeo León (Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, UNAM), al Q. Rufino Lozano Santa Cruz (Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, UNAM) y a la Dra. Teresa Pi Puig (Instituto de Geología, UNAM) por el apoyo durante los análisis de las muestras. AMJH agradece el apoyo de Julieta Villegas González y Hugo Sandoval Colín. Se agradece a los revisores, especialmente a Moisés Dávila Serrano, por sus valiosos comentarios para mejorar este trabajo.

## REFERENCIAS

- Akono, A.T., Druhan, J. L.; Davila, G.; Tsotsis, T.; Jessen, K.; Werth, C. J., (2019). A review of geochemical-mechanical impacts in geological carbon storage reservoirs. *Greenhouse Gases-Science and Technology*, 9 (3), 474-504. DOI: 10.1002/ghg.1870
- Almazán-Mendoza, J. (2022). Identificación de parámetros físicos para la mineralización de CO<sub>2</sub> en olivino y rocas ígneas. [Tesis de licenciatura, UNAM].
- Cantú-Apodaca, E. (2018). Análisis de la factibilidad para la eliminación de dióxido de carbono mediante la formación de carbonatos a través de basaltos. [Tesis de licenciatura, UNAM].
- Carbfix. (2023). How it works. Carbfix.Com. Enerdata. (2023). Producción energética total. Datos.enerdata. <https://datos.enerdata.net/energia-total/produccion-energetica-mundial.html>
- Gadikota, G., Matter, J., Kelemen, P., Brady, P. v., Park, A. H. A. (2020). Elucidating the differences in the carbon mineralization behaviors of calcium and magnesium bearing aluminosilicates and magnesium silicates for CO<sub>2</sub> storage. *Fuel*, 277, 0016-2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117900>
- Global CCS Institute (2020). Remove: Carbon Capture and Storage. [globalccsinstitute.com](http://globalccsinstitute.com).
- Gómez-Tuena, A., Mori, L. y Straub, S. M. (2018). Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Transmexican Volcanic Belt. *Earth-Science Reviews*, 183, 153–181.
- IEA. (2022). CO<sub>2</sub> Capture and Utilisation. [iea.org](http://iea.org).
- Johnson, J. (2012). Thermal infrared spectra of experimentally shocked andesine anorthosite. *Icarus*, 221, 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.08.012>
- Kwon S., Fan M., DaCosta H. F. M., y Russell A. G. (2011). Factors affecting the direct mineralization of CO<sub>2</sub> with olivine. *Journal of Environmental Sciences*, 23(8), 1233–1239. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60555-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60555-4)
- Macías-Navarro L. (2020) *Revista México Actúa*. Número 1, 4 – 6.
- McGrail, B. P., Schaef, H. T., Spane, F. A., Horner, J. A., Owen, A. T., Cliff, J. B., Qafoku, O., Thompson, C. J., y Sullivan, E. C. (2017). Wallula Basalt Pilot Demonstration Project: Post-injection Results and Conclusions. *Energy Procedia*, 114, 5783–5790. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1716>
- MeCCS. (s.f.). CCS y sostenibilidad. [Meccs.Org.Mx](http://Meccs.Org.Mx). Consultado el 10 de febrero de 2023.
- Naciones Unidas. (2023). COP26: Juntos por el planeta: [un.org](http://un.org)
- Raza, A., Glatz, G., Gholami, R., Mahmoud, M., y Alafnan, S. (2022). Carbon mineralization and geological storage of CO<sub>2</sub> in basalt: Mechanisms and technical challenges. *Earth-Science Reviews*, 229, 0012-8252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104036>
- Ritchie H., Roser M., y Rosado P. (2022)- "Energy". [Ourworldindata](http://Ourworldindata).
- Secretaría de Energía. (2018). Mapa de Ruta Tecnológica, CCUS.
- Shukla, R., Rankith, P., Haque, A., Choi, X., (2010). A review of studies on CO<sub>2</sub> sequestration and caprock integrity. *Fuel*, 89, 2651-2664. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.012>
- Snæbjörnsdóttir, S., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S. R., y Oelkers, E. H. (2020). Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(2), 90–102. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>
- Staib, C., Zhang, T., Burrows, J., Gillespie, A., Havercroft, I., Rassool, D., Consoli, C., Liu, H., Erikson, J., Loria, P., Nambo, H., Wu, Y., Judge, C., y Gebremedhin, R. (2021). Global Status of CCS 2021.
- White, S. K., Spane, F. A., Schaef, H. T., Miller, Q. R. S., White, M. D., Horner, J. A., y McGrail, B. P. (2020). Quantification of CO<sub>2</sub> Mineralization at the Wallula Basalt Pilot Project. *Environmental Science and Technology*, 54 (22), 14609–14616. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05142>
- Young-Shin J., Giammar D., y C. J. Werth. (2012). Impacts of Geochemical Reactions on Geologic Carbon Sequestration. *Environmental Science and Technology* 47 (1), 3-8. <https://doi.org/10.1021/es3027133>
- Zanettin B. (1984). Proposed New Chemical Classification of Volcanic Rocks. *Journal of International Geoscience*, 7 (4), 19-19. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1984/v7i4/003>
- Zhenxue D., L. Xu, T. Xiao, B. McPherson, X. Zhang, L. Zheng, S. Dong, Z. Yang, M. R. Soltanian, C. Yang, W. Ampomah, W. S. Yin, T. Xu, D. Bacon, H. Viswanathan. (2020). Reactive chemical transport simulations of geologic carbon sequestration: Methods and applications. *Earth-Science Reviews*, 208, 0012-8252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103265>

Manuscrito recibido: 18 de abril de 2023

Manuscrito corregido recibido: 18 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 26 de mayo de 2023

# EXCURSIONES GEOLÓGICAS VIRTUALES: UNA HERRAMIENTA PARA LA DOCENCIA Y LA DIFUSIÓN DE LA GEOLOGÍA DE MÉXICO. EJEMPLO TRANSECTO DURANGO-MAZATLÁN

Enrique González-Torres <sup>1\*</sup>, Luca Ferrari <sup>2</sup>, Sergio Macías-Medrano <sup>1</sup> y Javier Mancera-Alejándrez <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Avenida Universidad 3000, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

<sup>2</sup>Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México Campus Juriquilla. Boulevard Juriquilla 3001, Querétaro, C.P. 76230, México.

\*eagtgaia@unam.mx (autor para correspondencia)

## RESUMEN

Las Excursiones Geológicas Virtuales (EGV) constituyen un recurso para la docencia y difusión de la Geología de México como complemento de la enseñanza y el aprendizaje para los estudiantes. Las EGV tienen varias ventajas entre las que destacan, que los datos e imágenes se pueden presentar en varias escalas y perspectivas casi en forma simultánea o su permanencia en los medios digitales lo que hace posible que los estudiantes las puedan consultar repetidamente. Además, permiten superar diversas limitaciones de visitas presenciales, como la escasez de recursos económicos necesarios para su realización, la cantidad limitada de personas que pueden participar, la falta de seguridad que se registra en algunas regiones del país o casos limitantes como la reciente pandemia de COVID-19. Este trabajo busca compartir los aspectos centrales de la metodología utilizada para la realización de las EGV, que es resultado de la experiencia obtenida durante el desarrollo de este proyecto. La EGV que se presenta, se realizó a lo largo de la autopista Durango - Mazatlán, que constituye un transecto clásico de la geología del sector central de la provincia de la Sierra Madre Occidental, donde se pueden observar algunos de los rasgos estratigráficos y tectónicos más relevantes de la región.

**Palabras clave:** Excursión Geológica Virtual, Sierra Madre Occidental, Autopista Durango-Mazatlán, Geología de México, drones, virtualidad.

## ABSTRACT

*The Virtual Geological Field Trips (VGFT) constitute a resource for teaching and spreading of the knowledge of Mexico's Geology. It is a complement for the classroom and for students' learning. The VGFT have several advantages, among which stand out the presentation of data and images in several scales and perspectives almost simultaneously, their permanence in the digital media that make it possible for students to consult them repeatedly. They also allow to overcome various limitations of face-to-face visits, such as the scarcity of economic resources necessary for their realization, the limited number of people who can participate, the lack of security that is registered in some regions of the country, and restrictions like that of the COVID-19 pandemics. This work seeks to share the central aspects of the methodology used for the realization of the VGFTs, which is the result of the experience obtained during this project's development. The example of the VGFT that is presented was carried out along the Durango - Mazatlan highway, which constitutes a classic transect of the Sierra Madre Occidental central sector's geology, where some of the most relevant stratigraphic and tectonic features of the region can be observed.*

**Keywords:** Virtual geological field trip, Sierra Madre Occidental, Durango-Mazatlan Highway, Geology of Mexico, drones, virtuality.

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan algunas de las características más relevantes de las Excursiones Geológicas Virtuales (EGV) y la metodología diseñada para su realización. Las EGV constituyen una herramienta para complementar el proceso de enseñanza-aprendizaje y la difusión de la geología de México. Como caso de estudio se muestra la excursión Durango - Mazatlán, un transecto clásico del sector central de la provincia geológica de la Sierra Madre Occidental.

La enseñanza de la geología de México es parte fundamental en la formación de estudiantes de Ciencias de la Tierra. Su relevancia se debe a que el trabajo que desarrollan los geocientíficos requiere conocer la información geológica disponible de diferentes regiones del país para su análisis y aplicación en diversas ramas de la ingeniería y de otras disciplinas, como la exploración de recursos minerales, hídricos o energéticos.

De manera tradicional su impartición consiste principalmente en exposiciones por parte del profesor, participar en conferencias con especialistas de diferentes regiones del país, lecturas de artículos científicos, la revisión de cartografía geológica en diferentes escalas, por ejemplo, y cuando es posible, asistir a una excursión geológica de algunos días a regiones cercanas del país. Es casi imposible, complementar estos cursos con varias prácticas de campo que permitan conocer el amplio registro estratigráfico que soporta la evolución geológica y tectónica de México.

Por otra parte, el avance tecnológico y la asequibilidad de dispositivos que permiten documentar de manera fotográfica y videográfica sitios con importancia geológica, así como la integración de esta información en mapas interactivos disponibles en la web, han permitido generar diferentes modelos de "excursiones de campo virtuales (*Virtual Field Trips*)" (Qiu y Hubble, 2002).

En este sentido en la Facultad de Ingeniería de la UNAM se ha planteado la conceptualización de las visitas o Excursiones Geológicas Virtuales (<https://drones.unam.mx/visitas-geologicas>) como una herramienta docente que permita a los estudiantes acercarse a sitios de relevancia geológica con el acompañamiento de especialistas de la zona de interés.

Inicialmente las EGV, fueron definidas como un conjunto de imágenes apoyadas con textos y/o otros recursos digitales, las cuales han ido evolucionado como herramientas más sofisticadas integrando gráficos de alta resolución, audio, video, imágenes 360° en entornos de análisis de datos especializados como los Sistemas de Información Geográfica (Cassady, *et al.*, 2008; Dolphin, *et al.*, 2019; Ruberto *et al.*, 2023).

De manera particular las EGV que estamos realizando buscan atender la necesidad de acercamiento de los interesados de Ciencias de la Tierra a sitios representativos de la Geología de México de forma virtual complementando su formación. Además, al ser recursos dispuestos en la web de forma abierta y permanente, también serán recursos que contribuirán a su difusión, podrán ser ampliamente difundidas. En ellas se aprovechan los conocimientos y experiencia de especialistas de cada región seleccionada, quienes guiarán a los interesados a través de mapas interactivos digitales en ambiente web utilizando la información geológica disponible para cada punto de interés. Estos materiales permiten realizar observaciones de campo de carácter multiescalar casi simultáneas y desde diferentes perspectivas (Qiu y Hubble, 2002; Ruberto *et al.*, 2023).

Un compendio de EGV pone al alcance de cualquiera la posibilidad de conocer sitios representativos de la geología de México sin que sean temas limitantes como la seguridad, la cantidad de participantes, los recursos económicos necesarios para su realización e incluso la posibilidad de que se interrumpan las actividades presenciales por cualquier motivo como la situación de la pandemia COVID-19.

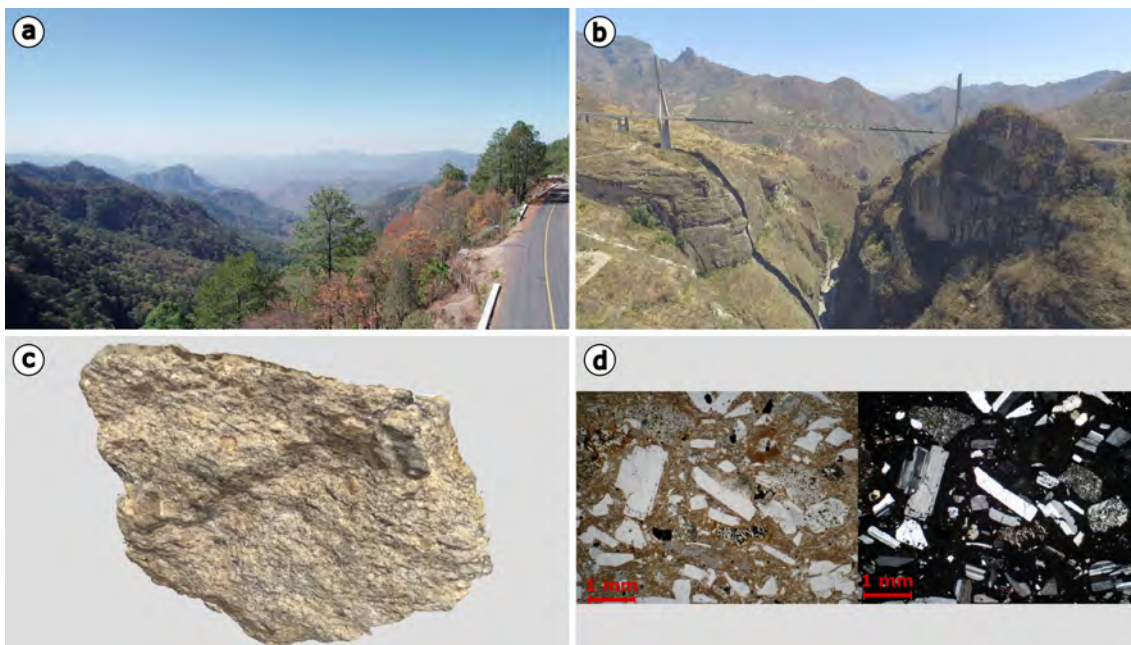


Figura 1. Observaciones geológicas multiescalares: a. Vista panorámica desde el Espinazo del Diablo hacia el valle del río Baluarte. b. Afloramiento en la base del puente Baluarte. c. Muestra de mano de ignimbrita y d. Microfotografía en luz paralela y nicols cruzados de lámina delgada de una ignimbrita.

La colección de EGV se complementa con otros recursos digitales como las “Cátedras Selectas de Geología de México”, que son conferencias magistrales virtuales que se transmitieron en vivo entre 2020 y 2021 durante el confinamiento provocado por la pandemia y que fueron organizadas por el Instituto de Geología y la Facultad de Ingeniería a través de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la UNAM, acervo que quedó grabado y disponible para todo el público en forma permanente en:

[http://www.dict.unam.mx/Catedras\\_Selectas\\_de\\_Geologia\\_de\\_Mexico.php](http://www.dict.unam.mx/Catedras_Selectas_de_Geologia_de_Mexico.php)

Las excursiones geológicas de campo continúan siendo fundamentales en la formación de los estudiantes de las geociencias, debido a que contribuyen al desarrollo de habilidades como observar, reconocer, describir y cartografiar las unidades litológicas así como sus relaciones geométricas y temporales en el campo. Sin embargo, las EGV ofrecen la oportunidad de complementar dichas habilidades a nivel multiescalar sin la necesidad de estar en el sitio y aprovechar el entorno de la web (Figura 1).

La EGV “Transecto Durango-Mazatlán” forma parte de la colección de excursiones que se están preparando para documentar sitios en las diferentes provincias geológicas de México en el marco del proyecto PAPIME PE106422 “Excursiones geológicas virtuales: una herramienta para la docencia y la difusión de la geología de México” y buscan contribuir a que los estudiantes e interesados tengan una experiencia cercana a una visita de campo presencial.

## METODOLOGÍA

La metodología que aquí se describe tiene como propósito crear EGV a través de un flujo de trabajo reproducible y que contempla dos elementos principales. El primero se relaciona con la recopilación del conocimiento de especialistas en torno a una región de interés. El segundo apunta a transmitir el conocimiento empleando estrategias docentes distintas a las convencionales, a través de un entorno web en donde converja dicho conocimiento, en conjunto con la incorporación de información interactiva derivada de drones, sistemas de información geográfica, fotogrametría y edición videográfica, que ha sido alojada en diversas redes sociales y/o unidades de almacenamiento virtuales.

De esta manera, se busca conducir al usuario durante la navegación en la EGV a partir de un conjunto de PI (puntos de interés) pertinentes para explicar la geología de una zona en particular.

El flujo de trabajo se divide en 4 etapas, tal y como lo muestra la Figura 2:

1. Desarrollo del entorno web.
2. Trabajo de campo.
3. Trabajo de gabinete.
4. Retroalimentación de la información.

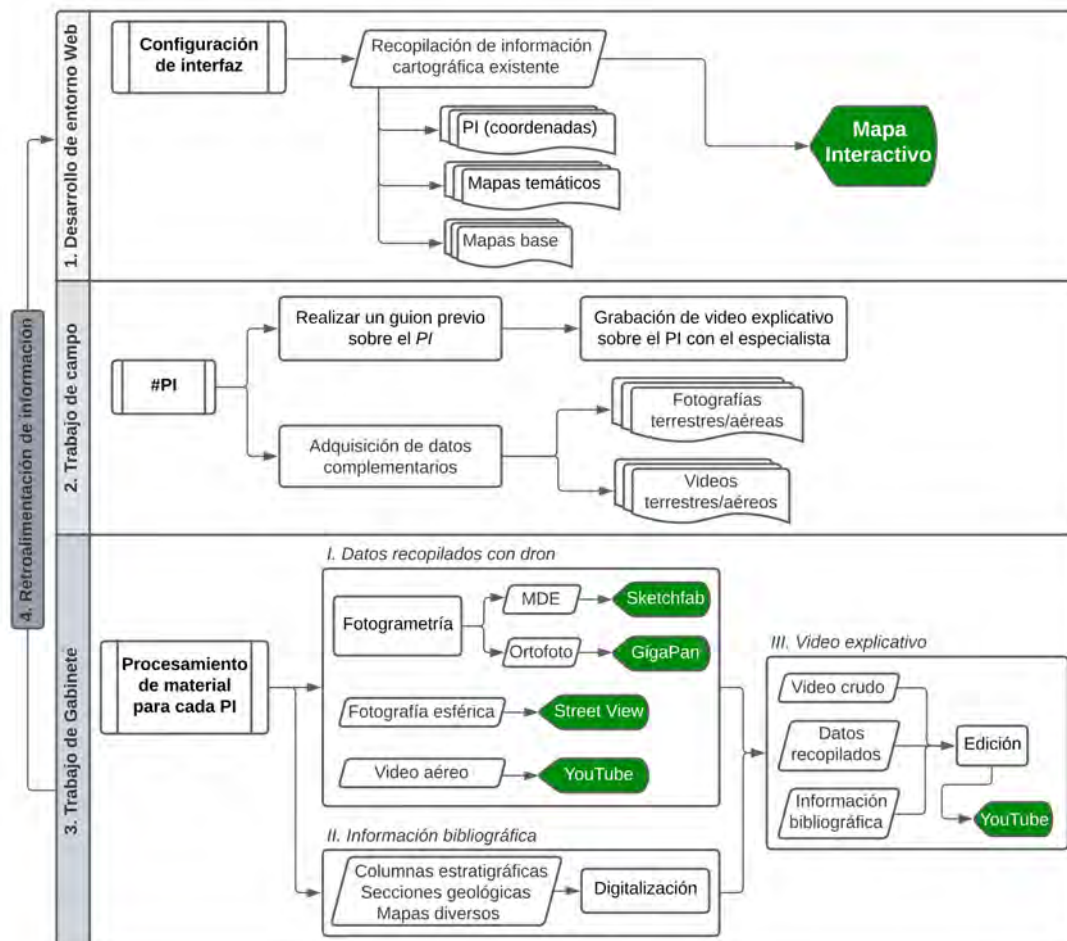


Figura 2. Flujo de trabajo de la metodología para la realización de las EGV. MDE: Modelo Digital de Elevación; PI: Punto de interés.

## Etapa 1. Desarrollo del entorno web

Esta etapa tiene como finalidad crear un entorno en el que se comunique de manera didáctica el conocimiento geológico, por medio del potencial de diversos medios digitales para interactuar con videos, imágenes, mapas y modelos 3D integrados a cada PI, que funcionen como insumos principales de la excursión en cuestión, de la zona o región de interés y de la adquisición de datos en campo. Lo anterior nos lleva a definir dos subniveles de trabajo, ya que en primera instancia se contempla la configuración de la interfaz y, posteriormente, retroalimentar con información derivada de los trabajos de campo y gabinete.

Las EGV se trabajan en un entorno web (Figura 3), ya que es un ambiente de desarrollo versátil para su difusión, configurable de acuerdo con las necesidades de cada EGV con mantenimiento permanente y actualización de la página y, sobre todo, es compatible con diversas librerías incorporables como *Leaflet*, diseñada para el desarrollo de mapas que cumple con el propósito de la navegación interactiva y aporta una herramienta de comunicación relevante dentro del conocimiento geológico.



Figura 3. Entorno web y su interacción con las diferentes plataformas digitales utilizadas en las EGV.

Dicha librería se desarrolla por medio del lenguaje *JavaScript* con licencia libre y de código abierto, lo cual, dentro de un contexto docente, es sumamente valioso. En este sentido, la utilidad del primer subnivel consiste en configurar la interfaz sobre la cual se estará trabajando durante el desarrollo de la EGV. En ella, se contempla el diseño del mapa a partir de la integración de los PI y su extensión espacial, así como también la incorporación de mapas base (imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, mapas de sombra, localidades y vías de comunicación) y como parte fundamental la cartografía especializada que represente lo explicado por el especialista.

Este trabajo requiere de coordinación entre el guía de la excursión y el equipo de trabajo encargado del desarrollo tecnológico para recopilar la información existente sobre cartografía y conducirla a un proceso de digitalización o conversión de formatos para posteriormente integrarla al entorno web.

## Etapa 2. Trabajo de campo

El trabajo de campo tiene como finalidad recopilar la información necesaria que se incorporará a la EGV para cada uno de los PI que se han contemplado. En este sentido, dicha información consiste en videos explicativos del sitio y en la adquisición de datos adicionales. El equipo utilizado para la adquisición de información de campo consta de cámara y tripié, micrófonos inalámbricos, drones y estabilizador de cámara (Figura 4).

Para el caso de los videos explicativos, se sugiere al especialista definir las ideas de lo que se pretende explicar en cada uno de los PI a modo de guion y con el cual se pueda realizar una secuencia lógica la explicación sobre la geología a lo largo de la EGV.



Figura 4. Equipo utilizado en campo: a. Dron DJI Air 2S; b. Cámara Sony a7 con receptor de sonido Boya montados en tripié; c. Emisoras de sonido con micrófonos Lavalier Boya; d. Cámara de acción 360 GoPRO MAX.

La adquisición de datos gira principalmente en torno al manejo de los drones y las aptitudes que puede proporcionar dentro del contexto de las excursiones, cómo la perspectiva panorámica, la altura de observación y la visión total a 360° tanto de fotografías, como de videos.

Este último punto abre un abanico de posibilidades muy amplio que incluye fotografías esféricas, ortomosaicos de alta resolución o el desarrollo de fotogrametría, con la finalidad de obtener modelos 3D de rasgos relevantes del relieve. Estos modelos servirán para ilustrar el video explicativo y de acuerdo con su pertinencia, como elementos adicionales aprovechando su capacidad interactiva para reforzar el conocimiento.

## Etapa 3. Trabajo de gabinete

Esta es la última etapa de la metodología en donde se procesa la información, tanto la recabada en campo como la que está disponible en diversas referencias bibliográficas y que está referenciada en alguno de los elementos generados. Por tal razón, tiene que ser dividida en tres grandes grupos definidos de la siguiente manera:

- I. Datos recopilados con dron.
- II. Información bibliográfica.
- III. Video explicativo.

Hay que destacar que antes de comenzar el procesamiento de la información se debe hacer una síntesis de lo que se comenta en cada video explicativo, con la finalidad de tener un contexto amplio de los materiales que se necesitan considerar para la excursión.

Una vez mencionado lo anterior, los grupos I y II se pueden trabajar de manera simultánea y en cada uno de ellos se generarán diversos productos que irán retroalimentando al mapa interactivo a través de las plataformas *Sketchfab*, *GigaPan*, *Street View* o *YouTube*, de acuerdo con la naturaleza de cada producto.

Dado que las EGV se encuentran en un entorno web, esta información generada puede incorporarse a través de las plataformas digitales sin conflicto del manejo de plataformas de terceros.

### Grupo I. Datos recopilados con dron

Dado que el dron nos permite emplear diversas aplicaciones de adquisición de datos como captura de video o fotografía y ejecución de vuelos fotogramétricos, la diversidad de medios digitales es amplia y el material se debe clasificar de acuerdo con el tipo de proceso, como es la edición videográfica o el procesamiento fotogramétrico.

Para el material videográfico, gran parte se emplea para ilustrar el video explicativo del especialista, contemplando incluso fotografías panorámicas; sin embargo, en el caso de las fotografías esféricas, existe la posibilidad de interacción desde *Street View* (ver por ejemplo el 'PI 7. Espinazo del Diablo' de la EGV Durango-Mazatlán). En cuanto al procesamiento fotogramétrico, los productos derivados tienen principalmente dos salidas, por un lado, *Sketchfab* para visualizar modelos 3D y por otro *GigaPan* para acceder a las fotografías de alta resolución.

### Grupo II. Información bibliográfica

El grupo II está destinado para trabajar en primera instancia en la recopilación de información bibliográfica pertinente, incluyendo gran parte del material que el especialista ha generado y publicado en diversas investigaciones. Posteriormente, será necesario pasar el material por un proceso de digitalización con la finalidad de incorporarlo principalmente al video explicativo. Este material es diverso, aunque depende en gran medida de lo que se pueda disponer en ese momento; sin embargo, en su mayoría está conformado por columnas estratigráficas, secciones geológicas o mapas con diferentes temáticas.

### Grupo III. Video explicativo

Para concluir este proceso, se procede con la edición del video explicativo que tiene como finalidad guiar la EGV punto por punto, por lo que cada uno de los videos debe estructurarse de tal forma que pueda emplear el material digitalizado en pasos anteriores. Dado que la plataforma en donde se compartirá el video es YouTube, se tiene que considerar una breve descripción del video, un índice a modo de línea de tiempo que represente los diferentes temas que se mencionan en él, los diferentes enlaces a referencias bibliográficas que se emplearon y la asociación entre videos de esta EGV.

### Etapa 4. Retroalimentación de la información

La Etapa 4 se desarrolla de manera paralela a la anterior, pues se trata de ir incorporando dentro del mapa interactivo configurado desde la Etapa 1 todo el material generado y compartido en las diversas plataformas digitales, para dar forma a la versión más actualizada de la EGV.

La ventaja de esta etapa apunta a que el mapa interactivo se convierte en un canal de comunicación entre los participantes con el cual se pueda dar seguimiento a la fase de desarrollo de la EGV, por ser el medio en el que converge toda la información de una manera estructurada para la explicación de la geología de un sitio o zona en específico.

## EJEMPLO DE EGV: TRANSECTO DURANGO-MAZATLÁN, SIERRA MADRE OCCIDENTAL

La excursión geológica a lo largo de la carretera Durango-Mazatlán es un transecto clásico que fue estudiado en los trabajos pioneros de McDowell y Keizer (1977) y Henry y Fredrikson (1987) y que permite observar la evolución tectonomagmática de la parte central de la Sierra Madre Occidental (SMO, ver Figura 5). A lo largo de esta carretera se han llevado a cabo excursiones geológicas en 1997 y 2003 como parte de los congresos IAVCEI (Asociación Internacional de Vulcanología y Geoquímica del interior de la Tierra, por sus siglas en inglés) y de la sección Cordillerana de la *Geological Society of America*, respectivamente. En la última década la geología de la región ha sido revisada por Ferrari *et al.* (2013 y 2018) quienes han propuesto un nuevo modelo para interpretar la evolución geodinámica de esta región. Aprovechando estos trabajos y también la apertura de la nueva autopista Durango-Mazatlán se han llevado a cabo nuevas versiones de las excursiones en 2014 (Aranda-Gómez *et al.*, 2015) y en 2020 (Ferrari *et al.*, 2020). La excursión virtual se ha diseñado con base en esta última actualización de las excursiones anteriores.

La excursión permite examinar importantes episodios magmáticos y tectónicos del Cretácico y Cenozoico que han desarrollado la morfología del paisaje y han controlado la formación de yacimientos minerales tipo pórfidos y depósitos epitermales de clase mundial en esta parte de la SMO. Luego de la acreción de los terrenos Guerrero y Alisitos en el Albiano (Busby *et al.*, 2006; Martini *et al.*, 2016), varios pulsos de magmatismo continental construyeron la SMO, la provincia ígnea con mayor extensión del país. La fisiografía de la SMO comprende un altiplano con una elevación promedio superior a los 2000 m sobre el nivel del mar y cubre un área de ~1200 km de largo y ~200 a 400 km de ancho que se extiende desde la frontera entre México y los Estados Unidos de América hasta aproximadamente los 20 °N de latitud. La parte occidental de la SMO está afectada por sistemas de fallas normales que forman parte del rift del Golfo de California y que exponen muchos depósitos minerales.

Cómo provincia ígnea, la SMO incluye rocas del Cretácico superior al Mioceno temprano formadas durante dos periodos principales de actividad magmática continental (McDowell y Keizer, 1977; Ferrari *et al.*, 2018). El primer periodo, que coincide con la orogenia Laramide, generó un conjunto batolítico y su contraparte volcánica, asociados con un arco magmático de supra-subducción activo entre ~100 y 50 Ma (Gastil, 1975; McDowell *et al.*, 2001; Henry *et al.*, 2003; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2014). Estas rocas, originalmente denominadas Complejo Volcánico Inferior por McDowell y Keizer (1977), formaron los batolitos de Sonora, Sinaloa y Jalisco, así como la sucesión volcánica del Cretácico tardío al Paleoceno de la Formación Tarahumara en Sonora (Wilson y Rocha, 1949; McDowell *et al.*, 2001), y sucesiones volcánicas similares en Sinaloa y Durango (Montoya-Lopera *et al.*, 2019). Durante un periodo de transición entre ~50 y 40 Ma, caracterizado por el emplazamiento de magmatismo de volumen relativamente bajo sobre un cinturón de 800 km de ancho (Figura 5), la extensión de la corteza comenzó en una amplia región desde la Mesa Central a la SMO (Aranda y McDowell, 1998; Ángeles Moreno *et al.*, 2017; Ferrari *et al.*, 2018; Nieto-Samaniego *et al.*, 2019).

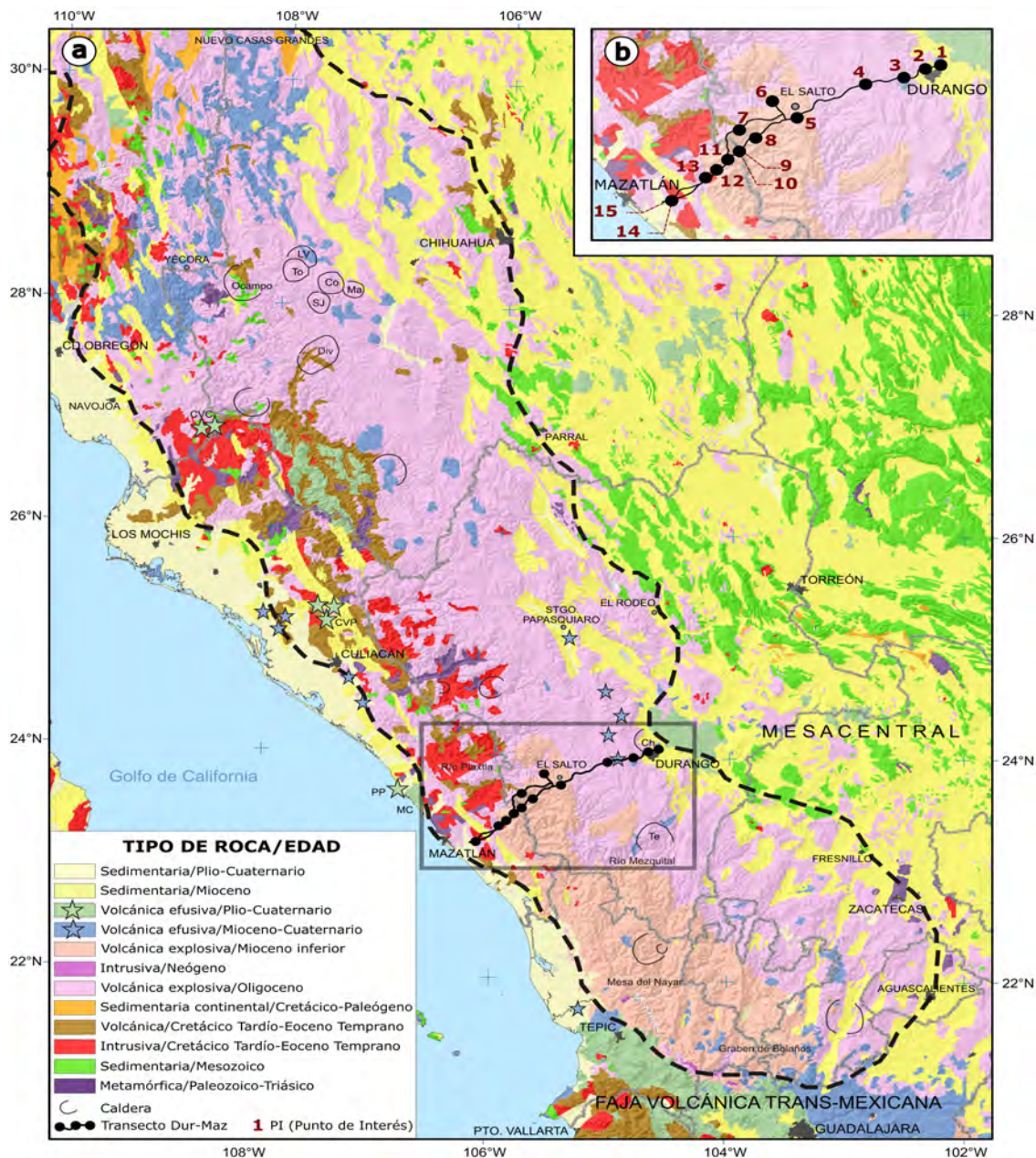


Figura 5. Mapa geológico: a. Extensión regional de la Sierra Madre Occidental con transecto Durango-Mazatlán; b. Vista a detalle del transecto Durango-Mazatlán con los Puntos de Interés (PI) visitados. Ch: Chupaderos, Co: Comanche, CVC: Campo Volcánico de Camargo, CVP: Campo Volcánico Pericos, Div: Divisadero, LV: Las Varas, Ma: Manzanita, MC: Mesa Cacaxtla, PP: Punta Piaxtla, SJ: San Juanito, Te: Temoaya, To: Tómoichic.

Al final del Eoceno el vulcanismo cambia radicalmente para ser dominado por ignimbritas riolíticas y lavas basálticas de mucho menor volumen, construyendo una de las provincias volcánicas silíceas más grandes de la Tierra (Bryan y Ferrari, 2013). Estas rocas, denominadas Supergrupo Volcánico Superior (McDowell y Keizer, 1977), fueron emplazadas principalmente en dos pulsos ignimbriticos de  $\sim 35$  a 29 Ma a lo largo de toda la provincia y de  $\sim 24$  a 20 Ma en la mitad meridional (McDowell y Keizer, 1977; Ferrari et al., 2002, 2007; McDowell y McIntosh, 2012). Las lavas máficas están relacionadas tanto con la fusión del manto astenosférico como con la litosfera continental y se encuentran intercaladas dentro de las sucesiones de ignimbritas, a menudo asociadas con fallas normales (Ferrari et al., 2018).

Las cuencas extensionales y los depósitos sedimentarios continentales asociados se formaron entre  $\sim 27$  y  $\sim 15$  Ma en un cinturón con tendencia NNO a lo largo de la mitad occidental de la SMO, que abarca la parte occidental de Sonora (McDowell et al., 1997; Gans, 1997; León et al., 2000; Wong et al., 2010; Murray et al., 2013) y la mayor parte de Sinaloa y Nayarit (Ferrari et al., 2013). Estas estructuras produjeron un adelgazamiento litósferico importante en la región del futuro Golfo de California, aunque la ruptura final de la litosfera ocurrió por deformación transtensional después del Mioceno tardío (Bennett y Oskin, 2014). Flujos de lava basáltica con afinidad intraplaca también fueron emplazados en el Mioceno medio-final y Plio-Cuaternario (Luhr et al., 2001; Aranda-Gómez et al., 2007; Ferrari et al., 2018).



Estos episodios tectonomagmáticos se pueden ubicar como parte de una evolución geodinámica compleja que acompañó el final de la subducción de la placa Farallón debajo de América del Norte y el desarrollo de un límite de placa transtensional en el Golfo de California (Ferrari *et al.*, 2018). Desde el Cretácico superior hasta el Eoceno inferior, la subducción de la placa de Farallón construyó un cinturón magmático representado por las rocas batolíticas y las contrapartes volcánicas de la *Lower Complex Volcanic* (LCV). A los 52 Ma, la placa de Vancouver comenzó a separarse del resto de la placa de Farallón (Atwater, 1989; Wright *et al.*, 2016), cuyo límite difuso de placa se introducía en México en la latitud de la frontera Sonora-Sinaloa. Esto emplazó volúmenes relativamente pequeños de magma en un área amplia y al inicio de la extensión en la placa superior. Otra consecuencia fue que comenzó a desarrollarse una ventana astenosférica (*slab window*) por efecto del retroceso, fragmentación y desprendimiento de los *slabs*, lo que, a su vez promovió el ascenso y fusión de la astenosfera.

Los fundidos astenosféricos provocaron la fusión del manto litosférico y la corteza, lo que produjo los pulsos ignimbriticos y varios episodios de extensión acompañada de erupción de lavas máficas, tanto en la provincia *Basin and Range* mexicana (Henry y Aranda-Gómez, 2000) como en la Provincia Extensional del Golfo (Ferrari *et al.*, 2013). El cese completo de la subducción en el Mioceno medio y el subsiguiente acoplamiento progresivo de una franja de la margen continental (actualmente la península de Baja California) con la placa del Pacífico que se mueve hacia el noroeste produjo la ruptura final de la litosfera continental en el Golfo de California.

Empezando en la costa de Sinaloa, la excursión permite ver las unidades geológicas que forman la parte central de la SMO en orden estratigráfico, los principales episodios extensionales, marcados por claras discordancias entre los paquetes ignimbriticos de la SMO, y los diferentes pulsos de mineralización asociados a ellos. La mayor parte de los PI se ubican a lo largo de la nueva autopista Durango-Mazatlán, cuyos cortes han permitido observar con mucha mayor claridad la geología de esta región.

Transecto Durango-Mazatlán Enlace de la EGV:  
[https://inggeolassist.github.io/SMOc\\_EGV1/](https://inggeolassist.github.io/SMOc_EGV1/)

## CONCLUSIONES

Las EGV integradas al proceso de enseñanza - aprendizaje de la geología de México constituyen una poderosa herramienta para la docencia. Aunque las EGV no sustituyen las prácticas y/o visitas de campo, ofrecen una amplia variedad de ventajas, entre las que destacan, el desarrollo de habilidades de observación de afloramientos en forma multiescalar y, desde diferentes perspectivas de forma casi simultánea, la ubicación espacial de los cuerpos de roca en mapas interactivos, el aprovechamiento de los conocimientos y experiencia de especialistas de diversas regiones del país y la posibilidad de una amplia difusión entre todos los interesados en dichos temas.

La difusión de la metodología utilizada en la elaboración de la EGV que se presenta constituye un marco de referencia a los interesados en incursionar en el desarrollo de estos materiales docentes, los cuales, aunque muestran un desarrollo incipiente en nuestro país, tienen un importante potencial para la docencia.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias al financiamiento del proyecto DGAPA-UNAM, PAPIIME PE106422 "Excursiones geológicas virtuales: una herramienta para la docencia y la difusión de la geología de México". Los autores agradecen el apoyo en la edición de videos y la digitalización de cartografía realizadas por los estudiantes Lizbeth Santiago Rivera, Alexis Jerkan Quintos González y Ricardo Alonso Flores Flores, así como al M. en C. Rodrigo Gutiérrez Navarro por sus sugerencias sobre la metodología presentada en este trabajo. Asimismo, se agradece la revisión de dos árbitros anónimos y de la Mtra. Sandra Fuentes Vilchis, cuyas observaciones contribuyeron sustantivamente a mejorar el artículo.

## REFERENCIAS

- Angeles-Moreno, E., Nieto-Samaniego, A. F., Ruiz-González, F. J., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S. A., Olmos-Moya M. D. J. P. Xu S. y Miranda-Avilés, R. (2017). The transition between shortening and extensional regimes in central Mexico recorded in the tourmaline veins of the Comanja Granite. *Journal of South American Earth Sciences*, 73, 65-77.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.12.004>
- Aranda-Gómez, J. J., y McDowell, F. W. (1998). Paleogene extension in the southern Basin and Range province of Mexico: Syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining District. *International Geology Review*, 40(2), 116-134. <https://doi.org/10.1080/00206819809465201>
- Aranda-Gómez, J. J., Luhr, J. F., Housh, T. B., Valdez-Moreno, G., y Chávez-Cabello, G. (2007). Late Cenozoic intraplate-type volcanism in central and northern México: A review. *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*, 422, 93. [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(04\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(04))
- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D., Ferrari, L., McDowell, F.W., and Valencia-Moreno, M., (2015), Cenozoic volcano-tectonic evolution of North-Western Mexico: A transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field (along the new toll road 40D) and observations on extension-related magmatism in the southern Basin and Range and Gulf of California tectonic provinces: Centro de Geociencias, Guías de Excursiones Geológicas de México, 1, p. 1-90.
- Atwater, T. (1989). Plate tectonic history of the northeast Pacific and western North America.  
<https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-N.21>
- Bennett, S. E., y Oskin, M. E. (2014). Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone. *Geology*, 42(3), 215-218. <https://doi.org/10.1130/G34904.1>
- Bryan, S. E., y Ferrari, L. (2013). Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: Progress in our understanding over the last 25 years. *GSA Bulletin*, 125(7-8), 1053-1078.  
<https://doi.org/10.1130/B30820.1>
- Busby, C., Adams, B. F., Mattinson, J., y Deoreo, S. (2006). View of an intact oceanic arc, from surficial to mesozonal levels: Cretaceous Alisitos arc, Baja California. *Journal of volcanology and geothermal research*, 149(1-2), 1-46.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.06.009>
- Cassady, J. C., Kozłowski, A. G., y Kommann, M. A. (2008). Electronic field trips as interactive learning events: Promoting student learning at a distance. *Journal of Interactive Learning Research*, 19(3), 439.
- Dolphin, G., Dutchak, A., Karchewski, B., y Cooper, J. (2019). Virtual field experiences in introductory geology: Addressing a capacity problem, but finding a pedagogical one. *Journal of Geoscience*

- Education, 67(2), 114-130.  
<https://doi.org/10.1080/10899995.2018.1547034>
- Ferrari, L., López-Martínez, M., y Rosas-Elguera, J. (2002). Ignimbrite flare-up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Implications for the late subduction history of the Farallon plate. *Tectonics*, 21(4), 17-1.  
<https://doi.org/10.1029/2001TC001302>
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., y Bryan, S. (2007). Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America.  
[https://doi.org/10.1130/2007.2422\(01\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(01))
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., y Solari, L. (2013). Late Oligocene to Middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: The beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere*, 9(5), 1161-1200.  
<https://doi.org/10.1130/GES00925.1>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Lopez-Martinez, M., y Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, 115-152.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006>
- Ferrari, L., Levresse, G., Aranda-Gómez, J. J., Henry, C. D., Valencia-Moreno, M., y Landín, L. O. (2020). Tectonomagmatic Pulses and Multiphase Mineralization in the Sierra Madre Occidental, Mexico. <https://doi.org/10.5382/GB.61>
- Gans, P. B. (1997). Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico. *Tectonics*, 16(3), 388-408.  
<https://doi.org/10.1029/97TC00496>
- Gastil, R. G. (1975). Plutonic zones in the Peninsular Ranges of southern California and northern Baja California. *Geology*, 3(7), 361-363.  
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1975\)3%3C361:PZITPR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1975)3%3C361:PZITPR%3E2.0.CO;2)
- Henry, C. D., y Fredrikson, G. (1987). Geology of southern Sinaloa adjacent to the Gulf of California. Geological Society of America, Map and Chart Series. Map MCH063, 14.
- Henry, C. D., y Aranda-Gomez, J. J. (2000). Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range. *Tectonophysics*, 318(1-4), 1-26.
- Henry, C. D., McDowell, F. W., y Silver, L. T. (2003). Geology and geochronology of granitic batholith complex, Sinaloa, México: Implications for Cordilleran magmatism and tectonics. *Geological Society of America Special Papers*, 374, 237-273.  
<https://doi.org/10.1130/0-8137-2374-4.237>
- León, C. M. G., McIntosh, W. C., Lozano-Santacruz, R., Valencia-Moreno, M., Amaya-Martínez, R., y Rodríguez-Castañeda, J. L. (2000). Cretaceous and Tertiary sedimentary, magmatic, and tectonic evolution of north-central Sonora (Arizpe and Bacanuchi Quadrangles), northwest Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 112(4), 600-610.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112%3C600:CATSMA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112%3C600:CATSMA%3E2.0.CO;2)
- Luhr, J. F., Henry, C. D., Housh, T. B., Aranda-Gómez, J. J., y McIntosh, W. C. (2001). Early extension and associated mafic alkalic volcanism from the southern Basin and Range Province: Geology and petrology of the Rodeo and Nazas volcanic fields, Durango, México. *Geological Society of America Bulletin*, 113(6), 760-773.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113%3C0760:EEAAMA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113%3C0760:EEAAMA%3E2.0.CO;2)
- Martini, M., Solé, J., Garduño-Martínez, D. E., Puig, T. P., y Omaña, L. (2016). Evidence for two Cretaceous superposed orogenic belts in central Mexico based on paleontologic and K-Ar geochronologic data from the Sierra de los Cuarzos. *Geosphere*, 12(4), 1257-1270. <https://doi.org/10.1130/GES01275.1>
- McDowell, F. W., y Keizer, R. P. (1977). Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 88(10), 1479-1487.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88%3C1479:TOMMIT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88%3C1479:TOMMIT%3E2.0.CO;2)
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., y Amaya-Martínez, R. (1997). Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 109(10), 1349-1360.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109%3C1349:IOSAVD%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109%3C1349:IOSAVD%3E2.3.CO;2)
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., y Connelly, J. N. (2001). Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 113(4), 521-531.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113%3C0521:DOLCET%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113%3C0521:DOLCET%3E2.0.CO;2)
- McDowell, F. W., y McIntosh, W. C. (2012). Timing of intense magmatic episodes in the northern and central Sierra Madre Occidental, western Mexico. *Geosphere*, 8(6), 1505-1526.  
<https://doi.org/10.1130/GES00792.1>
- Montoya-Lopera, P., Ferrari, L., Levresse, G., Abdullin, F., y Mata, L. (2019). New insights into the geology and tectonics of the San Dimas mining district, Sierra Madre Occidental, Mexico. *Ore Geology Reviews*, 105, 273-294.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.020>
- Murray, B. P., Busby, C. J., Ferrari, L., y Solari, L. A. (2013). Synvolcanic crustal extension during the mid-Cenozoic ignimbrite flare-up in the northern Sierra Madre Occidental, Mexico: Evidence from the Guazapares Mining District region, western Chihuahua. *Geosphere*, 9(5), 1201-1235.  
<https://doi.org/10.1130/GES00862.1>
- Nieto-Samaniego, A. F., Olmos-Moya, M. D. J. P., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S. A., Abdullin, F., del Pilar-Martínez, A., y Xu, S. (2019). Thermochronology and exhumation rates of granitic intrusions at Mesa Central, Mexico. *International Geology Review*, 62(3), 311-319. <https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1602789>
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Morán-Zenteno, D. J., Solari, L., Luna-González, L., y Schaaf, P. (2014). A review of batholiths and other plutonic intrusions of Mexico. *Gondwana Research*, 26(3-4), 834-868. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.002>
- Qiu, W., y Hubble, T. (2002). The advantages and disadvantages of virtual field trips in geoscience education. *The China Papers*, 1, 75-79.
- Ruberto, T., Mead, C., Anbar, A. D., y Semken, S. (2023). Comparison of in-person and virtual Grand Canyon undergraduate field trip learning outcomes. *Journal of Geoscience Education*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/10899995.2023.2186067>
- Wilson, I. F., y Rocha, V. S. (1949). Coal Deposits of the Santa Clara District Near Tonichi, Sonora, Mexico: A Study Undertaken to Aid Industrial Development of the Region (Vol. 962). United States Department of the Interior, Geological Survey.
- Wright, N. M., Seton, M., Williams, S. E., y Mueller, R. D. (2016). The Late Cretaceous to recent tectonic history of the Pacific Ocean basin. *Earth-Science Reviews*, 154, 138-173.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.015>
- Wong, M. S., Gans, P. B., y Scheier, J. (2010). The <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar thermochronology of core complexes and other basement rocks in Sonora, Mexico: Implications for Cenozoic tectonic evolution of northwestern Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B7). <https://doi.org/10.1029/2009JB007032>

Manuscrito recibido: 24 de abril de 2023

Manuscrito corregido recibido: 23 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 29 de mayo de 2023



ENSEÑANZA  
COMUNICACIÓN  
GEOCIENCIAS

