



REVISTA ENSEÑANZA Y COMUNICACIÓN DE LAS GEOCIENCIAS

Volumen 1 número 2, diciembre 2022

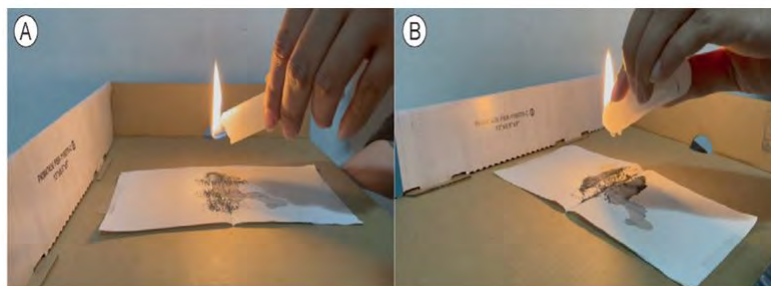
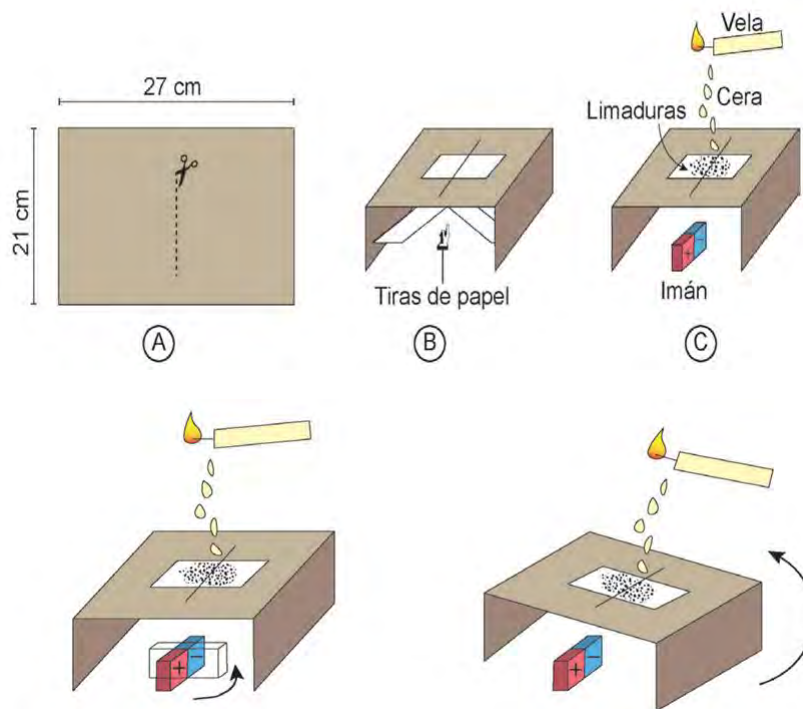




IMAGEN DE LA PORTADA

Imágenes ilustrativas del experimento para explicar las inversiones del campo magnético del artículo de Violeta Ortiz-Olvera y Thierry Calmus.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0

ENSEÑANZA Y COMUNICACIÓN DE LAS GEOCIENCIAS, Revista electrónica, Año 1, No. 2, diciembre del 2022, 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 196,9 <http://encomunicacionct.geociencias.unam.mx> ; 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, 24 de noviembre de 2022.

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.



EDITORAS EN JEFE

Sección Enseñanza

Dra. Susana Alicia Alaniz Álvarez
alaniz@geociencias.unam.mx
Centro de Geociencias, campus Juriquilla
Universidad Nacional Autónoma de México

Sección Comunicación

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

EDITORES ASOCIADOS

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

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

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

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

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

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

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

M. en C. Ana Cecilia Lopera
terramovil@geologia.unam.mx Instituto de
Geología, Universidad Nacional Autónoma
de México

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

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

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

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

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

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

M. en L. Sandra Fuentes Vilchis
sandra.fuentes@dgenp.unam.mx Escuela
Nacional Preparatoria, Universidad Nacional
Autónoma de México

Editores Técnicos

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

Dra. Marina Vega González
mvega@geociencias.unam.mx
Centro de Geociencias, UNAM



CONTENIDO

	Pag.
EDITORIAL	i
MANUAL DE PRÁCTICAS Y EJERCICIOS DE LABORATORIO DE LA ASIGNATURA TÉCNICAS GEOLÓGICAS DE CAMPO, UNA HERRAMIENTA PARA GEOCIENTÍFICOS E INGENIEROS EN CIENCIAS DE LA TIERRA	1
Yoalli B. Hernández-Marmolejo, Rodrigo Gutiérrez-Navarro y Orestes A. de la Rosa-Mora. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México Palabras clave: Equipo y metodología de geología de campo, técnicas de geología de campo, mapas topográficos, introducción a la cartografía. Licenciatura (mayores de 18 años)	
ESTUDIO GEOQUÍMICO DE UN SISTEMA MAGMÁTICO COMO DETONADOR DE COMPETENCIAS PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS DE LA TIERRA	7
Laura Mori ¹ y Eduardo Becerra-Torres ² ¹ Facultad de Ingeniería y ² Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Juriquilla; Universidad Nacional Autónoma de México Palabras clave: Geoquímica de rocas ígneas, yacimientos minerales, geología ambiental, habilidades de análisis e indagación. Licenciatura (mayores de 18 años)	
CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE DIAGRAMAS STIFF-DAVIS PARA ALUMNOS DE INGENIERÍA PETROLERA, EXPERIENCIA EN EL AULA	13
A. Paulina Gómora-Figueroa, Julieta Villegas-González y Josué H. Almazán-Mendoza Departamento de Ingeniería Petrolera, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México Palabras clave: Análisis de agua producida e inyectada, análisis de la composición del agua en la industria petrolera, geoquímica del agua, diagrama Stiff-Davis, Ingeniería Petrolera, python. Licenciatura (mayores de 18 años)	
MATERIAL DIDÁCTICO QUE CONTRIBUYE A LA VISUALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS	20
Rodrigo Gutiérrez-Navarro ¹ , María Isabel Vidal-Reyes ² , Gabriel Serrano-López ³ y Elisa Fitz-Díaz ⁴ ¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, ² Facultad de Ciencias, ³ Facultad de Ingeniería e ⁴ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México Palabras clave: Geología Estructural, red de Wulff, recursos didácticos, clases virtuales. Licenciatura (mayores de 18 años)	

UN EXPERIMENTO SENCILLO PARA ILUSTRAR LAS INVERSIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

26

Violeta Ortiz-Olvera y Thierry Calmus

Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México

Palabras clave: Campo magnético terrestre, piso oceánico, anomalías magnéticas, dorsal, experimento.
Licenciatura (mayores de 18 años)

IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS CONCEPTOS ERRÓNEOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

30

Gustavo M. Bastien-Montoya¹, Bernardo A. Bastien-Olvera²,
Raiza Pilatowsky-Gruner³ y Carlos Gay-García⁴

¹Universidad Autónoma Metropolitana, ²Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, ³Estudios Planeteando, ⁴Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México

Palabras clave: Modelos mentales, conceptos erróneos, cambio climático, educación, capa de ozono.
Licenciatura (mayores de 18 años)

USO DEL VIDEOQUIZ COMO ESTRATEGIA DIDÁCTICA PARA EL APRENDIZAJE DE ALUMNOS DE PREPARATORIA

36

Viridiana Yazmin Jiménez-Zuñiga

Colegio Queen Mary School, Ciudad de México, Sección Preparatoria

Palabras clave: Autogestión, elementos químicos, estrategia didáctica, herramientas digitales, recurso educativo, *videoquiz*. Preparatoria (mayores de 15 años)

VIDEOQUIZ “LA EDAD DE LA TIERRA”: RECURSO DIDÁCTICO PARA ENTENDER EL AVANCE DE LA CIENCIA EN EL TIEMPO

39

Susana A. Alaniz-Álvarez¹, Ángel F. Nieto-Samaniego¹, F. Hernández-Díaz¹, Viridiana Y. Jiménez-Zuñiga²

¹Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, ²Colegio Queen Mary School, Ciudad de México

Palabras clave: Radiactividad, edad de la Tierra, extinción de especies, transporte de calor, erosión y sedimentación. Secundaria (mayores de 12 años)

LA ONTOGENIA LACUSTRE: UN VISTAZO A LA EVOLUCIÓN DE LOS LAGOS

43

Gustavo Olivares-Casillas

Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México

Palabras clave: Lagos, ontogenia, ciclo del agua, eutrofización, Península de Yucatán. Licenciatura (mayores de 15 años)

EL RECONOCIMIENTO DE LAS CAPAS INTERNAS DE LA TIERRA

47

Francisco Chacón-Hernández

Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México

Palabras clave: Capas internas de la Tierra, sismología, ondas sísmicas. Licenciatura (mayores de 15 años)

YÁ MFÄDI AR XIMHAI JAR HÑÑHO: LAS CIENCIAS DE LA TIERRA EN OTOMÍ

53

Ilse Elbjorn-Flores¹ y Roberto Aurelio Núñez-López²

¹Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, ²Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Autónoma de Querétaro

Palabras clave: Hññho, otomí, neologismos, préstamos lingüísticos, Ciencias de la Tierra, material didáctico. Secundaria (mayores de 12 años)

EDITORIAL

El propósito de la RECG es publicar artículos originales en español sobre recursos didácticos en línea desde preescolar hasta posgrado y material de divulgación y difusión científica sobre Ciencias de la Tierra. El contenido estará determinado por los autores que sometan sus manuscritos. En este número prevalecen los artículos enfocados a mejorar o innovar en cursos del nivel de licenciatura. La propuesta de Yoalli Hernández y colaboradores está enfocada al trabajo de campo, proponiendo un manual con prácticas y ejercicios de laboratorio. Laura Mori y Eduardo Becerra presentan una actividad didáctica, con datos y problemas petrogenéticos, para mejorar las competencias de los estudiantes que lleven la asignatura de Petrología de rocas ígneas. Para los estudiantes y docentes de la carrera de Ingeniería Petrolera, Paulina Gómora y colaboradores explican la construcción y análisis de los diagramas Stiff-Davis, utilizando datos de campo, para conocer el origen del agua producida durante actividades de perforación y extracción de hidrocarburos. Rodrigo Gutiérrez y colaboradores, presentan herramientas para la visualización de estructuras en 3D, material que servirá en la materia de Geología Estructural. Para licenciatura, Violeta Ortiz y Thierry Calmus nos muestran un experimento muy ilustrativo para explicar las inversiones del campo magnético terrestre en el escenario de la Tectónica de placas. Estos artículos contienen ejercicios y materiales, en muchos casos con datos reales, que serán de apoyo al docente que inicia, pero también, por su originalidad, podrá ser mejorado y ampliado por profesores experimentados.

En los últimos años han tenido auge, entre muchos, dos elementos que se supone mejorarán el aprendizaje: la identificación de conceptos erróneos previos de los estudiantes y los recursos didácticos virtuales. Gustavo Bastien y colaboradores presentan un estudio para identificar los conceptos erróneos de estudiantes de licenciatura sobre el cambio climático. Los artículos de Viridiana Jiménez y, por otro lado, el de Susana Alaniz y colaboradores, probaron el uso de *videoquizzes* como instrumento de reforzamiento didáctico en el nivel de bachillerato y secundaria respectivamente.

En la sección de comunicación, Gustavo Olivares nos explica en un video el funcionamiento y cambios de los lagos, resaltando su importancia social en el sureste de México. Francisco Chacón nos explica cómo se reconocieron las capas internas de la Tierra con el estudio de los sismos, e Ilse Elbjorn y Roberto Aurelio presentan un interesante trabajo para llevar las ciencias de la Tierra a las comunidades otomías.

Susana A. Alaniz Álvarez

Raiza Pilatowsky Gruner

Editoras en Jefe

MANUAL DE PRÁCTICAS Y EJERCICIOS DE LABORATORIO DE LA ASIGNATURA TÉCNICAS GEOLÓGICAS DE CAMPO, UNA HERRAMIENTA PARA GEOCIENTÍFICOS E INGENIEROS EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Yoalli B. Hernández-Marmolejo*, Rodrigo Gutiérrez-Navarro y Orestes A. de la Rosa-Mora.

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Escolar 04360, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, CDMX, México. *yoalli@unam.mx

RESUMEN

Como respuesta a la continua actualización de planes de estudio de las carreras de Ingenierías en Ciencias de la Tierra, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se han desarrollado nuevos sistemas de aprendizaje en los que el alumnado aplica sus conocimientos y experimenta con instrumentos y tecnologías novedosos para hacer eficiente y productivo el trabajo geológico en campo. En la actualización del Plan de Estudios de 2016 se diseñó la asignatura Técnicas Geológicas de Campo para que el alumnado cuente con recursos metodológicos para el desarrollo del trabajo de campo. El Manual de laboratorios y prácticas de la asignatura Técnicas Geológicas de Campo fue diseñado para disponer de material de apoyo didáctico para la enseñanza en la nueva asignatura.

Este manual está dividido en dos secciones. La primera parte consta de ocho laboratorios para realizarse en el aula y en formato virtual o autodidacta; en estos laboratorios se proponen diferentes ejemplos de aplicación complementarios a la teoría vista en el aula. La segunda parte consiste en cuatro prácticas para la aplicación de conocimientos y desarrollo de habilidades en el campus de Ciudad Universitaria, Ciudad de México. Así mismo, el manual contiene anexos e instructivos para el uso correcto y aplicación de las herramientas para el trabajo geológico en campo. Con este manual y las experiencias didácticas compartidas en este manuscrito, esperamos que el profesorado, estudiantado y futuros profesionistas en Ciencias de la Tierra disfruten y apliquen estas actividades y que desarrollen al máximo sus destrezas, habilidades espaciales y perceptivas para conseguir una mejor caracterización de fenómenos geológicos-geofísicos.

Palabras clave: Equipo y metodología de geología de campo, técnicas de geología de campo, mapas topográficos, introducción a la cartografía.

ABSTRACT

As a response to continuous study plans updating for Earth Sciences Engineering careers, the Faculty of Engineering at Universidad Nacional Autónoma de México has developed new learning systems in which students apply their knowledge, experiment with novel instruments and technologies to make the geological field work effective and productive. In the 2016 Study Plan update, the Geological Field Techniques subject was designed so that students have methodological resources for the field work development. The Manual was designed to provide didactic material that supports teaching-learning activities in the subject.

This manual has two sections. The first part consists of eight laboratories to be carried out in the classroom and virtual or self-taught format. In these laboratories, different examples of complementary applications for the theory as seen in the classroom are proposed. The second part consists of four practices proposed to be applied on the Ciudad Universitaria campus, Mexico City, for the development of skills and knowledge application. Likewise, the manual contains annexes and instructions for better use of tools in the geological field work. With this manual and the didactic experiences shared in this manuscript, we hope that Earth Sciences teachers, students and future professionals enjoy and apply these activities, as well as develop their skills, spatial and perceptive abilities for a better characterization of the geological-geophysical phenomena.

Keywords: Field geology equipment and methodology, field geology techniques, topographic maps, introduction to cartography.

INTRODUCCIÓN

Técnicas Geológicas de Campo (TGC) surgió como una modificación de las asignaturas de Geomática, Topografía y Cartografía Geológica durante la revisión y actualización de planes de estudio del año 2015-16 para las carreras de Ingeniería Geológica e Ingeniería Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

TGC es una asignatura obligatoria de tipo teórico-práctica con una salida de campo intersemestral de cinco días. Dentro de los mapas curriculares, TGC se ubica en tercer y cuarto semestres de Ingeniería Geofísica y Geológica respectivamente. Este curso se imparte en 4 horas semanales, divididas en dos horas teóricas y dos prácticas, con un total de 64 horas semestrales. La asignatura no contaba con material didáctico de apoyo y a falta de estos recursos surgió este manual, que se encuentra en proceso de revisión por parte del profesorado del Departamento de Geología de la División en Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El manual aquí presentado apoya las actividades básicas y fundamentales de TGC en las que la interacción entre conocimientos y habilidades es trascendental para el estudiantado. Con este manual se fortalecen los temas vistos en el aula: relieve topográfico, estructuras geológicas, fenómenos geológico-geofísicos a diferentes escalas y tiempo, así como problemas reales de las Ciencias de la Tierra.

El perfeccionamiento de las técnicas geológicas de campo requiere de la práctica y desarrollo de la visualización espacial, así como del entendimiento de estructuras y geoformas en tres dimensiones (Kastens *et al.*, 2009; Shipley *et al.*, 2013). De la misma forma, las habilidades en campo implican una observación detallada, la consideración de escalas de los fenómenos a describir, la caracterización de geometrías y la colecta cuidadosa de muestras, todo esto para entender procesos físicos, químicos y biológicos que cambian a lo largo del tiempo geológico. Con estas destrezas se busca que el alumnado y los futuros profesionistas propongan soluciones óptimas y accesibles durante la aplicación de la Ingeniería en Ciencias de la Tierra (Coe, 2010; Silva-Romo *et al.*, 2010; 2016).

Es importante destacar que al pulir el trabajo geológico en campo se perfecciona la generación de hipótesis o teorías y es donde se generan interpretaciones basadas en observaciones y caracterizaciones de afloramientos (Brusi *et al.*, 2011). Durante este proceso iterativo y enriquecedor es cuando se llega a una interpretación y propuesta de una historia geológica de una zona o región determinada (Coe, 2010; Silva-Romo *et al.*, 2010; 2016).

Con los laboratorios propuestos en este manual (material complementario) se invita a alumnado y profesorado a que perfeccionen sus habilidades en conjunto con el uso de las herramientas de trabajo: mapas topográficos para su ubicación con visuales inversas en complemento con un receptor de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés); observación estructurada de rocas y afloramientos; registro en libreta de campo; caracterización y orientación de estructuras geológicas con brújula y aplicaciones de dispositivos móviles (Allmendinger *et al.*, 2017).

El objetivo principal del Manual de laboratorios y prácticas de la asignatura Técnicas Geológicas de Campo (MTGC) es que el alumnado de las carreras de Ingeniería Geofísica e Ingeniería Geológica visualicen y practiquen mediante el uso óptimo del equipo de campo, así mismo que desarrollen las habilidades primordiales para elaborar mapas geológicos y cartografía geológica, que implementarán como futuros geocientíficos e ingenieros en geociencias durante sus actividades en campo y, con todo ello, lograr un mejor entendimiento de los fenómenos geológicos que ocurren en nuestro dinámico planeta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Temario Técnicas Geológicas de Campo

El temario de la asignatura TGC tiene una estructura congruente con el objetivo del curso: “El alumnado distinguirá rasgos geológicos en el campo, los cuantificará y los registrará conforme a los recursos técnicos y metodológicos propios de las ciencias geológicas para expresar los resultados en forma gráfica y escrita”. En el primer tema (Introducción) se contextualiza la importancia del trabajo geológico en campo y se hace una breve revisión de su historia.

En el segundo tema (Mapas Topográficos y Sistema de Posicionamiento Global) se aborda la necesidad del uso de los sistemas de referencia globales, así como la ubicación en campo con base en coordenadas y mapas topográficos. Para el tercer tema (Equipo de campo geológico) se indica en qué consiste el equipo de campo y las posibles metodologías del uso correcto y óptimo de cada instrumento. Cabe destacar que el uso de dispositivos electrónicos (Allmendinger *et al.*, 2017) y equipo de campo puede ayudar a complementar la comprensión y sobre todo lograr que el estudiantado se ubique espacialmente y que visualice las formas del relieve así como su relación con estructuras geológicas.

Durante el cuarto tema (Trabajo geológico de campo) se explora una metodología general del trabajo de campo con base en la observación estructurada y el dibujo geológico. En el quinto y último tema (Comunicación de resultados) se desarrollan subtemas relacionados con las diferentes formas de presentar y comunicar los resultados obtenidos durante este proceso en campo. Por lo tanto, en el temario se tiene una estructura lógica para que el alumnado aprenda las metodologías y técnicas básicas en el trabajo de campo que le sean útiles en asignaturas consecuentes como son Geología Estructural, Sedimentología, Estratigrafía, Cartografía Geológica y Geología de Campo, entre otras.

El MTGC está dividido en dos secciones: la primera sección consta de ocho (8) laboratorios y la segunda sección de cuatro (4) prácticas. En los laboratorios se presentan ejercicios para la aplicación de los temas vistos en la teoría. En algunos casos se presenta más de una versión para que el alumnado pueda ampliar sus habilidades prácticas. La segunda parte del manual consiste en cuatro prácticas para la aplicación de conocimientos y habilidades técnicas con los instrumentos para el trabajo en campo. Estas prácticas se han diseñado y aplicado en el campus de Ciudad Universitaria, Ciudad de México, y se pueden adaptar para otros sitios de interés. Es importante mencionar que durante el desarrollo de estas prácticas se recalca la interacción biológica y geológica, así como la preservación del patrimonio biológico, geológico, cultural y humano.

Durante el curso, primero se realizan los laboratorios en el aula bajo la asesoría del profesorado. Cada vez que se finaliza un tema y habiendo realizado los laboratorios determinados, se llevan a cabo las prácticas, las cuales se realizan fuera del aula; el alumnado toma las decisiones en brigada y se complementa el aprendizaje con procesos como visualización de fenómenos geológicos en campo y visualización espacial. Dichas actividades implican el desarrollo y ejercicio de habilidades de orientación y visualización tridimensional (Figura 1).

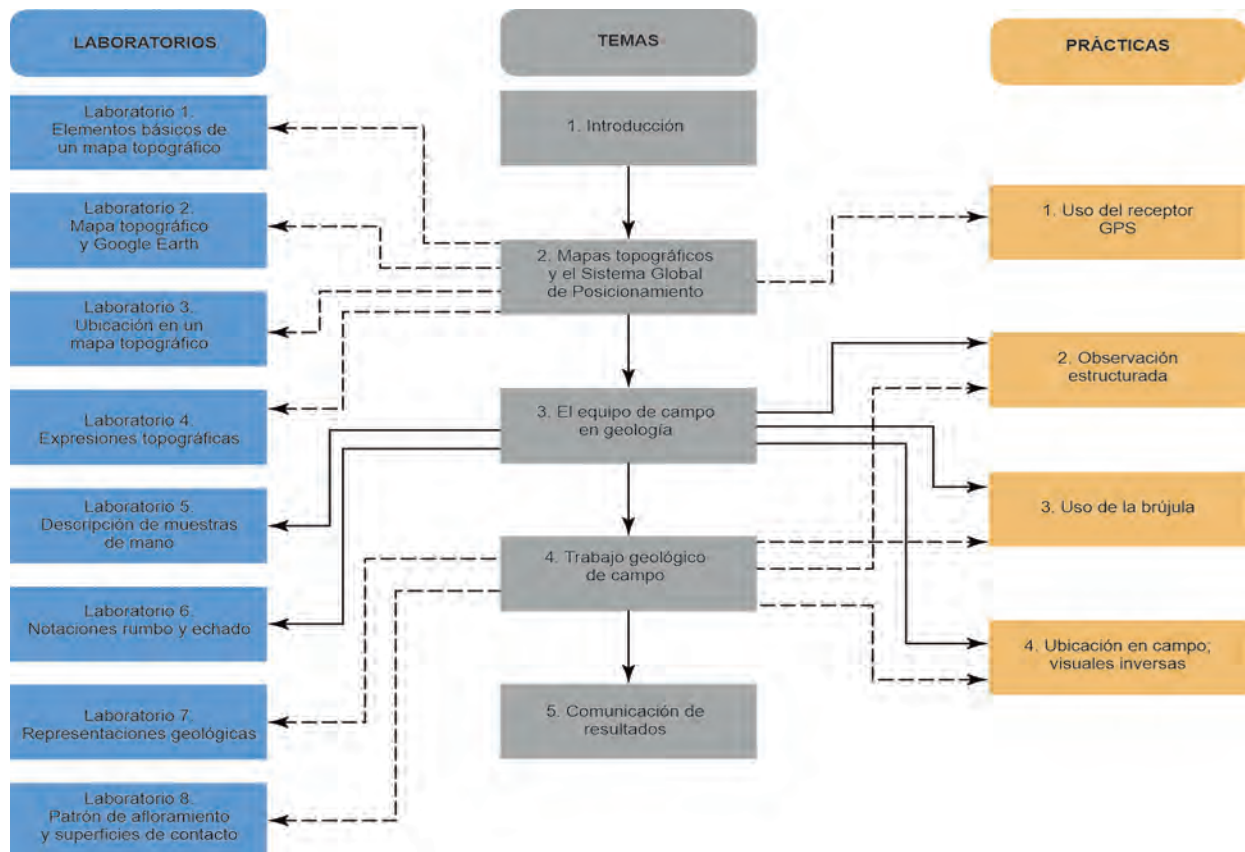


Figura 1. Se ilustra la relación entre los laboratorios, el temario y las prácticas. Los conocimientos de Cartografía topográfica se aplican en los laboratorios 1 al 4; en estos laboratorios el alumnado tiene una conexión con sus cursos previos como Geometría descriptiva aplicada y Geología física. En los laboratorios 6 al 8 se aplican los conocimientos vistos en el aula con relación a cartografía geológica. Por otra parte, en la práctica 2 se ensaya la observación estructurada y la elaboración del dibujo geológico. Finalmente, todas las actividades le servirán al alumnado para sus prácticas de campo y perfeccionamiento de habilidades de orientación y visualización espacial en campo.

Es importante señalar que el curso de TGC cuenta con una práctica de campo de 5 días al final del semestre. En esta actividad en campo el alumnado practica las habilidades aprendidas en los 8 laboratorios y las 4 prácticas, por lo que con esta actividad se redondea el proceso de enseñanza-aprendizaje y se refuerza y evalúa lo visto en el aula durante el semestre.

Los dominios o niveles taxonómicos de Bloom *et al.* (1956) han sido utilizados en pedagogía como indicadores del proceso de asimilación de aprendizaje significativo por parte del alumnado, por lo que en este trabajo utilizamos estos dominios o niveles para diagnosticar el proceso cognitivo desarrollado en los laboratorios y prácticas contenidos en el MTGC (Tabla 1). Los reportes entregados por parte del alumnado, tanto de los laboratorios como de las prácticas (material complementario), se consideran el método de evaluación con el que se busca que los estudiantes ejerciten sus habilidades cognitivo-lingüísticas para describir, justificar, explicar y argumentar sus experiencias de aprendizaje con un lenguaje apropiado con base en las clases teóricas revisadas en el aula.

En la Tabla 1 se describen los dominios o niveles taxonómicos de Bloom *et al.* (1956) en los que se basa cada laboratorio y cada práctica contenida en el MTGC.

Experiencias didácticas

El MTGC está pensado para que se realicen las actividades a la par del temario de la asignatura TGC (Figura 1), siendo perfeccionado y utilizado desde el semestre 2017-1, en por lo menos 30 grupos de TGC con 20 estudiantes cada uno, lo que da un total aproximado de 600 estudiantes que han utilizado este material didáctico. Debido a la pandemia por el virus SARS-CoV-2 se llevaron a cabo clases virtuales en donde también se utilizó el MTGC en modalidad a distancia. A continuación, se comparten las experiencias didácticas obtenidas tanto en esquema presencial como virtual.

Esquema presencial

Con apoyo de los Laboratorios del 1 al 4, el estudiantado conoce la simbología básica de las cartas topográficas y el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) y posteriormente comprende las diversas representaciones y orientaciones de las diferentes expresiones del relieve de la Tierra. De esta manera, el alumnado sintetiza la información y las metodologías para representar la superficie tridimensional de la Tierra en dos dimensiones.

En la Práctica 1 se realizan actividades en las que el estudiantado hace uso de mapas topográficos localizando y registrando sitios de interés con ayuda del receptor de posicionamiento global (GPS). De esta forma se ubican en un mapa topográfico y miden distancias y direcciones a diferentes escalas cartográficas. El receptor GPS es

Tabla 1. Dominios-Niveles Taxonómicos de Bloom *et al.* (1956)

abordados en los laboratorios y prácticas del MTGC.

LABORATORIOS	Conocer	Comprender	Aplicar	Analizar	Sintetizar
1. Elementos básicos de un mapa topográfico	Conocer los elementos básicos de una carta topográfica e identificar diversas expresiones topográficas.	Reconocer las formas topográficas y simbologías en diferentes cartas topográficas. Comprender el mapa topográfico como una representación del relieve de la Tierra en una proyección bidimensional.	Hacer uso de las cartas topográficas para ubicar rasgos usando sus habilidades de orientación.		
2. Mapa topográfico y Google Earth	Conocer los fundamentos de los sistemas de coordenadas geográficas y cartesianas.	Comprender el funcionamiento del Software Google Earth. Comprender la diferencia entre coordenadas UTM y Coordenadas Geográficas	Hacer uso del software Google Earth como un modelo tridimensional de la Tierra.	Emplear el sistema de coordenadas UTM y geográficas.	
3. Ubicación en un mapa topográfico	Conocer el sistema de coordenadas UTM.	Identificar sitios con respecto a la coordenada UTM. Comprender las nociones de orientación con base en direcciones y distancias.	Identificar puntos sobre un mapa topográfico definidos por medio de direcciones y distancias.		
4. Expresiones topográficas	Conocer la construcción de las curvas de nivel. La escala horizontal y vertical del mapa topográfico. El concepto de pendiente.	Comprender el significado de la configuración de las curvas de nivel en el mapa topográfico, así como la importancia de la escala para la realización de cálculos en el mapa topográficos.	Realizar dibujos a mano alzada para la construcción de configuraciones de modelos de curvas de nivel que representen geoformas, así como cálculos aritméticos con base en la escala del mapa para resolver problemas geométricos de la superficie del terreno.	Analizar la configuración de las curvas de nivel para interpretar la forma del relieve.	
5. Descripción de muestras de mano	Conocer las características físicas de una muestra de mano de roca.	Comprender la textura, mineralogía y estructura como elementos diagnósticos del tipo de roca.	Aplicar una metodología sencilla para la clasificación de la roca con base en sus características físicas.	Analizar las características físicas de los componentes y hacer estimaciones visuales.	Sintetizar la clasificación del tipo de roca con base en sus características físicas.
6. Notaciones de rumbo y echado	Conocer la notación estructural de rasgos planares con base en Rumbo, Echado y Cuadrante e Inclinación y dirección de la recta de máxima pendiente.	Comprender la notación y el símbolo estructural como una forma abreviada de indicar la geometría de un rasgo planar en el espacio.	Aplicar el uso de las coordenadas UTM para la ubicación de puntos en un mapa topográfico. La conversión de notación de planos a rectas de máxima pendiente.	Analizar la relación entre la notación y el símbolo de Rumbo y Echado.	Sintetizar la interpretación de la simbología de estructuras geológicas en un mapa topográfico.
7. Representaciones geológicas	Conocer la correspondencia entre la vista en planta y la vista en sección de las curvas de nivel. La simbología de litologías en una columna estratigráfica y de estructuras geológicas en planta y sección.	Comprender la correspondencia entre la vista en planta y vista en sección de un modelo geológico como una continuidad de la geometría de las estructuras geológicas en el subsuelo. La simbología estructural como una forma abreviada de la geometría de las estructuras geológicas.	Realizar dibujos a mano alzada para completar esquemas de modelos geológicos. Construcciones de secciones y vistas en planta con valores cuantitativos.	Analizar la relación entre la vista de planta y vista en sección de modelos geológicos que mantengan una congruencia geométrica.	Sintetizar las construcciones de la sección en columnas estratigráficas donde se observen las edades relativas entre unidades.
8. Patrón de afloramiento y superficies de contacto	Conocer la correspondencia de vistas en planta y vistas en sección de modelos con misma topografía y diferentes comportamientos de los cuerpos. El patrón de afloramiento de geometrías de unidades en distintas topografías.	Comprender el patrón de afloramiento como resultado de la intersección de dos superficies, el relieve topográfico y la geometría de las estructuras geológicas.	Realizar dibujos a mano alzada para completar las vistas de modelos geológicos en tres dimensiones.	Analizar las diferencias entre las vistas de modelos geológicos con diferentes topografías.	

**Tabla 1. Dominios-Niveles Taxonómicos de Bloom *et al.* (1956)
abordados en los laboratorios y prácticas del MTGC (Continuación)**

PRÁCTICAS	Conocer	Comprender	Aplicar	Analizar	Sintetizar
1. Uso de receptor GPS	Localizar y registrar con ayuda del receptor GPS sitios de interés.	Identificar por medio de coordenadas UTM sitios específicos en un mapa topográfico.	Hacer uso del receptor GPS y desarrollar su ubicación en un mapa topográfico.	Analizar coordenadas obtenidas mediante receptor GPS con mapas topográficos.	Combinar el uso del receptor GPS y mapas topográficos para obtener ubicaciones y distancias.
2. Observación estructurada	Reportar e identificar estructuras básicas.	Reafirmar la observación estructurada y la elaboración del dibujo geológico.	Aplicar el análisis y observación para la realización de un croquis de afloramiento.	Dibujar croquis de afloramientos detallando las estructuras observadas.	Desarrollar el proceso de observación estructurada.
3. Uso de la brújula cartográfica	Reproducir el uso de la brújula en afloramientos y estructuras.	Identificar y reconocer los datos estructurales por medio de la brújula.	Estimar con ayuda de la brújula los datos estructurales.	Experimentar la obtención de datos estructurales y el uso de diferentes notaciones.	Diagramar afloramientos con detalles geológicos. Graficar los datos en un mapa topográfico.
4. Ubicación en campo, visuales inversas	Ubicarse por medio de las visuales inversas con apoyo de la brújula.	Identificar un sitio con ayuda de direcciones obtenidas con la brújula.	Aplicar la metodología de las visuales inversas para ubicación de un punto.	Experimentar por medio de la observación y el uso de la brújula para localización en un mapa topográfico.	Reunir las diferentes metodologías para lograr ubicarse espacialmente, esto con ayuda de objetos distinguidos en un mapa topográfico.

de manejo sencillo y se ha notado que el alumnado se familiariza rápidamente con la interfaz y las aplicaciones para dispositivos móviles; sin embargo, es necesario que se apoyen en el mapa para registrar direcciones y comprender cabalmente el funcionamiento del sistema de posicionamiento global con sus fuentes de error inherentes.

Durante las actividades de uso de la brújula y observación estructurada (Prácticas 2 y 3) es notable que el estudiantado comienza con dificultades, ya que es la primera ocasión en la que utilizan una brújula en un afloramiento real. Sin embargo, durante el desarrollo de la práctica de observación estructurada (Práctica 3), tienen un mayor entendimiento del uso de la brújula para caracterizar estructuras geológicas y plasmar los datos obtenidos en un mapa topográfico. Vale la pena señalar que el estudiantado de estos semestres ya tiene nociones de la actitud de planos y líneas en el espacio debido a que previamente cursó la asignatura de Geometría Descriptiva Aplicada. En esta práctica se elaboran croquis de afloramientos y se practica el dibujo geológico. Es pertinente que el instructor recuerde la inclusión de elementos básicos como perfil topográfico, escala, orientación y simbología utilizada. Así mismo, esta actividad permite tener una visión general de la importancia en la adquisición cuidadosa de datos estructurales para la posterior interpretación de estructuras geológicas de mayor escala o inclusive regionales.

En cuanto a la metodología de ubicación por medio de visuales inversas (Práctica 4), el alumnado busca ubicarse con ayuda de la brújula y la medición de ángulos. Se ha observado que el estudiantado busca disminuir su error mejorando la posición de la brújula. Igualmente, trata de encontrar objetos evidentes o muy notorios y de fácil reconocimiento en los mapas topográficos. Con esta actividad se ha observado que el alumnado conoce y aplica un método clásico y eficiente con el cual el principal objetivo es que se pueda ubicar en campo sin ayuda del receptor GPS; así mismo, es importante hacerle notar que entiende las bases de ambos métodos y así utilizarlos para mejorar sus técnicas en campo.

Durante la actividad en la cual se explora el uso de la lupa para la caracterización de muestras de roca, se debe hacer énfasis en la observación sistemática, detallada y en la identificación de minerales y texturas. Se considera importante hacerle pensar que es diferente la elaboración de un esquema o dibujo geológico a la obtención de una fotografía, ya que los procesos mentales y cognitivos difieren en estas acciones. Así mismo, se busca que use correctamente tablas de identificación, clasificación y estimaciones visuales, lo que le da al alumnado una mejor perspectiva de cómo se caracterizan rocas y minerales en muestra de mano.

Los temas relacionados con los Laboratorios 7 y 8 (representaciones geológicas y patrón de afloramiento) no forman parte del temario; sin embargo, fueron diseñados para que el alumnado conozca la relación entre formas topográficas y estructuras geológicas, esto con el objetivo de que ejercite una visión espacial en tres o incluso en cuatro dimensiones. Es importante mencionar que el uso de modelos de papel y plastilina ayuda a cumplir los objetivos de estos laboratorios; sin embargo, no todo el alumnado logra visualizar completamente estas interrelaciones, por lo que se sugiere revisar los avances individuales y recalcarlos en la práctica de campo al final del curso.

Esquema virtual

Durante el periodo de impartición de clases en línea, debido a la emergencia sanitaria a nivel mundial (semestres 2020-2 a 2022-1), se observó que los laboratorios fueron de gran utilidad, ya que pueden ser ocupados para la impartición de clases en línea, a excepción del Laboratorio 5 (Descripción de muestras de mano).

La mayoría de las prácticas no pudieron ser realizadas al 100% debido a que es necesario contar con muestras de rocas o tener el acceso a sitios o afloramientos en donde se pueden observar diversas estructuras geológicas y con el uso de equipo caracterizar planos y rectas en el espacio.

Para la realización autónoma y autodidacta es necesario contar con un mapa topográfico y fotografía aérea del sitio en donde se trabaje y así identificar estos elementos. Durante este periodo de la pandemia se utilizaron diferentes plataformas digitales como apoyo a las actividades de enseñanza-aprendizaje (p.ej., plataformas como Google Earth, Sktechfab, Visible Geology, Gigapan), con las cuales el estudiantado puede observar, analizar y complementar lo aprendido en el aula y así explorar y conocer afloramientos remotos virtuales.

Práctica de campo intersemestral

La práctica de campo es una de las actividades fundamentales del curso de TGC, por lo que es importante que el alumnado visualice que las actividades realizadas y aprendidas durante el semestre serán aplicadas en la práctica de campo al final del semestre. Se ha observado que el alumnado llega con buenas capacidades a la práctica de campo y durante 5 días en campo se perfeccionan sus habilidades desarrolladas durante el semestre con apoyo de los laboratorios y las prácticas del MTGC. También se ha observado que las actividades realizadas tienen sentido para ellos, ya que relacionan el trabajo sistemático que deben realizar en cada afloramiento. Durante el transcurso de la práctica de campo, el alumnado analiza afloramientos y datos geológicos reales en los que aplican las metodologías ejercitadas durante el semestre. Se ha observado en estas prácticas que el alumnado tiene un buen desempeño en campo y propone interpretaciones coherentes de la evolución geológica en cada uno de los sitios visitados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como docentes, los autores consideramos que el MTGC sirve como una herramienta fundamental para tener un buen acercamiento a temas básicos y esenciales como cartografía topográfica y cartografía geológica, temas muy importantes para la formación de geocientíficos/os e ingenieros/as en Ciencias de la Tierra.

El orden y secuencia de laboratorios y prácticas está organizado partiendo de los temas básicos hasta llegar a temas más avanzados conforme al temario de la asignatura correspondiente (Figura 1). Esta secuencia requiere de la comprensión y entendimiento de los fundamentos topográficos a la posterior relación con estructuras geológicas de una complejidad mayor.

Estas prácticas pueden ser replicadas en diversos sitios así como de manera autodidacta. Para el caso de los laboratorios donde se usan mapas topográficos se pueden usar cartas topográficas de diversas escalas donde se presenten relieves variables y que contengan la simbología topográfica básica.

Al implementar el manual analizado en este trabajo e interactuar con el estudiantado se observó que se cumplen dos objetivos: 1) ellas/os adquieren un aprendizaje significativo del temario de TGC abordado en el aula y 2) el curso teórico de TGC con apoyo del MTGC resulta motivante y las prácticas les dejan una experiencia enriquecedora y divertida.

Durante los semestres en los que se ha aplicado el uso del Manual de Laboratorios y Prácticas de la asignatura Técnicas Geológicas de Campo como apoyo para la asignatura Técnicas Geológicas de Campo, se ha visto un mejor entendimiento y comprensión de los fundamentos de cartografía topográfica y geológica por parte del estudiantado; así mismo, se observó que el estudiantado mejoró sus habilidades de descripción e interpretación durante la práctica de campo al final del semestre, cuando se analizan datos reales y se aplican los conocimientos adquiridos en la teoría y con cursos complementarios.

De esta forma se ha observado que el alumnado ha logrado llevar a cabo el curso de manera exitosa y le ha servido de manera considerable para la práctica de habilidades de orientación espacial y visualización tridimensional en campo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos los comentarios y sugerencias de los revisores anónimos que ayudaron a mejorar sustancialmente este manuscrito. Así mismo, agradecemos a los Dres. Gilberto Silva Romo y Enrique Alejandro González Torres por sus comentarios y sugerencias durante la elaboración y revisión del Manual de laboratorios y prácticas de la asignatura Técnicas geológicas de campo y a todo el estudiantado que ha trabajado con el manual a lo largo de este tiempo y que ha ayudado a mejorar las prácticas y los laboratorios.

REFERENCIAS

- Allmendinger, R.W., Siron, C.R., and Scott, C.P., (2017), Structural data collection with mobile devices: Accuracy, redundancy, and best practices: *Journal of Structural Geology*, v. 102, p. 98–112.
- Bloom, B., Englehart, M. Furst, E., Hill, W., & Krathwohl, D. (1956). *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain*. New York, Toronto: Longmans, Green.
- Brusi, D., Zamorano, M., Casellas, R. M., & i Plaza, J. B. (2011). Reflexiones sobre el diseño por competencias en el trabajo de campo en Geología. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19(1), 4-4.
- Coe Angela (Editora), 2010, *Geological Field Techniques*, Wiley-Blackwell, EUA, 336 pp.
- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Temario de la asignatura Técnicas Geológicas de Campo: Recuperado de: https://www.ingenieria.unam.mx/programas_academicos/licenciatura/Geologica/2016/asignaturas_geologica_2016.pdf
- Programa Google Earth para visualización de imágenes satelitales <https://earth.google.com>
- Programa Visible Geology: <https://app.visiblegeology.com/>
- Página Sketchfab: <https://sketchfab.com/>
- Página Gigapan: <http://gigapan.com/>
- Shiple, T. F., Tikoff, B., Ormand, C., & Manduca, C. (2013). Structural geology practice and learning, from the perspective of cognitive science. *Journal of Structural Geology*, 54, 72-84.
- Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C.C., y Campos-Madrugal, E. 2010. *Elementos de Cartografía Geológica*, E-Pub. ISBN 978-607-02-7900-3. Facultad de Ingeniería. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/9786070279003e.2016>. <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/291>.
- Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C.C. (eds). 2016. *Trabajo geológico de campo*. E-Pub. ISBN 978-607-02-7908-9. Facultad de Ingeniería. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/>

ANEXOS

Este manuscrito está acompañado del “Manual de laboratorios y prácticas de la asignatura Técnicas geológicas de campo” tanto en versión PDF como en versión digital, ubicado en la página de internet:

<https://sites.google.com/ingenieria.unam.edu/manual-tgc/>.

Así mismo, se presentan algunos de los laboratorios y prácticas resueltos por el alumnado para que sirvan como evidencia de lo descrito y analizado en este trabajo.

Manuscrito recibido: 1 de mayo de 2022

Manuscrito corregido recibido: 20 de septiembre de 2022

Manuscrito aceptado: 23 de septiembre de 2022

ESTUDIO GEOQUÍMICO DE UN SISTEMA MAGMÁTICO COMO DETONADOR DE COMPETENCIAS PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Laura Mori^{1*} y Eduardo Becerra-Torres²

¹Departamento 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. *mori@unam.mx

² Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México. Boulevard Juriquilla 3001, Querétaro, C.P. 76230, México. becerra@unam.mx

* autora para correspondencia

RESUMEN

La actividad didáctica "El magmatismo del Eoceno tardío-Oligoceno temprano del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur: petrogénesis, relación con los depósitos hidrotermales locales y repercusiones ambientales de la extracción minera asociada" está diseñada para implementarse en licenciaturas y posgrados de Ingeniería Geológica o Ciencias de la Tierra que contemplan en su plan de estudios el aprendizaje de la geoquímica y petrogénesis ígnea. La actividad consta de dos secciones. En la primera, las y los estudiantes utilizan los datos geoquímicos de rocas ígneas de la Sierra Madre del Sur como herramientas para aclarar el origen del episodio magmático más significativo que afectó el sur de México durante el Paleógeno, mientras que, en la segunda, transfieren a contextos prácticos el conocimiento generado, aprovechándolo para establecer la relación entre el volcanismo y el desarrollo de yacimientos hidrotermales en el área o evaluar las problemáticas ambientales provocadas por la actividad minera.

La actividad didáctica ofrece la oportunidad de reforzar habilidades de análisis, indagación y resolución de problemas, que representan competencias esenciales para las y los futuros profesionistas en geociencias.

Palabras clave: Geoquímica de rocas ígneas, yacimientos minerales, geología ambiental, habilidades de análisis e indagación.

ABSTRACT

The didactic activity "The late Eocene-early Oligocene magmatic episode of the north-central Sierra Madre del Sur: petrogenesis, relationship with local hydrothermal deposits and environmental consequences of mineral extraction" is designed for undergraduate and master courses of Geological Engineering or Earth Sciences that are focused on geochemistry and igneous petrogenesis.

The activity consists of two sections. In the first part, students use geochemical data of igneous rocks from the Sierra Madre del Sur to clarify the origin of the most significant magmatic episode that affected southern Mexico during the Paleogene; in the second part, they use the acquired knowledge to define the relationship between volcanic activity and the development of local hydrothermal deposits and to analyze the environmental problems caused by mining activity.

This didactic activity offers the opportunity to develop analytical and problem-solving skills that are essential for future professionals in geosciences.

Keywords: Geochemistry of igneous rocks, mineral deposits, environmental geology, inquiry and analytical skills.

INTRODUCCIÓN

En México, gran parte de los yacimientos minerales están asociados con sistemas magmáticos. Para poder establecer criterios de exploración de dichos recursos, es fundamental que las y los geólogos sean capaces de caracterizar químicamente los cuerpos magmáticos, extraer información sobre la petrogénesis a partir de los datos geoquímicos y valorar la relación genética entre el sistema ígneo y el sistema explotable tomando en cuenta el contexto geológico. La comprensión integral de un sistema ígneo-metalogénico puede aportar también información valiosa para resolver problemas ambientales relacionados con la explotación de los recursos minerales y definir las estrategias de remediación.

Estas consideraciones remarcan que, durante su formación académica, las y los geólogos deberían lograr un aprendizaje significativo de la geoquímica de rocas ígneas, desarrollar la habilidad de investigar la petrogénesis de un sistema magmático y obtener las competencias necesarias para vincular los conocimientos adquiridos a distintos ámbitos laborales, como la exploración de recursos minerales o la geología ambiental.

Las investigaciones educativas de las últimas décadas documentan que el nivel de adquisición del aprendizaje y el desarrollo cognitivo del alumnado incrementan proporcionalmente a su involucramiento en actividades que le permitan explorar aplicaciones e implicaciones (Knight y Wood, 2005; Smith *et al.*, 2005; Wirth, 2007; Freeman *et al.*, 2014). Entre las técnicas de aprendizaje activo, la enseñanza-aprendizaje con datos y la resolución de problemas se consideran entre las más eficaces ya que, al reforzar las habilidades cuantitativas y de razonamiento y al fomentar la capacidad de indagación, promueven una comprensión más profunda y persistente del contenido de una disciplina y facilitan la transferencia del aprendizaje a contextos diversos (Hunter *et al.*, 2007; Perkins, 2007; Lopatto, 2010). Estas competencias de alto orden son exactamente las que se necesitan para desempeñarse de manera eficaz en el campo laboral, pues hoy en día las empresas requieren de profesionistas que sean capaces de procesar, examinar, interpretar datos e investigar para contestar preguntas o resolver problemas concretos.

En esta contribución presentamos una actividad didáctica que, a partir de la enseñanza con datos y la resolución de un problema petrogenético, fomentará el aprendizaje significativo de la geoquímica de rocas ígneas y, al establecer vínculos con otras disciplinas como la metalogenia y la geología ambiental, impulsará la formación integral de las y los estudiantes de Ciencias de la Tierra y la adquisición de habilidades estratégicas para su desarrollo como profesionistas.

METODOLOGÍA

La actividad que proponemos está diseñada para implementarse en cursos de licenciatura o maestría que contemplen el aprendizaje de la geoquímica de rocas ígneas y el uso de los elementos mayores, traza e isótopos radiogénicos como herramientas para entender el origen y la evolución de los sistemas magmáticos. En específico, la actividad está dirigida a estudiantes de asignaturas como Geoquímica, Petrología Ígnea o Petrogénesis Ígnea que se imparten regularmente en carreras o posgrados de Ingeniería Geológica o Ciencias de la Tierra.

La actividad didáctica consta de dos secciones A y B -esta última con dos variantes B₁ y B₂- que presentan objetivos de aprendizaje distintos. La sección A pretende fomentar el aprendizaje significativo de la geoquímica de rocas ígneas a través de la enseñanza con datos y el desarrollo guiado de una investigación petrogenética. Por otra parte, las secciones B₁ y B₂ son complementos formativos que impulsan el desarrollo integral de las y los estudiantes al permitirles transferir el conocimiento geoquímico adquirido a diferentes contextos profesionalizantes (B₁: formación de yacimientos minerales asociados con el sistema magmático examinado y B₂: problemas ambientales relacionados con la actividad minera).

Para el desarrollo de la actividad se proporcionan a las y los estudiantes recursos didácticos diversos, los cuales están organizados en cuatro anexos: el Anexo 1 es una base de datos geoquímicos de rocas volcánicas de la Sierra Madre del Sur y de las litologías que conforman el basamento, el Anexo 2 contiene las cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano del área de estudio, mientras que, en los Anexos 3 y 4, se proporcionan los enlaces a publicaciones enfocadas a los yacimientos minerales y a los problemas ambientales relacionados con la actividad minera.

Las secciones A, B₁ y B₂ se desarrollan en etapas, o puntos, de manera que el alumnado pueda construir el aprendizaje de manera progresiva y para que el docente pueda monitorear sistemáticamente el rendimiento de cada estudiante. Cada punto permite el entrenamiento y la evaluación de habilidades específicas que pueden ser muy básicas (por ejemplo, graficar, clasificar y describir) o involucrar niveles de pensamiento más elevados (por ejemplo, interpretar, analizar, investigar, relacionar, comparar, integrar, sintetizar, evaluar y crear).

La actividad podría asignarse como un trabajo de investigación para realizar en casa al finalizar el curso, pero también podría implementarse por etapas en el salón conforme se vayan introduciendo nuevos contenidos temáticos. En el primer caso, la actividad permitiría llevar a cabo la evaluación sumativa de los aprendizajes adquiridos sobre la geoquímica de elementos mayores, traza e isótopos radiogénicos en sistemas magmáticos; en el segundo, representaría más bien un válido instrumento de evaluación formativa.

ACTIVIDAD: “EL MAGMATISMO DEL EOCENO TARDÍO-OLIGOCENO TEMPRANO DEL SECTOR NORTE-CENTRAL DE LA SIERRA MADRE DEL SUR: PETROGÉNESIS, RELACIÓN CON LOS DEPÓSITOS HIDROTÉRMICALES LOCALES Y REPERCUSIONES AMBIENTALES DE LA EXTRACCIÓN MINERA ASOCIADA”

Antecedentes

La Sierra Madre del Sur (SMS): contexto geológico-tectónico

La SMS es un arco volcánico continental relacionado con la subducción de la antigua placa de Farallón bajo Norteamérica. Esta provincia magmática, que se formó en un periodo de tiempo que abarca desde el Cretácico tardío al Mioceno temprano, se extiende por más de 1000 km desde Puerto Vallarta hacia el Istmo de Tehuantepec, delimitada al norte por el Cinturón Volcánico Mexicano (el arco volcánico activo) y al sur por el Océano Pacífico (Morán-Zenteno *et al.*, 2018; Figura 1).

Episodios magmáticos del Eoceno tardío-Oligoceno temprano en la SMS norte-central

Durante el Eoceno tardío-Oligoceno temprano, una intensa actividad magmática se desarrolló en los estados de Michoacán, Estado de México, Morelos, Guerrero y Puebla, produciendo uno de los mayores pulsos de volcanismo silíceo explosivo del sur de México (Morán-Zenteno *et al.*, 2007; Mori *et al.*, 2012). Entre 38 y 30 Ma, erupciones caldéricas y fisurales generaron una cadena de estructuras de colapso, complejos de diques piroclásticos, domos riolíticos, pequeños cuerpos hipabisales y lavas intermedias-silíceas que conforman los centros volcánicos de Nanchititla, San Vicente, Valle de Bravo, Muñeca, Las Paredes, Goleta, Taxco, Tilzapotla y Huautla (Figura 1). Durante este evento magmático se produjo una enorme cantidad de depósitos de ignimbritas, cuyo volumen preservado rebasa los ~2500 km³. El emplazamiento de las sucesiones silíceas y las intrusiones hipabisales fue favorecido y controlado por un sistema de fallas laterales izquierdas que afectó la región en ese periodo.

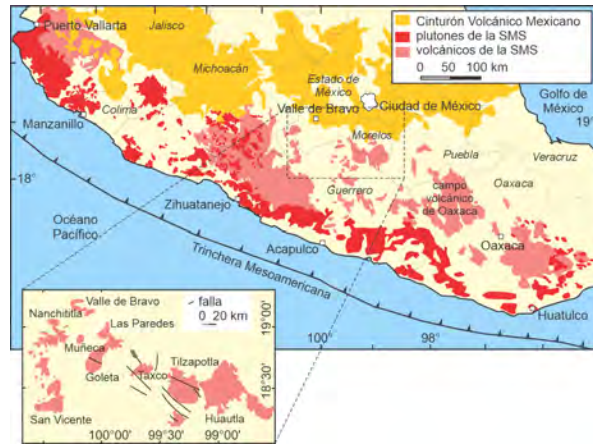


Figura 1. Mapa esquemático del sur de México que muestra la distribución del Cinturón Volcánico Mexicano y de las franjas plutónicas y volcánicas que conforman la provincia magmática de la SMS. En el recuadro abajo a la izquierda se aprecia con más detalle la distribución de los centros explosivos silíceos del Eoceno tardío-Oligoceno temprano que representan el caso de estudio. Modificado de Mori *et al.* (2012).

Durante el Oligoceno temprano (33-29 Ma), el magmatismo se desarrolló también en el sector norte-occidental de Oaxaca (Figura 1), pero con características vulcanológicas y geoquímicas distintas, ya que en esta zona se generaron volcanes compuestos y conos monogenéticos de composición máfica-intermedia (Martiny *et al.*, 2000; Mori *et al.*, 2012).

Geología del basamento

Las secuencias volcánicas del Eoceno tardío-Oligoceno temprano están emplazadas sobre bloques corticales con edades, litologías e historias tectónicas contrastantes.

Los centros silíceos están emplazados sobre el terreno Guerrero, de edad Mesozoica, localmente representado por el Esquisto Tejupilco y el grupo Arcelia Palmar-Chico: el primero es una secuencia polideformada de filitas, esquistos de micas y rocas volcánicas intrusionadas por cuerpos plutónicos silíceos, mientras que el otro es una sucesión de calizas, areniscas y lavas máficas (Elías-Herrera *et al.*, 2000). Xenolitos de orto- y paragneiss encontrados en los productos piroclásticos de La Goleta documentan la existencia de rocas granulitizadas en niveles de la corteza media (Elías-Herrera y Ortega-Gutiérrez, 1997).

Por otra parte, el campo volcánico de Oaxaca descansa sobre el complejo Acatlán, una sucesión volcanosedimentaria paleozoica de afinidad oceánica y continental afectada por metamorfismo en facies de esquistos verdes, anfibolita y eclogita y posteriormente intrusionada por magmas graníticos y sujeta a migmatización (Ortega-Gutiérrez, 1981). El complejo Acatlán se extiende hasta la base de la corteza media (~20 km), mientras que la corteza inferior está conformada por las granulitas grenvillianas del microcontinente Oaxaquia (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2008).

Sección A. Estudio petrogenético del episodio magmático

En esta sección llevarás a cabo una investigación petrogenética del magmatismo del Eoceno tardío-Oligoceno temprano del sector norte-central de la SMS, es decir, entenderás el origen de estas secuencias volcánicas a partir del análisis e interpretación de su composición química e isotópica.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta sección, serás capaz de:

- graficar, describir e interpretar los datos de elementos mayores, traza e isótopos radiogénicos de una secuencia de rocas ígneas;
- plantear hipótesis genéticas para las rocas ígneas examinadas y validar dichas hipótesis usando las herramientas geoquímicas disponibles;
- integrar un modelo petrogenético-tectónico que explique el origen de las rocas ígneas examinadas a partir de la información geoquímica y geológica disponible.

En el archivo Excel del Anexo 1 se proporcionan los datos de elementos mayores, traza y relaciones isotópicas de Sr y Nd de los productos emitidos por centros volcánicos representativos del sector norte-central de la SMS (calderas de Tizapotta, Muñeca y campo volcánico de Oaxaca; Mori *et al.*, 2012) y los datos geoquímicos disponibles para las rocas que conforman los diferentes niveles del basamento continental (Schaaf, 1990; Centeno-García *et al.*, 1993; Mendoza y Suastegui, 2000; Elías-Herrera, 2004; Martínez-Serrano *et al.*, 2004; Ortega-Obregón *et al.*, 2009).

1. Grafica los datos de elementos mayores de los diferentes centros volcánicos en el diagrama de álcalis totales ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) contra sílice de Le Bas *et al.* (1986). Lleva a cabo la clasificación química de los productos emitidos en cada centro y describe para cada uno el rango de variación de sílice de los magmas.

Habilidades específicas que entrenarás: graficar, clasificar y describir.

2. Grafica los datos de elementos mayores de los diferentes centros volcánicos en diagramas de variación usando la sílice como índice de diferenciación. Procura reportar el mismo rango de variación de sílice en todos los diagramas (del 50 al 80 wt.%) y elige la escala del eje de manera que permita observar claramente cómo varían las concentraciones de cada elemento mayor y cómo correlacionan con la sílice. Describe los patrones observados.

Habilidades específicas que entrenarás: graficar y describir.

3. Interpreta los patrones observados en los diagramas de variación, procurando identificar los minerales que pudieron haber cristalizado durante la evolución de las rocas volcánicas examinadas. Primero, examina la composición química de los minerales que se enlistan abajo (principales minerales formadores y accesorios de

las rocas ígneas) e infiere qué cambios produciría la cristalización de cada uno en la composición de elementos mayores del líquido residual. Posteriormente, revisa si las correlaciones observadas en los diferentes diagramas son consistentes con la cristalización de dichos minerales.

- Olivino: $(Mg,Fe)_2SiO_4$
- Piroxeno: $Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$
- Plagioclasa: $CaAl_2Si_2O_8-NaAlSi_3O_8$
- Granate: $(Ca,Fe,Mg)_3Al_2(SiO_4)_3$
- Anfíbol: $Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$
- Feldespato potásico: $KAlSi_3O_8$
- Biotita: $K(Mg,Fe)_3Si_4O_{10}(OH)_2$
- Muscovita: $KAl_2Si_4O_{10}(OH)_2$
- Apatito (accesorio): $Ca_5(PO_4)_3(OH)$
- Ilmenita (accesorio): $FeTiO_3$
- Magnetita (accesorio): Fe_3O_4

Habilidades específicas que entrenarás: relacionar e interpretar.

4. Construye tres diagramas de variación de elementos traza contra sílice para comprobar si tus interpretaciones sobre los minerales que fraccionaron durante la evolución de la secuencia volcánica examinada son correctas. Elige los elementos traza con base en su compatibilidad con los minerales que consideras cristalizaron. Habilidades específicas que entrenarás: analizar, graficar y evaluar.

5. Normaliza los datos de elementos traza de las rocas volcánicas respecto a la composición del basalto de dorsal mesoocéanica que se proporciona en el archivo Excel (Sun y McDonough, 1989) y graficalos en diagramas multielementales (construye un diagrama por cada centro volcánico). Usa una escala logarítmica en el eje de las ordenadas y reporta un rango de variación entre 0.1 y 10 000. Describe los patrones observados. Habilidades específicas que entrenarás: graficar y describir.

6. Explica los patrones multielementales de cada centro volcánico en función del contexto tectónico en el cual se formó (magmatismo en zona de subducción) y tomando en consideración tus interpretaciones de la geoquímica de elementos mayores. Habilidades específicas que entrenarás: relacionar y explicar.

7. Grafica los datos isotópicos de los productos volcánicos en un diagrama de relaciones isotópicas de Nd contra relaciones isotópicas de Sr. En el mismo diagrama, grafica también los datos isotópicos disponibles para las diferentes litologías del basamento. Describe los patrones observados. Habilidades específicas que entrenarás: graficar y describir.

8. Toma en cuenta la información disponible sobre la composición isotópica de las rocas del basamento y genera una hipótesis que permita explicar la variabilidad isotópica observada en cada centro volcánico. Habilidades específicas que entrenarás: analizar, valorar y crear.

9. ¿Qué diagrama podrías construir para averiguar si los magmas emitidos por los diferentes centros volcánicos asimilaron litologías del basamento durante la diferenciación por cristalización fraccionada? Genera el diagrama, evalúa si soporta la hipótesis que has planteado en el punto 8 y explica tu razonamiento. Habilidades específicas que entrenarás: analizar, graficar, interpretar y evaluar.

10. Tomando en cuenta los contrastes geoquímicos entre las rocas que conforman los diferentes niveles del basamento del área de estudio, construye un diagrama de relaciones isotópicas de Nd contra relaciones Rb/Nd y determina en qué nivel de la corteza ocurrió la asimilación y cuáles fueron las litologías asimiladas por los magmas de los diferentes centros volcánicos. Habilidades específicas que entrenarás: graficar e identificar.

11. Tomando en cuenta tu respuesta al punto 10 y recordando que el tipo de aluminosilicato que se fracciona del líquido residual depende de la profundidad de cristalización magmática, construye los diagramas de La/Yb contra SiO_2 , Sm/Yb contra La/Yb y anomalía de Eu contra SiO_2 e identifica si la asimilación cortical en los diferentes centros volcánicos ocurrió simultáneamente a la cristalización de plagioclasa (condiciones de cristalización superficiales) o granate (cristalización en niveles más profundos de la corteza). Justifica tu respuesta basándote en el grado de compatibilidad de La, Sm, Eu e Yb con las fases consideradas. Habilidades específicas que entrenarás: graficar, identificar y explicar.

12. Por cada centro volcánico, realiza un bosquejo que sintetice de manera clara la información petrogenética extraída de los datos de elementos mayores, traza e isótopos radiogénicos. Enfócate a representar los procesos que modificaron la composición de los magmas durante su ascenso y estacionamiento en la corteza continental (indica en qué nivel cortical ocurrió la evolución magmática, las litologías corticales involucradas en la petrogénesis y las fases minerales producidas por cristalización fraccionada). Habilidades específicas que entrenarás: integrar, sintetizar y crear.

13. Ahora que has visualizado los procesos responsables de la generación de cada centro volcánico, compara los diferentes escenarios y evalúa las analogías y diferencias. Con base en dicha comparación, integra toda la información disponible sobre la edad, características vulcanológicas, geología del basamento y petrogénesis de los centros volcánicos en un único modelo a la escala regional y plásmalo en un bosquejo. Habilidades específicas que entrenarás: comparar, integrar, sintetizar y crear.

Sección B₁. Conexión entre el sistema magmático y los depósitos hidrotermales locales

En esta sección transferirás los conocimientos derivados de tu investigación petrogenética a un contexto profesionalizante como la exploración de los recursos minerales asociados con los cuerpos ígneos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta sección, serás capaz de:

- reconocer el tipo de yacimientos minerales que suelen estar asociadas con cuerpos magmáticos silíceos;
- plantear hipótesis para explicar la formación de yacimientos hidrotermales en correspondencia de las secuencias volcánicas examinadas;
- establecer criterios para inferir la ubicación potencial de nuevos yacimientos hidrotermales en otras áreas del país.

En las cartas geológico-mineras E14-1, E14-4, E14-5 y E14-9 del Servicio Geológico Mexicano (Anexo 2) se aprecia la distribución de los centros volcánicos examinados.

1. Apoyándote en la leyenda de las cartas, identifica cuáles recursos mineros se están explotando en proximidad de los centros volcánicos e indica a qué tipo de minas corresponden, así como las características del depósito mineral (forma, origen y naturaleza de la mineralización).

Habilidades específicas que entrenarás: leer un mapa e identificar.

2. Identifica cuáles son los depósitos minerales más recurrentes en proximidad de los centros volcánicos e indica si se concentran preferentemente en el sector del magmatismo silíceo o hacia el campo volcánico de Oaxaca.

Habilidades específicas que entrenarás: leer un mapa e identificar.

3. Como habrás observado, los depósitos hidrotermales/epitermales polimetálicos más importantes de la región (distritos mineros de Taxco, Temascaltepec, Sultepec y Huautla) se concentran preferentemente hacia el sector del magmatismo silíceo. Para ellos se han documentado edades similares a las del evento ígneo, lo que sugiere una relación genética. ¿En qué manera los procesos involucrados en la evolución del magmatismo silíceo podrían haber promovido el enriquecimiento en metales de los fluidos hidrotermales mineralizantes? Plantea una hipótesis tomando en cuenta el concepto de compatibilidad/incompatibilidad de los elementos químicos.

Habilidades específicas que entrenarás: relacionar, analizar y crear.

4. Consulta la bibliografía proporcionada sobre yacimientos minerales (Anexo 3: González-Partida y Torres-Rodríguez, 1988; Robb, 2005; Camprubí y Albinson, 2006; González-Partida *et al.*, 2015; Pi *et al.*, 2017; Espinoza-Sánchez, 2020) e investiga cuáles son los principales factores de formación de los depósitos hidrotermales. ¿En qué manera las características del evento de magmatismo silíceo que has plasmado en el bosquejo (sección A, punto 13) podrían satisfacer dichos requisitos? Contesta la pregunta tomando en cuenta parámetros como la magnitud y persistencia del sistema magmático, la profundidad inferida de los reservorios, la modalidad eruptiva de los magmas y/o el régimen tectónico activo en la región durante el desarrollo del magmatismo.

Habilidades específicas que entrenarás: investigar, analizar, relacionar y explicar.

5. Considerando tus respuestas a los puntos previos, genera un cuadro de los criterios que podrían ayudarte a identificar la ubicación potencial de nuevos yacimientos hidrotermales en otras áreas del país.

Habilidades específicas que entrenarás: integrar, evaluar, sintetizar y transferir conocimiento.

Sección B₂. Impacto ambiental de los depósitos hidrotermales asociados con el sistema magmático examinado

En esta sección te informarás sobre el tipo de yacimientos minerales asociados con el evento magmático examinado y transferirás dichos conocimientos a un contexto profesionalizante como la evaluación de las problemáticas ambientales relacionadas con la actividad minera.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta sección, serás capaz de:

- reconocer el tipo de yacimientos minerales que están asociados con el evento magmático examinado;
- identificar las problemáticas ambientales provocadas por la

explotación de los yacimientos minerales en el área de estudio;

- evaluar la información disponible sobre el tipo de yacimientos minerales y las problemáticas ambientales asociadas en el marco de las Normas Oficiales Mexicanas.

En las cartas geológico-mineras E14-1, E14-4, E14-5 y E14-9 del Servicio Geológico Mexicano (Anexo 2) se aprecia la distribución de los centros volcánicos examinados.

1. Apoyándote en la leyenda de las cartas, identifica cuáles recursos mineros se están explotando en proximidad de los centros volcánicos e indica a qué tipo de minas corresponden, así como las características del depósito mineral (forma, origen y naturaleza de la mineralización).

Habilidades específicas que entrenarás: leer un mapa e identificar.

2. Basándote en la bibliografía proporcionada sobre el tema (Anexo 4: Nriagu, 1994; Arcega-Cabrera *et al.*, 2009; Mussali-Galante *et al.*, 2013; Dótor-Almazán *et al.*, 2014; Esteller *et al.*, 2015), investiga qué problemas ambientales se han documentado en la región a causa de la meteorización de los ambientes extractivos. Sintetiza la información obtenida de manera gráfica, generando un mapa mental.

Habilidades específicas que entrenarás: investigar, integrar y sintetizar.

Revisa las Normas Oficiales Mexicanas “NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos” (<https://bit.ly/3SmkvWI>), “NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros” (<https://bit.ly/3RZJJKm>) y “NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio” (<https://bit.ly/3QQBGHy>).

3. Basándote en tu respuesta al punto 1 y en las Normas Oficiales Mexicanas que has revisado, enlista los requerimientos mínimos que se tienen que respetar para que los complejos mineros que has identificado en el área de estudio cumplan con las normas.

Habilidades específicas que entrenarás: relacionar, evaluar y sintetizar.

4. Basándote en tu respuesta al punto 3 y en las Normas Oficiales Mexicanas que has revisado, evalúa si en el área de estudio se ha documentado algún problema ambiental que no está considerado en las normas y construye una propuesta de mejora de estas.

Habilidades específicas que entrenarás: relacionar, evaluar y crear.

CONCLUSIONES

Nuestra propuesta didáctica ofrece a las y los estudiantes de Ciencias de la Tierra la oportunidad de reforzar habilidades de procesamiento, descripción, análisis e interpretación de datos geoquímicos, así como de información geológica relevante en forma de mapas, artículos científicos, libros de texto o documentos normativos. Al mismo tiempo, la actividad permite entrenar las habilidades de indagación y resolución de problemas. Diseñar e implementar estrategias didácticas de este tipo en los cursos de licenciatura y posgrado es clave si queremos garantizar aprendizajes significativos y el desarrollo integral de las y los futuros profesionistas en geociencias.

AGRADECIMIENTOS

La actividad propuesta forma parte de una colección de recursos didácticos generados en el marco de los proyectos PAPIME PE102917 y PE103618 financiados por DGAPA-UNAM y dirigidos por la Dra. Mori.

ANEXOS

[Anexo 1. Base de datos geoquímicos](#)

[Anexo 2. Cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano](#)

[Anexo 3. Bibliografía sobre yacimientos minerales](#)

[Anexo 4. Bibliografía sobre minería y problemas ambientales](#)

REFERENCIAS

- Arcega-Cabrera, F., Armienta, M.A., Daesslé, L.W., Castillo-Blum, S.E., Talavera, O. y Dótor, A. (2009). Variations of Pb in a mine-impacted tropical river, Taxco, Mexico: use of geochemical, isotopic and statistical tools. *Applied Geochemistry*, 24, 162-171.
- Camprubí, A. y Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58, 27-81.
- Centeno-García, E., Ruiz, J., Coney, P.J., Patchett, P.J. y Ortega-Gutiérrez, F. (1993). Guerrero terrane of Mexico: its role in the Southern Cordillera from new geochemical data. *Geology*, 21, 419-422.
- Dótor, A., Armienta-Hernández, M., Arcega-Cabrera, F. y Talavera-Mendoza, O. (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: aplicación de isótopos estables. *Hidrobiológica*, 24, 245-256.
- Elías-Herrera, M. (2004). Geología Precenozoica de la región de Tejupilco, Estado de México, y sus implicaciones tectónicas (tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Elías-Herrera, M. y Ortega-Gutiérrez, F. (1997). Petrology of high-grade metapelitic xenoliths in an Oligocene rhyodacite plug- Precambrian crust beneath the southern Guerrero terrane, Mexico? *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14, 101-109.
- Elías-Herrera, M., Sánchez-Zavala, J.L. y Macías-Romo, C. (2000). Geological and geochronological data of Guerrero terrane in the Tejupilco area, southern Mexico: new constrains on its tectonic interpretation. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 355-375.
- Espinoza-Sánchez, A. (2020). Apuntes de yacimientos magmático-hidrotermales para el curso de metalogenia de la Facultad de Ingeniería (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Esteller, M.V., Domínguez-Mariani, E., Garrido, S.E. y Áviles, M. (2015). Groundwater pollution by arsenic and other toxic elements in an abandoned silver mine, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 74, 2893-2906.
- Freeman, S., Eddy, S.L., McDonough, M., Smith, M.K., Okoroafor, N., Jordt, H. y Wenderoth, M.P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (23), 8410-8415.
- González-Partida, E., González-Ruiz, L., Yáñez-Dávila, D., Díaz-Carreño, E., Romero-Roja, M.C. y Romero-Rojas, W. (2015). Aspectos de la interacción agua/roca en yacimientos geotérmicos (Los Azufres y Los Humeros) y su relación con el epitermalismo fósil (Taxco y Guanajuato). *Memorias del XXII Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana*.
- González-Partida, E. y Torres-Rodríguez, V. (1988). Evolución tectónica de la porción centro-occidental de México y su relación con los yacimientos minerales asociados. *Geofísica Internacional*, 27, 543-581.
- Hunter, A.B., Laursen, S.L. y Seymour, E. (2007). Becoming a scientist: the role of undergraduate research in students' cognitive, personal, and professional development. *Science Education*, 91 (1), 36-74.
- Knight, J.K. y Wood, W.B. (2005). Teaching more by lecturing less. *Cell Biology Education*, 4, 298-310.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. y Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Lopatto, D. (2010). Undergraduate research as a high-impact student experience. *Peer Review*, 12 (2), 27-30.
- Martínez-Serrano, R., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G., Hernández-Bernal, M.S., Hernández-Treviño, T., Morales-Contreras, J.J. y Macías, J.L. (2004). Sr, Nd, Pb isotope and geochemical data from the Quaternary Nevado de Toluca volcano, a source of recent adakitic magmatism, and the Tenango Volcanic Field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 138, 77-110.
- Martiny, B., Martínez-Serrano, R., Morán-Zenteno, D., Macías-Romo, C. y Ayuso, R. (2000). Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the Oligocene magmatic rocks in western Oaxaca, southern Mexico. *Tectonophysics*, 318, 71-98.
- Mendoza, O.T. y Suastegui, M.G. (2000). Geochemistry and isotopic composition of the Guerrero Terrane (western Mexico): implications for the tectono-magmatic evolution of southwestern North America during the Late Mesozoic. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 297-324.
- Morán-Zenteno, D., Cerca, M. y Keppie, J.D. (2007). The Cenozoic tectonic and magmatic evolution of southwestern Mexico: advances and problems of interpretation. *Geological Society of America Special Paper*, 422, 71-91.
- Morán-Zenteno, D., Martiny, B., Solari, L., Mori, L., Luna-González, L. y González-Torres, E. (2018). Cenozoic magmatism of the Sierra Madre del Sur and tectonic truncation of the Pacific margin of southern Mexico. *Earth-Science Reviews*, 183, 85-114.
- Mori, L., Morán-Zenteno, D., Martiny, B., González-Torres, E., Chapela-Lara, M., Díaz-Bravo, B. y Roberge, J. (2012). Thermomechanical maturation of the continental crust and its effects on the Late Eocene-Early Oligocene volcanic record of the Sierra Madre del Sur Province, southern Mexico. *International Geology Review*, 54, 1475-1496.
- Mussali-Galante, P., Tovar-Sánchez, E., Valverde, M., Valencia-Cuevas, L. y Rojas, E. (2013). Evidence of population genetic effects in *Peromyscus melanophrys* chronically exposed to mine tailings in Morelos, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 7666-7679.
- Nriagu, J. (1994). Mercury pollution from the past mining of gold and silver in the Americas. *Science of the Total Environment*, 149, 167-181.
- Ortega-Gutiérrez, F. (1981). Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. *Geofísica Internacional*, 20, 177-202.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M. y Dávalos-Elizondo, M.G. (2008). On the nature and role of the lower crust in the volcanic front of the Trans-Mexican Volcanic Belt and its fore-arc region, southern and central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 346-364.
- Ortega-Obrigón, C., Murphy, B. y Keppie, D. (2009). Geochemistry and Sm-Nd isotopic systematics of Ediacaran-Ordovician, sedimentary and bimodal igneous rocks in the western Acatlán Complex, southern Mexico: evidence for rifting on the southern margin of the Rheic Ocean. *Lithos*, 114, 155-167.
- Perkins, D. (2007). What should our students learn? *Elements*, 3, 101-106.
- Pi, T., Solé, J., Morton-Bermea, O., Taran, Y. y Hernández-Álvarez, E. (2017). Geoquímica de lantánidos de los yacimientos de fluorita de los distritos mineros de Taxco y Zacualpan, sur de México: implicaciones sobre el origen y la evolución de los fluidos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34, 199-211.
- Robb, L. (2005) *Introduction to ore-forming processes*. Blackwell Publishing.
- Schaaf, P. (1990). *Isotopengeochemische untersuchungen an granitoiden gesteinen eines aktiven kontinentalrandes. Alter und herkunft der tiefengesteinskomplexe an der pazifikküste Mexikos zwischen Puerto Vallarta und Acapulco* (tesis de doctorado). Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität.
- Smith, K.A., Sheppard, S.D., Johnson, D.W. y Johnson, R.T. (2005). Pedagogies of engagement: classroom-based practices. *Journal of Engineering Education*, 94, 87-101.
- Sun, S. y McDonough, W. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London Special Publications*, 42, 313-345.
- Wirth, K.R. (2007). Teaching for deeper understanding and lifelong learning. *Elements*, 3, 107-111.

Manuscrito recibido: 26 de septiembre de 2022

Manuscrito corregido recibido: 16 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 24 de noviembre de 2022

CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE DIAGRAMAS STIFF-DAVIS PARA ALUMNOS DE INGENIERÍA PETROLERA, EXPERIENCIA EN EL AULA

A. Paulina Gómora-Figueroa*, Julieta Villegas González y Josué H. Almazán Mendoza

Departamento de Ingeniería Petrolera, División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM, C.U., Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

*p.gomora@unam.mx

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo mostrar la relevancia de los diagramas Stiff-Davis para las y los ingenieros petroleros, dichos diagramas son una representación gráfica que se construye utilizando la concentración de algunos de los iones presentes en el agua. La información que provee este análisis permite conocer, e incluso anticipar, posibles problemáticas y riesgos que se presenten en campo durante la producción de hidrocarburos. Sin embargo, la mayoría de las y los alumnos de la carrera de ingeniería petrolera de los últimos semestres no lo conocen, o bien, no saben para qué se utiliza. Lo anterior se debe, en gran medida, a que el agua es considerada como un producto no deseado durante la extracción de hidrocarburos. En este trabajo se reportan los resultados de dos actividades realizadas por 25 alumnos de la materia Temas Selectos en Ingeniería Petrolera, las cuales consistieron en la construcción e interpretación de diagramas Stiff-Davis. Estos diagramas fueron contruidos utilizando los recursos disponibles por cada alumno (hoja de Excel con equipo de cómputo o papel cuadriculado). Después de los ejercicios realizados, las y los alumnos se mostraron más interesados por conocer las aplicaciones de este análisis; sin embargo, es necesario realizar más ejercicios para practicar la interpretación y construcción de los diagramas, pues en los resultados obtenidos se aprecia que aún hay dudas para identificar algunos componentes de los diagramas y esto dificulta la interpretación de estos.

Palabras clave: Análisis de agua producida e inyectada, análisis de la composición del agua en la industria petrolera, geoquímica del agua, diagrama Stiff-Davis, Ingeniería Petrolera, python.

ABSTRACT

This work aims to show the importance of the Stiff-Davis diagrams for petroleum engineers. These diagrams are graphic representations built using eight ions determined in the water analysis. The Stiff-Davis diagrams help us know and anticipate potential flow assurance problems and other risks that may be present during hydrocarbon

production. However, most petroleum engineering students need to gain experience with these diagrams, although water is a non-desired byproduct during hydrocarbon extraction. In this paper, we report two activities with 25 senior students, which consisted of constructing and interpreting Stiff-Davis diagrams. The students built such diagrams using the resources available (e.g., an Excel spreadsheet or a piece of paper). Once the students developed these activities, they showed more curiosity to learn the analysis application. However, it is necessary to practice the construction and interpretation with more exercises since there are obvious doubts about identifying some of the diagram components, hampering the understanding of these diagrams.

Keywords: Analysis of produced and injected water, compositional water analysis in the oil and gas industry, water geochemistry, Stiff-Davis diagram, Petroleum engineering, python

INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo se caracteriza por proveer de un gran número de insumos y materias primas para la generación de energía, combustibles, así como una gran cantidad de productos usados cotidianamente, por lo que imaginar nuestra vida sin éstos resulta difícil. A pesar del auge que han tenido las energías alternativas en la generación de energía (Ritchie, 2017), la demanda de hidrocarburos sigue en aumento debido al incremento en la población a nivel mundial y el desarrollo económico de países emergentes (Martínez, 2019). Con la extracción de hidrocarburos es muy común la presencia de agua, a la cual se le denomina agua producida. Ésta puede provenir de un acuífero asociado al yacimiento o bien, puede pertenecer a formaciones de agua sin comunicación directa al yacimiento. Por otra parte, el agua producida también puede provenir de procesos de perforación, estimulación y aplicación de métodos de recuperación secundaria y mejorada. En zonas áridas, el acceso al agua representa un reto considerable, ya que el recurso es limitado y el agua disponible suele estar comprometida para uso agrícola, pecuario, industrial y residencial. Aunque la cantidad

de agua utilizada por la industria del gas y el petróleo es poca en comparación con los usos previamente mencionados, el balance hídrico se ve afectado (Dahm, 2014).

Eventualmente, parte del agua inyectada en los yacimientos regresa a la superficie, se estima que dependiendo de la formación, el agua que regresa oscila entre el 15 y el 80 % del volumen inyectado. Después de que concluyen las actividades de perforación, los pozos petroleros pueden producir una gran cantidad de agua junto con los hidrocarburos, la cual es considerada como el mayor subproducto no deseado en la producción de petróleo y gas. Se estima que por cada barril de petróleo producido se producen de 4 a 10 barriles de agua, siendo ésta el producto mayoritario de las operaciones de extracción de hidrocarburos (Guerra *et al.*, 2011 y Kenneth, 2007). En el caso particular de México se estima que por cada barril de petróleo se produce un barril de agua.

Sin embargo, el agua producida puede reutilizarse en otros procesos asociados a la producción de hidrocarburos, por ejemplo, la inyección de agua y productos químicos para asegurar la producción de hidrocarburos, la generación de vapor para recuperación incremental (o recuperación mejorada) y la obtención de energía eléctrica (Warner Jr, 2007). Algunos países, han realizado estudios sobre el uso del agua producida proveniente de campos terrestres de petróleo y gas, particularmente en zonas de escasez de agua (van Rossum, 2020, Takeuchi y Tanaka, 2020, U.S. EPA, 2018, U.S. EPA 2020). Este tipo de estudios tiene la finalidad de conocer las opciones de generación, manejo y disposición del agua producida, así como entender sus usos potenciales.

Diagrama o patrón Stiff-Davis

Las propiedades físicas y químicas del agua producida se definen por el tipo de hidrocarburos producidos, la geoquímica de la formación donde yacen los fluidos y su ubicación geográfica. Por ejemplo, entre el 80 % y el 90 % de los hidrocarburos que se disuelven en el agua son polares y aromáticos; los ácidos orgánicos que se encuentran típicamente en el agua producida son: fórmico, acético y propiónico. Además, las propiedades del agua pueden variar con respecto al tiempo debido a la interacción entre el agua y la formación, al reemplazo de los fluidos del yacimiento provenientes de otras formaciones o a otros fluidos inyectados durante la producción de hidrocarburos. Por lo tanto, estudiar la composición del agua producida puede proveer información relevante que complementa la evaluación de los pronósticos de producción de hidrocarburos en las diferentes fases de la vida productiva de un yacimiento (Morales-Hernández, 2017).

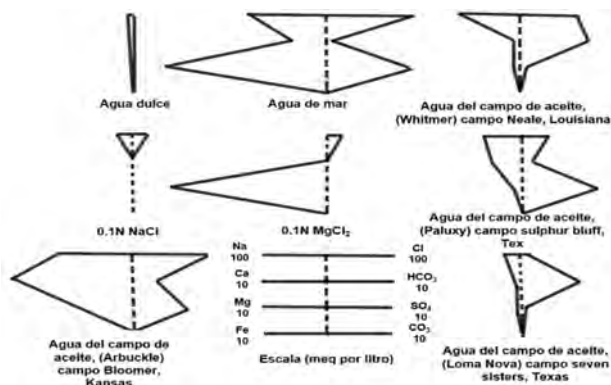


Figura 1. Patrones para diversas muestras de agua. Modificada de H. Stiff, (1951), Morales-Hernández (2017).

Una herramienta para analizar el agua producida es el diagrama Stiff-Davis, que se utiliza en diversas áreas de la ingeniería petrolera como un análisis de rutina.

El diagrama o patrón Stiff-Davis fue propuesto por primera vez en 1951 por H. Stiff y H. Davis (Stiff, 1951), se trata de una representación gráfica sencilla de algunos de los iones presentes en una muestra de agua, que resulta en patrones característicos que pueden ser interpretados o comparados con otros diagramas. Su simplicidad permite que estos puedan ser construidos empleando desde papel cuadrado hasta diferentes herramientas de cómputo. En los patrones de la Figura 1 se observan líneas verticales (punteadas) que representan una concentración de cero para los iones positivos (cationes: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Fe^{2+}) y una concentración de cero para iones negativos (aniones: Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}). La identificación de la concentración de los cationes se realiza del lado izquierdo, mientras que la concentración de los aniones se ubica e incrementa hacia la derecha. La concentración de cationes y aniones se marca como puntos para cada ion. Al final se unen los puntos y se obtiene como resultado un patrón característico para la muestra de agua.

Los patrones presentados en la Figura 1, muestran que la forma de estos cambia con la composición (origen) del agua, además dichos patrones pueden sufrir alteraciones con el tiempo, debido a filtraciones de agua, inyección de fluidos o una combinación de ambas. Debido a la peculiaridad de cada uno de los patrones, las aplicaciones de esta forma de representación son diversas, ya que se facilita el análisis de las muestras de agua. A continuación, se enuncian algunos ejemplos;

1. El diagrama puede utilizarse para identificar diferentes estratos productores y correlacionarlos.
2. Es posible conocer si existe filtración de agua en un pozo. La apariencia del patrón se puede encoger, si se trata de dilución, o bien, puede cambiar y adquirir la forma del patrón del agua filtrada (contaminante).
3. Identificación de agua atípica y determinación del origen. Esto es común durante operaciones de perforación, donde se queda agua atrapada en estratos distintos al del agua de formación. En este caso el patrón de agua no se parece al del agua de formación.
4. Monitoreo de las operaciones de limpieza de un pozo durante la etapa de terminación.

El análisis Stiff-Davis también resulta útil en la caracterización hidrogeoquímica de diferentes acuíferos indicando las diferencias en la composición geoquímica y proporciona información sobre los procesos fisicoquímicos que afectan la calidad del agua, por lo que también se ha utilizado para el análisis de prospectos geotérmicos en diferentes zonas. (Yael y Dunel, 2018; Carrera-Villacrés, D., *et al.*, 2016).

A pesar de las aplicaciones que tiene este análisis, la mayoría de las y los alumnos de la carrera de Ingeniería Petrolera desconocen cómo se construye y qué utilidad tiene este análisis de rutina en la industria petrolera. De la misma forma, el alumnado, tampoco contempla que el agua producida puede tener aplicaciones diversas en la industria petrolera, así como en otros sectores (Aldana *et al.*, 2015; Cather *et al.*, 2003).

En este trabajo se presentan los resultados de dos actividades con un grupo de 25 alumnos de octavo, noveno y décimo semestre, en el marco de la materia Temas Selectos en Ingeniería Petrolera. La primera prueba consistió en que las y los alumnos construyeran patrones Stiff-Davis correspondientes a diferentes muestras de agua de mar a partir de su composición química. La segunda prueba consistió en analizar las propiedades físicas y químicas de dos muestras de

agua provenientes de pozos delimitadores para compararlas entre sí y determinar si ambas muestras son representativas de una muestra de agua de formación. Ambas actividades fueron asignadas a través de la plataforma Google Classroom. El objetivo de estas actividades es que las y los alumnos reconozcan la importancia del agua, que, a pesar de ser un subproducto en las actividades de extracción de hidrocarburos, tiene diversas aplicaciones en ingeniería petrolera. Además, estas actividades buscan que el alumnado comprenda cómo se lleva a cabo la construcción de un diagrama Stiff-Davis y aplique el conocimiento adquirido en el análisis y la evaluación de diferentes muestras de agua, las cuales resultan de la limpieza de pozos en etapa de terminación.

MÉTODOLÓGÍA

ACTIVIDAD 1. Construcción de Patrones Stiff-Davis para muestras de agua de mar

Para esta actividad se asignó la composición de cuatro muestras de agua de mar provenientes de distintos puntos geográficos y se muestran en la Tabla 1. Para construir los diagramas, lo primero que tiene que identificarse son los 8 iones por utilizar Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ (cationes) y Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻ (aniones). En este caso, el hierro (Fe²⁺) y el carbonato (CO₃²⁻) no están presentes en la tabla debido a que estos iones no suelen encontrarse en muestras de agua de mar, por lo que su concentración en mg/L es igual a 0. Cabe señalar que en el caso del hierro (Fe²⁺) si la concentración es distinta a 0 mg/L, muy posiblemente hay corrosión en algún punto del sistema de producción, por lo que debe monitorearse y en todo caso atenderse para evitar pérdidas económicas y accidentes.

Tabla 1. Composición de distintas muestras de agua de mar, unidades expresadas en miligramos por litro.				
Componente	Golfo de México ¹ [mg/L]	Mediterráneo Oriental [mg/L]	Golfo Árabe ¹ [mg/L]	Mar rojo ² [mg/L]
Cloruro (Cl ⁻)	18,980	21,200	23,000	22,219
Sodio (Na ⁺)	10,556	11,800	15,850	14,255
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	2,649	2,950	3,200	3,078
Magnesio (Mg ²⁺)	1,262	1,403	1,765	742
Calcio (Ca ²⁺)	400	423	500	225
Potasio (K ⁺)	380	463	460	210
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	140	-	142	146
Estroncio (Sr ²⁺)	13	-	-	-
Bromo (Br)	65	155	80	72
Borato (BO ₃ ³⁻)	26	72	-	-
Flúor (F ⁻)	1	-	-	-
Silicato (SiO ₃ ²⁻)	1	-	1.5	-
Yodo (I ⁻)	<1	2	-	-
SDT	34,483	38,600	45,000	41,000

¹ <https://www.fundeu.es/>

² <https://www.rae.es/dpd/mar>
SDT: Sólidos Disueltos Totales

El diagrama no puede construirse utilizando unidades de mg/L, por lo tanto, debe realizarse la conversión a [meq/L]. También se puede utilizar la escala logarítmica para visualizar mejor la forma del patrón. Por ejemplo, para una muestra de agua que contiene únicamente iones sodio (Na⁺) y iones sulfato (SO₄²⁻), el laboratorio reportó los resultados de 456.0 mg/L y 952.5 mg/L, respectivamente. Para llevar a cabo la conversión es necesario conocer la valencia y la masa molecular de los iones presentes en el agua, la información se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Una salmuera de sulfato de sodio está compuesta, en disolución, por iones sodio y iones sulfato. Las valencias de los iones se usan como miliequivalentes, pero sin la carga como se muestra.				
Ion	Masa molecular [g/mol]	Valencia	Número de miliequivalentes	Concentración [mg/L]
Na ⁺	22.9898	+1	1	456.0
SO ₄ ²⁻	96.0626	-2	2	952.5

Para obtener los miliequivalentes del ion SO₄²⁻ se utiliza el procedimiento siguiente:

$$\frac{952.5 \text{ mg}}{L} \times \frac{\text{mmol}}{96.0626 \text{ mg}} \times \frac{2 \text{ meq}}{\text{mmol}} = \frac{19.8308 \text{ meq}}{L}$$

Este procedimiento debe realizarse para todos los iones de las muestras de la Tabla 1. Es importante recordar que la valencia es igual al número de equivalentes; sin embargo, no se toma en cuenta el signo. La masa molecular de cada ion se obtiene de la tabla periódica; para los iones complejos como; el ion sulfato, bicarbonato y carbonato, la masa molecular se calcula. Ver sección de resultados.

El siguiente paso para construir el diagrama Stiff-Davis consiste en aplicar el logaritmo base 10 a los datos obtenidos (ver sección de resultados) para expandir el diagrama, lo cual es de utilidad para resaltar diferencias y similitudes entre distintas muestras de agua. El diagrama se construye de acuerdo con el siguiente criterio:

- Si log₁₀ = 0 -1, entonces en el diagrama se marca 1
- Si log₁₀ = 1 -2, entonces en el diagrama se marca 1-10
- Si log₁₀ = 2 - 3, entonces en el diagrama se marca 10-100
- Si log₁₀ = 3 - 4, entonces en el diagrama se marca 100-1000
- Si log₁₀ = 4 - 5, entonces en el diagrama se marca 1000-10000

ACTIVIDAD 2. Análisis de agua proveniente de un pozo delimitador

Se solicitó a las y los alumnos determinar si la muestra de agua de un pozo delimitador (DL) es representativa de la formación o no. Para ello se les proporcionaron los análisis de dos muestras de agua, una es representativa de agua de formación que se tomó como referencia; la otra muestra de agua proviene del pozo DL, las muestras provienen de pozos que pertenecen al Campo Aura y Campo Brisa, respectivamente. Ambos campos son vecinos, y se trata de yacimientos carbonatados y naturalmente fracturados, las propiedades del aceite crudo en ambos campos son muy similares y comparten un acuífero, por esta razón, la muestra de agua de formación proveniente de Campo Brisa se toma de referencia. Los datos de la muestra de pozo (Aura 1) y la muestra de referencia (Brisa 1) se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición de las muestras de agua Aura 1 (muestreada de pozo DL) y Brisa 1 (muestra de agua de referencia), unidades expresadas en miligramos por litro.

Componente	Aura 1 [mg/L]	Brisa 1 [mg/L]
Sodio (Na ⁺)	48,439.4	42,462.3
Calcio (Ca ²⁺)	35,200.0	14,400.0
Magnesio (Mg ²⁺)	5,710.5	729.0
Hierro (Fe ²⁺)	0.5	6.0
Cloruro (Cl ⁻)	153,000.0	92,335.5
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	610.0	385.5
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	390.0	900.0
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	0.0	0.0

Además, se proporcionó un fragmento del reporte de actividades de perforación del pozo DL de donde proviene la muestra de agua a analizar, debido a que durante dichas actividades se inyectan diferentes fluidos a los pozos que alteran las propiedades físicas y químicas del agua producida. A continuación, y para referencia del lector se mencionan brevemente algunas actividades realizadas en distintos intervalos del pozo DL en Campo Aura de donde se obtuvo la muestra a analizar en este ejercicio: “Se realizaron disparos a profundidad en el intervalo de 3907 a 2620 m, después se utilizó una bomba BEC (bombeo electro-centrífugo) para probar si el pozo producía aceite; sin embargo, sólo se recuperó salmuera. En el intervalo; de 3670 a 3720 m se inyectaron 15 m³ de HCl al 15 % (v/v), 5 m³ de disolvente, y 10 barriles de salmuera de CaCl₂, nuevamente se usó bomba, sólo se recuperó agua. Entonces se inyectó mejorador de flujo y con esta operación se recuperaron 812 barriles de fluido en superficie; 50 % aceite 50 % agua”. La Figura 2 presenta las características de algunas muestras de los fluidos recuperados durante las actividades de perforación, entre las cuales destacan la densidad, la salinidad, el pH y el porcentaje de agua producido durante las actividades antes descritas.

Como primer paso, se indicó a las y los alumnos que construyeran el diagrama Stiff-Davis y lo compararon con el diagrama del agua de referencia. Posteriormente, debían analizar las similitudes y diferencias entre los diagramas y utilizando la información proporcionada en el reporte de actividades de perforación para evaluar si la muestra de agua que proviene del pozo DL corresponde

a agua de formación o no. El procedimiento para construir los diagramas es el mismo que se describió en la Actividad 1. En esta ocasión no se proporcionó información sobre la concentración de iones diferentes a los necesarios para la construcción del diagrama Stiff-Davis para evitar confusiones entre el alumnado.

RESULTADOS

ACTIVIDAD 1. Construcción de Patrones Stiff-Davis para muestras de agua de mar

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la construcción de patrones o diagramas Stiff Davis, en la Tabla 4 se presentan las conversiones de mg/L a meq/L. La Tabla 5 muestra los resultados después de aplicar la operación de logaritmo base 10. Cabe señalar que con la información de cualquiera de las dos tablas se pueden construir los diagramas; deberá colocarse un punto por cada ion y al final se unen los puntos para obtener el patrón Stiff-Davis. Algunos de los trabajos realizados por los alumnos se muestran en la Figura A3. Los elementos que se evaluaron y las respuestas correctas de este primer ejercicio se exhiben en la Tabla 6.

En este ejercicio las y los estudiantes en su gran mayoría reconocieron el orden correcto para acomodar cationes y aniones y utilizaron adecuadamente las valencias de los iones para llevar a cabo las conversiones necesarias; sin embargo, cerca del 40 % tuvo algún problema para convertir a las unidades de meq/L; otras dificultades encontradas fueron; 1) no utilizar unidades en el diagrama; 2) menos de 35 % de las y los alumnos utilizaron escala logarítmica. 3) varias alumnas y alumnos no construyeron el diagrama completo ya que no marcaron los iones hierro y carbonato. Después de revisar la actividad entregada, ésta se resolvió en clase junto con las y los alumnos y se resaltó el orden de los iones para construir el diagrama. También se llevó a cabo la conversión de unidades y el uso de la escala logarítmica. En la Figura 3 se muestran los diagramas para el Golfo de México y el Golfo Arábigo como ejemplo de lo que los y las alumnas debían obtener. Dado que se aplicó la escala logarítmica se omiten las unidades en los diagramas.

Hora	% En muestra recuperada			Dens. 20/4	*API	Temp [°C]	pH	H ₂ S [ppm]	Salinidad [ppm]	Gas [ppm]
	Aceite	Agua	Sedim.							
1:00	45	55	traza	1.05	-	32	4	20,000	220,000	2,570
2:00	60	40	traza	0.99	-	32	5	23,000	225,000	1,780
3:00	44	56	traza	1.03	-	34	5	25,000	215,000	2,945
4:00	traza	100	traza	1.17	-	35	4	14,000	220,000	1,371
5:00	traza	100	traza	1.17	-	35	4	29,000	215,000	401
6:00	traza	100	traza	1.17	-	36	4	35,000	215,000	1175
7:00	traza	100	-	1.17	-	36	4	31,000	215,000	123
8:00	M.I.	M.I.	M.I.	-	-	-	-	33,000	-	910
9:00	70	30	traza	1.01	-	37	4	35,000	215,000	1,730
10:00	99.4	0.2	0.4	1.016	7.3	50	5	25,000	M.I.	3,100
11:00	95.5	4	0.5	1.017	7.2	55	5	18,000	200,000	2,061
12:00	94	5.2	0.8	1.021	6.7	60	5	15,000	210,000	7,758
13:00	99.7	0.1	0.2	1.021	6.6	63	-	18,000	M.I.	713
14:00	99.6	0.2	0.2	1.022	6.5	62	-	22,000	M.I.	1,888
15:00	93	6.8	0.2	1.02	6.6	63	6	20,000	220,000	926
16:00	95.3	4.6	0.2	1.022	6.7	64	6	24,000	210,000	1,926
17:00	80	20	traza	1.03	-	38	5	22,000	215,000	1,007
19:00	88	12	traza	1.018	7.1	62	5	25,000	210,000	2,143
21:00	78	22	traza	1.04	-	42	5	22,000	215,000	1,682

Figura 2. Muestreo de fluidos y sus características. M.I = Muestra insuficiente para determinar. Las propiedades de los fluidos que se inyectaron en el pozo DL son: agua de perforación: densidad = 1.00 g/cm³, salinidad = 800 ppm, pH = 7. agua de mar: densidad = 1.03g/cm³, salinidad = 34,000 ppm pH = 7. salmuera cloruro de calcio: densidad = 1.18 g/cm³, salinidad = 225,200 ppm, pH = 7.

Tabla 4. Composición de distintas muestras de agua de mar, unidades expresadas en miliequivalentes por litro. El resto de los iones identificados no se utilizan.

Componente	Golfo de México [meq/L]	Mediterráneo Oriental [meq/L]	Golfo Árábigo [meq/L]	Mar rojo [meq/L]
Sodio (Na ⁺)	458.95	513.04	689.13	619.78
Calcio (Ca ²⁺)	20	21.15	25	11.25
Magnesio (Mg ²⁺)	105.16	116.91	147.08	61.83
Hierro (Fe ²⁺)	0	0	0	0
Cloruro (Cl ⁻)	542.28	605.71	657.14	634.82
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	1.66	0	1.69	1.73
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	55.18	61.45	66.66	64.12
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	0	0	0	0

Tabla 5. Composición de distintas muestras de agua de mar, tras aplicar logaritmo base 10.

Componente	Golfo de México [log ₁₀]	Mediterráneo Oriental [log ₁₀]	Golfo Árábigo [log ₁₀]	Mar rojo [log ₁₀]
Sodio (Na ⁺)	2.66	2.71	2.83	2.79
Calcio (Ca ²⁺)	1.30	1.32	1.39	1.05
Magnesio (Mg ²⁺)	2.02	2.06	2.16	1.79
Hierro (Fe ²⁺)	1	1	1	1
Cloruro (Cl ⁻)	2.73	2.78	2.81	2.80
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	0.22	0	0.22	0.24
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	1.74	1.78	1.82	1.80
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	1	1	1	1

Al analizar la Tabla 6 se concluye que se alcanzó el objetivo de esta actividad; sin embargo, es evidente que algunas cosas no quedaron completamente claras y que es necesario realizar más ejercicios junto con el alumnado. Los temas de la rúbrica que requieren de más atención son el uso de unidades y análisis dimensional al realizar las conversiones, así como la aplicación de la escala logarítmica.

Tabla 6. Resultados generados para el ejercicio de construcción de diagramas Stiff-Davis.

Rúbrica	# respuestas correctas	% respuestas correctas
Reconoce el lugar de los cationes y aniones	20	80
Conoce el valor correcto de las valencias de los iones	22	88
Coloca en orden correcto los iones	19	76
Convierte correctamente de mg/L a meq/L	16	64
Escribe unidades en el diagrama	2	8
Coloca escala al diagrama	15	60
Utiliza escala logarítmica	8	32
Construye correctamente el diagrama	6	24

ACTIVIDAD 2. Análisis de agua proveniente de un pozo delimitador

Esta actividad se asignó con la finalidad de aumentar el interés de las y los estudiantes por los diagramas Stiff-Davis aplicando los conocimientos adquiridos para analizar las propiedades de una muestra de agua obtenida durante la puesta en marcha de un pozo de aceite. La composición de las salmueras a comparar (Aura 1 y Brisa 1) en unidades de miliequivalentes por litro se muestran en la Tabla 7. Los aspectos evaluados de este ejercicio se presentan en la Tabla 8. Además de evaluar los elementos del ejercicio anterior, se agregaron dos elementos más; “Distingue entre una muestra de agua de formación y una mezcla usada en perforación” y “Sugiere que el agua es de formación; sin embargo, se encuentra contaminada con fluidos de perforación”. Para esta actividad se observó una mejoría en el desempeño del estudiantado los elementos siguientes; “reconoce el sitio de los cationes y aniones”, “convierte correctamente de mg/L a meq/L” y “utiliza escala logarítmica”, en un 12 %, 32 % y 32 %, respectivamente. Algunos de los trabajos realizados se muestran en la Figura A3.

Los elementos en los que debe seguirse practicando con los estudiantes son; el uso de unidades en el diagrama, el orden de los cationes y aniones, y el empleo una escala adecuada para elaborar el diagrama, pues se percibió que por realizar de forma rápida el ejercicio, muchos alumnos no utilizaron papel cuadrulado. La Figura 4 muestra los patrones (o diagramas) Stiff-Davis para muestras de Brisa 1 y Aura 1. Aunque los y las alumnas tuvieron menos complicaciones para construir los diagramas en este ejercicio, la gran mayoría no siguió

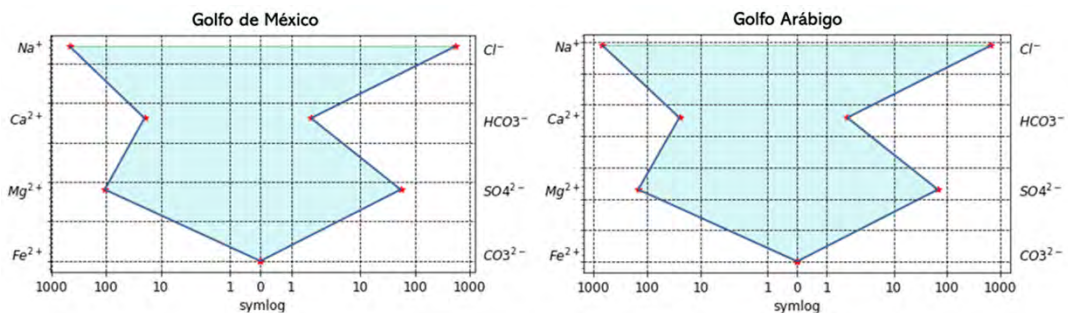


Figura 3. Patrones Stiff-Davis para muestras de agua del Golfo de México y el Golfo Árábigo. A pesar de que la composición no es la misma los patrones tienen mucha similitud entre sí. Se utilizaron las librerías; Pandas, Numpy y Matplotlib de Python.

las indicaciones del ejercicio en su totalidad ya que sus respuestas no estaban fundamentadas en las evidencias proporcionadas (análisis de agua representativa y fragmento del reporte de actividades de perforación del pozo DL de donde proviene la muestra de agua a analizar). Lo anterior sugiere que las instrucciones no fueron del todo claras y que es necesario realizar más ejercicios de este tipo para que los alumnos se sigan familiarizando con estos diagramas y su análisis.

Al comparar los dos diagramas Stiff-Davis se aprecia que la diferencia en concentración es de un orden de magnitud para los iones; calcio, magnesio, bicarbonatos y sulfatos en Aura 1, y aunque los patrones son similares (Figura 4), hay diferencias significativas y no se trata del mismo tipo de agua ya que la concentración de los iones, la densidad, la salinidad y el pH son distintos, ver Tabla 7. La muestra proveniente del pozo DL es una mezcla de agua, producto de las actividades de perforación y estimulación para hacer fluir al pozo.

Tabla 7. Composición de las muestras de agua Aura 1 (muestreada de pozo) y Brisa 1 (muestra de agua de referencia), unidades expresadas en miliequivalentes por litro.

Propiedad	Aura 1	Brisa 1
Densidad [g/mL]	1.17	1.11
Salinidad [mg/L]	252,127	153,000
pH [adim]	5.63	7.3
Componente	[meq/L]	[meq/L]
Sodio (Na ⁺)	2,106.9	1,846.2
Calcio (Ca ²⁺)	1,756.5	720.0
Magnesio (Mg ²⁺)	469.9	59.8
Hierro (Fe ²⁺)	0.0	0.2
Cloruro (Cl ⁻)	4,315.6	2,601.1
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	10.0	6.3
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	8.1	18.7
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	0.0	0.0

adim: adimensional

Pocas alumnas y alumnos discutieron las diferencias en la concentración de los iones sulfato, bicarbonato y calcio, inclusive notaron que el pH de Aura 1 era más bajo que en el caso de Brisa 1. También notaron la diferencia en la densidad entre las muestras. Uno más, notó que la salinidad de Aura 1 (252,127 ppm) era mayor que la salinidad de Brisa 1 (153,000 ppm); a pesar de estas observaciones los alumnos concluían que la muestra de Aura 1 se trataba de una muestra de agua de formación. El 12 % de las y los alumnos sugieren que la muestra de agua que se analiza (Aura 1) proviene de la contaminación del agua de formación con salmueras de perforación, o bien, que existe contaminación de algún aporte salino, ver Tabla 8.

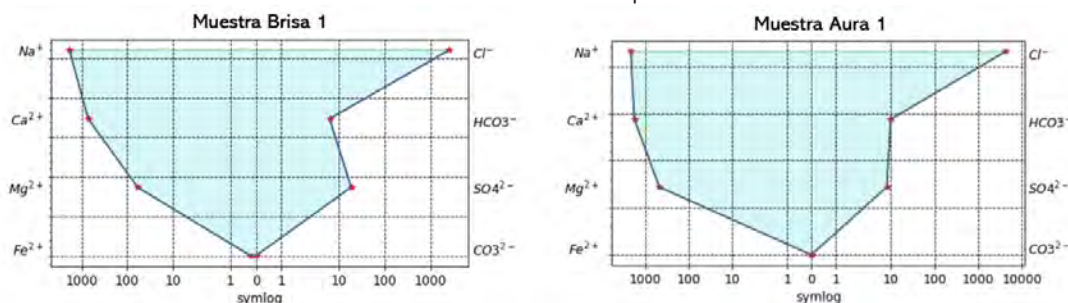


Figura 4. Patrones Stiff-Davis para muestras de Brisa 1 y Aura 1. Se observan diferencias en la concentración de calcio, magnesio, bicarbonatos y sulfatos al comparar con detenimiento los diagramas. Se utilizaron las librerías; Pandas, Numpy y Matplotlib de Python.

Tabla 8. Resultados correctos para el ejercicio de análisis de agua proveniente de un pozo delimitador.

Rúbrica	# respuestas correctas	% respuestas correctas
Reconoce el lugar de los cationes y aniones	23	92
Conoce el valor correcto de las valencias de los iones	24	96
Coloca en orden correcto los iones	21	84
Convierte correctamente de mg/L a meq/L	24	96
Escribe unidades en el diagrama	3	12
Coloca escala al diagrama	20	80
Utiliza escala logarítmica	16	64
Construye correctamente el diagrama	15	60
Distingue entre una muestra de agua de formación y una mezcla usada en perforación	2	8
Sugiere que el agua es de formación; sin embargo, se encuentra contaminada con fluidos de perforación	3	12

Resulta evidente que después de realizar un ejercicio de práctica los alumnos construyeron con más facilidad los diagramas Stiff-Davis, lo cual se nota en el número de respuestas correctas registradas en la rúbrica. Esto indica que la práctica mejora su habilidad para construir dichos diagramas. Debido a que el análisis del agua y el diagrama Stiff-Davis se evalúan de forma rutinaria en la industria petrolera, es deseable que los y las alumnas de Ingeniería Petrolera utilicen más estas herramientas en clases para analizar diferentes problemáticas relacionadas con la producción de agua durante la explotación de hidrocarburos.

Aunque la construcción de los diagramas Stiff-Davis es sencilla, la falta de atención puede resultar en interpretaciones erróneas o poco adecuadas. Por este motivo se consideró como siguiente paso para construir los diagramas Stiff-Davis hacer uso de Python, lo cual sería de utilidad para realizar un análisis más preciso; además, podría generar más interés del alumnado ya que se emplearía programación. El código para generar cualquier tipo de diagrama podría ayudar a que los y las alumnas lleven a cabo un análisis más detallado. En las Figuras A4, A5, A6 y A7 se muestra el código de Python elaborado para construir los diagramas Stiff-Davis. Se utilizaron las librerías; Pandas, Numpy y Matplotlib de Python. En este trabajo no fue posible incluir los resultados tras aplicar Python con el alumnado; sin embargo, ya se está probando en clases.

El anexo puede consultarse a través de la liga:

<https://docs.google.com/document/d/1jx8FSE4M6nnVXUzFKLGFupl3W0EN/edit?usp=sharing&oid=100333700647438593901&rtppof=true&sd=true>

CONCLUSIONES

De manera general, el agua y sus propiedades han sido consideradas como un producto no deseado durante la explotación de hidrocarburos, lo cual repercute en la educación del alumnado ya que muy pocos estudian los diagramas Stiff-Davis. En este trabajo se presentaron los resultados obtenidos al aplicar dos actividades para construir dichos diagramas e interpretar la información que estos proporcionan, utilizando hojas de cálculo en Excel y papel cuadriculado.

Debido a que el análisis del agua y los diagramas Stiff-Davis son estudios de rutina en ingeniería de yacimientos, perforación, productividad de pozos e instalaciones superficiales, es necesario realizar más actividades en clase para que los alumnos puedan realizar interpretaciones más precisas con la información que se proporciona. Si bien se cumplieron los objetivos de aprender a construir diagramas y conocer la relevancia de estos para las y los ingenieros petroleros, aún hace falta practicar la interpretación de los diagramas.

También llama mucho la atención es que algunos estudiantes no colocan unidades y a veces se equivocan al realizar la conversión de unidades debido a que no realizan un análisis dimensional, estas habilidades debieron adquirirse en semestres anteriores, inclusive en nivel preparatoria, por lo que es importante hacer énfasis con los alumnos para que ejerciten estos aspectos constantemente.

El análisis de las propiedades del agua producida puede servir para definir estrategias de aseguramiento de flujo, sistemas artificiales de producción y estimación de reservas. Además, el agua puede ser inyectada a los pozos como método de recuperación adicional (ej. generación de vapor). Los y las alumnas de Temas Selectos mostraron más interés por conocer otras aplicaciones de este análisis después de realizar las actividades. Actualmente, se trabaja en otros ejercicios utilizando el código de Python generado en este trabajo para evaluar si la programación ayuda a la interpretación de los diagramas donde se discutan las problemáticas en campo asociadas a la presencia de agua.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Leonardo Teja Juárez por su apoyo para la elaboración del código en Python. También agradecen a los proyectos PAPIIT IA105621 "Evaluación de rocas ígneas para almacenar dióxido de carbono a través de la formación de carbonatos", y al proyecto CONACyT 280816 "Plataforma Yacimiento en miniatura para Estudios de EOR mediante Nanofluidos Inteligentes en Campos Maduros y No Convencionales de México" por el apoyo para llevar a cabo alguno de los análisis del agua trabajados en la clase de Temas Selectos de Ingeniería Petrolera. APGF agradece el apoyo a PEMEX PEP para proporcionar información de campo relevante para que los alumnos de Ingeniería Petrolera hicieran el ejercicio 2. Los autores agradecen a María Isabel Vidal Reyes y Martín Carlos Velázquez Franco por sus valiosos comentarios para mejorar y enriquecer este trabajo.

REFERENCIAS

- Aldana, G., Chourio, A., Zambrano, O. (2015) Hydro geochemical data on oil field water statistic validation. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 38 (3) 257-265.
- Cather, M.E., Lee, R., Gundiler I., Sung A, Davidson N., Reddy A. K., Wei, M. (2003) NM WAIDS: A Produced Water Quality and Infrastructure GIS Database for New Mexico Oil Producers. Technical Report, Contract No. FC26-02NT15134, U.S. DOE, Washington, DC. <https://doi.org/10.2172/823003>.
- Carrera-Villacrés, D., Hidalgo, A., Guevara-García, P., Vivero, M. T., Delgado-Rodríguez, V. (2016). Hydrogeochemical analysis of volcanic and geothermal fluids in the Andes from Ecuador using hydrochemical plots (Stiff, Piper and Schoeller-Berkaloff diagrams). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 39, 012062, 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/39/1/012062>
- Dahm, K. (2014) Guidance for the Evaluation of Water Management Strategies to Provide Regional Water Supplies for the Oil and Gas Industry, Final Report OMB No. 0704-0188. Denver, CO: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation
- U.S. EPA, (2018). Detailed Study of the Centralized Waste Treatment Point Source Category for Facilities Managing Oil and Gas Extraction Wastes. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 821-R-18-004.
- U.S. EPA, (2020). Summary of Input on Oil and Gas Extraction Wastewater Management Practices Under the Clean Water Act, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 821-S19-001.
- Guerra K., Dahm K. y Dunford S, (2011). Science and Technology Program Report 157. Oil and Gas Produced Water Management and Beneficial Use in the Western United States. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation.
- Kenneth E. (2007). AMEC Paragon Inc. Petroleum Engineering Handbook, Vol. III Facilities and Construction Engineering, Chapter 4 Water-Treating Facilities in Oil and Gas Operations, III-123 – III-182.
- Martínez Mateo, B. R. (2019). Análisis y Perspectiva de la Implementación de la Reforma Energética en México. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales-Hernández J. (2017). Estudio de la formación y estabilidad de incrustaciones de carbonato de calcio en campos naturalmente fracturados desde condiciones de yacimiento hasta superficie. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ritchie, H. 2017. Renewable Energy. Our World in Data <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- Stiff, H.A. (1951). The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns. *J Pet Technol* 3 15–3.
- Takeuchi H. y Tanaka H. (2020). Water reuses and recycling in Japan – History, current situation, and future perspectives – *Water Cycle*, 1 – 12.
- van Rossum T. (2020). Water reuses and recycling in Canada – History, current situation, and future perspectives – *Water Cycle*, 1, 98 – 103. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.001>
- Warner Jr., H. R. (2007). SPE Warner Consulting Services. Petroleum Engineering Handbook, Vol. V Reservoir Engineering and Petrophysics, Chapter 11 Waterflooding, V-1037 – V-1102.
- Yael, R., y Dunel, L. (2018) Caracterización hidroquímica de la cuenca inferior del río Colorado. INTA Ediciones. Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi. Argentina.

Manuscrito recibido: 1 de octubre de 2022

Manuscrito corregido-recibido: 22 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 6 de diciembre de 2022

MATERIAL DIDÁCTICO QUE CONTRIBUYE A LA VISUALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

Rodrigo Gutiérrez-Navarro^{1*}, María Isabel Vidal-Reyes²,
Gabriel Serrano-López³ y Elisa Fitz-Díaz⁴

¹Posgrado en Ciencias de la Tierra, Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla La Mesa, Querétaro, Universidad Nacional Autónoma de México. C.P. 76230 *rgutierrez@geociencias.unam.mx

²Facultad de Ciencias Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510. marisa.vr@ciencias.unam.mx

³Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510. gabotrop@gmail.com

⁴Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510. fitzde@gmail.com

RESUMEN

Se presentan tres laboratorios que funguen como apoyo en la enseñanza y aprendizaje de la visualización 3D de estructuras geológicas. Estos laboratorios cubren los siguientes temas: 1) Orientación de planos, líneas y proyecciones en la red estereográfica, 2) Descripción y análisis de fallas y 3) Descripción y análisis de pliegues. Los ejercicios didácticos que incluyen se complementan con recursos en línea como videos, modelos analógicos y animaciones, los cuales en su mayoría son gratuitos y en español. Este material fue diseñado e implementado durante los cursos virtuales de la clase de Geología Estructural a nivel licenciatura tanto de la Facultad de Ciencias como de la Facultad de Ingeniería, ambas de la UNAM, a lo largo de la emergencia sanitaria causada por el virus SARS-CoV-2 durante los años 2020 y 2021. Para evaluar de forma cualitativa la efectividad de este material, así como la experiencia del alumnado con el mismo, se aplicó una encuesta a 29 estudiantes. A partir de los resultados de la encuesta y la revisión de laboratorios resueltos por el alumnado, se discuten las ventajas y desventajas de los ejercicios propuestos. Este material resulta ser relevante en el acompañamiento de cursos teóricos de Geología Estructural y en fortalecer el desarrollo de habilidades de percepción espacial.

Palabras clave: Geología Estructural, red de Wulff, recursos didácticos, clases virtuales.

ABSTRACT

We present three practical-theoretical workshop manuals which aim to assist in the spatial visualization of 3D geological structures. The workshop manuals focused on three main topics: 1) Attitude of planes, lines and stereographic projections, 2) Faults description and analysis, and 3) Folds description and analysis. Exercises contained in these manuals are accompanied by free online resources published in Spanish, such as videos, analog models, and animations. This material was designed and implemented during the virtual courses of the Structural Geology class at the undergraduate level of both the Sciences

Faculty and Engineering Faculty at UNAM, throughout the pandemic caused by the SARS-CoV-2 virus during the years 2020 and 2021. In order to evaluate the quality of these materials, we applied a survey and analyzed the answers from 29 former students. Considering these results, along with the review of workshops solved by the students, we expose the advantages and disadvantages of the proposed material and further discuss their impact on the development of spatial skills for Earth Science students.

Keywords: Structural Geology, Wulff net, teaching resources, virtual classes.

INTRODUCCIÓN

La Geología Estructural estudia la geometría, estructuras y texturas que resultan de la deformación de las rocas al estar sometidas a un estado de esfuerzos en diferentes ambientes tectónicos (Van der Pluijm y Marshak, 2004). Como parte de la educación básica en Ciencias de la Tierra, la Geología Estructural constituye una de las asignaturas básicas en la formación de los y las estudiantes para su desarrollo profesional. El aprendizaje en esta disciplina requiere de la práctica de la visualización espacial en donde se relacionan destrezas visuales con el uso de la imaginación (Kastens *et al.*, 2009). Específicamente se busca el fortalecimiento de habilidades cognitivas tales como: 1) análisis de relaciones espaciales, 2) manipulación espacial, y 3) habilidad visual penetrativa (Titus y Horsman, 2009).

Las estructuras geológicas no ocurren de manera fortuita ni aleatoria en el espacio, sino que se desarrollan de forma conjunta en una región, por lo que su geometría y su orientación son relevantes para descifrar la historia de deformación de un área específica (Fossen, 2022). La geometría aparente de las estructuras depende de la perspectiva desde dónde se observan y de sus dimensiones. De tal forma que habilidades como la rotación mental, permiten imaginar

su geometría actual, su evolución y sus relaciones espaciales con otras estructuras (Shipley *et al.*, 2013).

El estudio de las estructuras comprende varios niveles de análisis, para los cuales es necesario que los y las estudiantes adquieran una serie de conocimientos teóricos y prácticos que les permitan una apropiada observación, descripción, medición e interpretación cinemática y geodinámica de las estructuras (Fossen, 2016). Para la documentación e incluso la clasificación de algunas estructuras, éstas se reducen a formas simples como planos y líneas que ocurren de manera concreta en el espacio tridimensional. Por ello, el buen manejo de herramientas como la brújula, las proyecciones en la red estereográfica y los nomogramas, junto con las habilidades espaciales, se tornan fundamentales para el reconocimiento, descripción y representación de las estructuras a diferentes escalas.

Durante la emergencia sanitaria causada por el virus SARS-CoV-2 (años 2020 a 2022) los cursos de Geología Estructural se impartieron de forma virtual. Ello supuso un reto para la enseñanza y aprendizaje de conceptos abstractos como: la orientación de objetos en el espacio tridimensional y su proyección en dos dimensiones, así como la comprensión y visualización de diferentes estructuras geológicas. Además, el proceso educativo a distancia fue limitado por la falta de prácticas escolares que permiten que el alumnado se familiarice con estructuras comunes y su apariencia en muestras de mano o en un afloramiento. En este contexto, notamos la poca oferta de material audiovisual veraz, público, gratuito y lo más importante, disponible en español, así como de aplicaciones digitales y contenidos hechos por docentes para visualizar y comprender estructuras.

Para solventar las limitaciones en el proceso enseñanza-aprendizaje a distancia, se reestructuró el contenido y el orden del curso, se intensificó la parte práctica y se enriqueció el material didáctico para lograr un proceso de enseñanza-aprendizaje fluido. En este trabajo mostramos parte de los materiales didácticos compilados y desarrollados, los cuales cubren la parte práctica relacionada con la visualización espacial de estructuras geológicas. Presentamos tres laboratorios enfocados en tres temáticas: 1) Orientación de planos, líneas y proyecciones en la red estereográfica; 2) Descripción y análisis de fallas y 3) Descripción y análisis de pliegues. Cada uno contiene una síntesis introductoria del tema, una serie de ejercicios prácticos y material didáctico de consulta que incluye: fotografías, videos tutoriales propios y públicos de otras instituciones educativas, programas de cómputo para la visualización y análisis de datos, entre otros ([Anexo 1: Laboratorio 1. Planos y rectas](#); [Anexo 2: Laboratorio 2. Fallas](#); [Anexo 3: Laboratorio 3. Pliegues](#)). Así mismo, exponemos los objetivos didácticos que cubren los ejercicios propuestos.

Cabe mencionar que estos 3 laboratorios forman parte de una serie de diez laboratorios, de los cuales, los siete restantes abordan los siguientes temas: 1) esfuerzos y círculo de Mohr, 2) deformación en dos y tres dimensiones, 3) estimación de la deformación, 4) reología, 5) foliaciones y lineaciones, 6) microtectónica, y 7) secciones geológicas.

Con el fin de evaluar si los laboratorios cubren o no los objetivos didácticos planteados, se analizaron ejercicios resueltos por el estudiantado. Estos laboratorios también fueron evaluados mediante una encuesta en la que recabamos la opinión del estudiantado respecto al material didáctico y al curso de Geología Estructural en general. Finalmente, discutimos las fortalezas y debilidades tanto del material propuesto como de la dinámica con la que se llevó a cabo la parte práctica del curso.

Consideramos que el material presentado en este trabajo es una valiosa herramienta para otras y otros docentes de Geología Estructural, dado que las nuevas generaciones están muy familiarizadas con herramientas digitales y esta propuesta es una forma de llevar la Geología Estructural a un ambiente más dinámico para el estudiantado. De igual forma, al compartir estos recursos buscamos fortalecer, diversificar y enriquecer los instrumentos de enseñanza y aprendizaje disponibles, así como disminuir la brecha educativa en Geología Estructural entre los países de habla hispana y los de habla inglesa.

MATERIALES Y MÉTODOS

En los siguientes puntos se resume el proceso que se siguió para la elaboración de los laboratorios, así como su posterior implementación y evaluación:

- a. Planteamiento de los laboratorios.
- b. Elaboración y recopilación de recursos didácticos, accesibles, gratuitos, claros, útiles, visuales y que no requieren de recursos computacionales robustos.
- c. Integración de los laboratorios con una introducción y recursos didácticos.
- d. Impartición de los laboratorios al alumnado de forma conjunta con el curso teórico (la frecuencia con que se resolvieron los laboratorios fue de un laboratorio cada semana o cada dos semanas).
- e. Evaluación y análisis de los laboratorios resueltos.
- f. Aplicación de encuestas al alumnado para recibir retroalimentación respecto a los laboratorios y análisis de las respuestas obtenidas.
- g. Reflexiones por parte del profesorado y consideraciones para futuros cursos.

Diseño y conceptualización de los laboratorios

La elaboración de los laboratorios requirió plantear ejercicios que cubrieran temáticas particulares de forma integral, completa y acorde a los temas abordados en las clases, y que además permitieran al alumnado desarrollar habilidades específicas para la resolución de problemas relacionados con la Geología Estructural. La estructura de estos laboratorios está pensada como una guía para que el o la estudiante resuelva los ejercicios de manera autodidacta, en ellos se indica con claridad cada uno de los pasos que se deben seguir, por ejemplo, cómo instalar y usar los *softwares* empleados. Además, se provee de videos tutoriales y ligas al material de consulta como una pauta para la resolución de los ejercicios propuestos.

Estos laboratorios emplean múltiples formas de aprendizaje mediante ejercicios que estimulan los diferentes sentidos, emplean herramientas visuales, manuales y de manipulación, así mismo se fomenta el desarrollo de habilidades matemáticas y lingüísticas. En la Tabla 1 se señalan los objetivos didácticos específicos para cada uno de los tres laboratorios. Así mismo, se indican los objetivos específicos que se pretenden abordar en sus diferentes secciones. De manera adicional se señalan los recursos didácticos utilizados en cada apartado.

El material de apoyo y, principalmente, los videos están diseñados como guías prácticas y recursos didácticos en donde se retoma la teoría vista en el aula y se enfoca en proponer sugerencias para la resolución práctica de los ejercicios propuestos en los laboratorios (Tabla 1).

Tabla 1. Objetivos generales y específicos de los ejercicios agrupados en los laboratorios implementados.
***material propio. ** material elaborado por otros autores.**

Laboratorio	Objetivos generales	Objetivos específicos	Recursos didácticos
Laboratorio 1 Planos y Rectas Parte 1	Usar las notaciones más comunes de planos y practicar la conversión entre diferentes convenciones de nomenclatura de planos.	-Reconocer elementos geométricos para caracterizar la orientación de un plano en el espacio. -Comprender las diferentes notaciones y convenciones para describir la orientación de un plano de forma numérica.	-Esquemas -Modelos analógicos -Cálculos matemáticos -Google Classroom -Videos YouTube: * https://www.youtube.com/watch?v=MY4K-kZ-EZA&t=19s&ab_channel=gabotrop .
Laboratorio 1 Planos y Rectas Parte 2	Comprender la diferencia entre echado real y echado aparente. Calcular el echado real y aparente con el uso del nomograma y de relaciones trigonométricas.	-Comprender y visualizar la apariencia de un mismo plano proyectado en planos con diferentes orientaciones. -Conocer las herramientas que permiten resolver este problema de forma geométrica y trigonométrica. -Aplicar el concepto de echado real y echado aparente en la construcción de secciones geológicas a partir de un mapa.	-Modelos analógicos -Cálculos matemáticos -Elaboración de esquemas con lápiz, escuadras, transportador y colores -Google Classroom
Laboratorio 1 Planos y Rectas Parte 3	Caracterizar planos y líneas en casa con aplicaciones móviles.	-Caracterizar la disposición espacial de diversos objetos en casa respecto a los puntos cardinales. -Proyectar los planos y líneas en mapas y secciones esquemáticas.	-Elaboración de esquemas con lápiz, escuadras, transportador y colores -Aplicaciones móviles y mapas digitales -Google Classroom -Videos YouTube: uso de la brújula: ** https://www.youtube.com/watch?v=FbXhooadhZw&ab_channel=GEOCOAST ** https://www.youtube.com/watch?v=hsIDBdfk9CM&ab_channel=BionicaTecnologia * https://www.youtube.com/watch?v=1KbdZe1TA7U&ab_channel=gabotrop * https://www.youtube.com/watch?v=LrPbSGq3720&ab_channel=ErickMorales
Laboratorio 1 Planos y Rectas Parte 4	Usar de la red estereográfica para la visualización tridimensional y para calcular relaciones angulares.	-Representar planos y líneas en redes estereográficas. -Relacionar la notación numérica de planos y líneas con su representación gráfica en la red estereográfica. -Calcular relaciones angulares entre planos y líneas.	-Redes estereográficas -Google Classroom -Videos YouTube: uso de la red estereográfica: * https://www.youtube.com/watch?v=SIWHJ5wyPgY&t=1s * https://www.youtube.com/watch?v=l7OgWPAthg&t=2s&ab_channel=gabotrop * https://www.youtube.com/watch?v=oiNDx18sdY&ab_channel=gabotrop * https://www.youtube.com/watch?v=UpTzo22gowQ&ab_channel=gabotrop * https://www.youtube.com/watch?v=BIM8PJTIG6o&t=1s&ab_channel=ErickMorales * https://www.youtube.com/watch?v=Nmv_SgR7Gw4&t=183s&ab_channel=ErickMorales
Laboratorio 2 Fallas Parte 1	Usar diagramas de roseta y la red estereográfica para el análisis de fracturas.	-Proyectar conjuntos de datos estructurales en la red estereográfica utilizando programas computacionales. -Analizar rosetas para identificar familias de fracturas.	-Red estereográfica -Roseta de fracturas -Lecturas ** http://www.rmcm.unam.mx/index.php/rmcm/article/view/1582 -Google Classroom -Videos tutoriales en YouTube -Programas de cómputo gratuitos y disponibles en línea: ** https://www.cesdb.com/georose.html ** https://www.rickallmendinger.net/stereonet * https://youtu.be/sunBJV5uill
Laboratorio 2 Fallas Parte 2	Analizar modelos analógicos que muestran el desarrollo de sistemas de fallas.	-Identificar estructuras mayores y menores asociadas con distintos ambientes tectónicos y describir su desarrollo. -Observar y analizar la distribución espacial y temporal de las estructuras. -Asociar los modelos analógicos con ejemplos en la naturaleza.	-Google Classroom -Videos en YouTube: modelos analógicos ** https://www.youtube.com/watch?v=7yPUApR_NbE ** https://www.youtube.com/watch?v=skhs55dATIs&t=69s ** https://www.youtube.com/watch?v=dqozO0DI3gU ** https://www.youtube.com/watch?v=c6BzOizT3xs

Tabla 1 (Cont.). Objetivos generales y específicos de los ejercicios agrupados en los laboratorios implementados. *material propio. ** material elaborado por otros autores.			
Laboratorio	Objetivos generales	Objetivos específicos	Recursos didácticos
Laboratorio 2 Fallas Parte 3	Familiarizarse con el aspecto y geometría de las zonas de cizalla.	-Conocer la apariencia de rocas de falla formadas bajo distintas condiciones reológicas. -Observar rocas de falla desarrolladas en distintos protolitos. -Describir rocas de falla a distintas escalas de observación.	-Fotografías de estructuras -Lecturas -Elaboración de esquemas -Google Classroom
Laboratorio 3 Pliegues Parte 1	Visualizar y clasificar pliegues a partir de la orientación de su plano axial y eje de pliegue.	-Identificar cómo se orientan el eje de pliegue y el plano axial. -Entender las relaciones espaciales que guardan dichos elementos y su representación en la red estereográfica..	-Elaboración de esquemas -Materiales análogos
Laboratorio 3 Pliegues Parte 2	Visualizar la amplitud y longitud de onda de un tren de pliegues.	-Comprender los conceptos de amplitud y longitud de onda. -Relacionar dichos conceptos con la intensidad de deformación.	-Elaboración de esquemas
Laboratorio 3 Pliegues Parte 3	Describir y clasificar pliegues a partir de la caracterización de sus elementos geométricos y con ayuda de la proyección de éstos en la red estereográfica.	-Identificar y describir los elementos que conforman los pliegues y cómo se miden en campo. -Representar y analizar en la red estereográfica el plano axial, eje del pliegue y flancos. -Utilizar el método de las isógonas (clasificación de Ramsay) para resaltar variaciones de forma y estilo de capas plegadas.	-Fotografías de estructuras -Red estereográfica -Google Classroom -Lecturas -Videos tutoriales en YouTube * https://youtu.be/ID9BFFpSMJk -Software disponible en línea ** https://www.rickallmendinger.net/stereonet
Laboratorio 3 Pliegues Parte 4	Revisar el concepto de vergencia en una serie de pliegues y cómo determinarla. Clasificar tipos y formas de pliegues.	-Comprender el concepto de vergencia, asimetría de pliegues y envolvente de plegamiento. -Describir y clasificar pliegues con base en el ejercicio anterior.	-Elaboración de esquemas -Lecturas -Google Classroom

Resolución de los laboratorios

Los laboratorios fueron resueltos en aulas virtuales de la plataforma Zoom durante el tiempo de las clases, en equipos de dos a tres personas y con asesoría del profesorado. Cada equipo tuvo una semana para entregar sus resultados mediante la plataforma “Google Classroom”. Los entregables fueron recibidos en formato digital, incluyendo cálculos y diagramas hechos a mano o a computadora ([Anexo 5](#)). Para ilustrar la resolución de estos laboratorios se incluyen ejemplos de laboratorio bien resueltos entregados por el alumnado, y otros con importantes limitaciones ([Anexo 5](#)).

Evaluación de los laboratorios

Con el fin de evaluar de forma cualitativa en qué grado se cumplieron los objetivos generales y específicos que se plantearon al diseñar cada ejercicio, se revisaron los laboratorios resueltos por el alumnado. Durante la revisión se destacaron cuáles fueron las mayores dificultades que se tuvieron al resolver los laboratorios, y qué ejercicios fueron resueltos satisfactoriamente por la mayor parte del alumnado. Sin embargo, no se compararon los laboratorios resueltos en modalidad virtual con los resueltos en modalidad presencial por grupos de cursos anteriores. Ello debido a que el material original fue rediseñado para su impartición a través de la pantalla (2D) y a que en los cursos en línea únicamente se tuvo acceso a las estructuras a través de fotos, videos y diagramas, por lo que consideramos que estas experiencias educativas no son comparables.

Para obtener retroalimentación del alumnado se realizó una encuesta con 16 preguntas en la que evaluamos las fortalezas y la pertinencia de los 10 laboratorios y recursos de consulta. En esta consulta buscamos también conocer su opinión respecto a la dinámica de los cursos virtuales incluyendo la labor docente, así como su percepción de los ejercicios en su proceso de aprendizaje. Por esta razón algunas respuestas pueden estar sesgadas, ya que algunos temas abordados en el curso son complejos como esfuerzos, deformación y reología. La encuesta estuvo disponible por tres semanas y participaron 29 estudiantes pertenecientes a cuatro grupos diferentes a los que se impartió el curso vía remota, entre los años 2020 y 2022.

RESULTADOS

Laboratorios

En este trabajo se presentan 3 laboratorios de una serie de 10 que pueden consultarse en: [Anexo 1: Laboratorio 1. Planos y rectas](#); [Anexo 2: Laboratorio 2. Fallas](#); [Anexo 3: Laboratorio 3. Pliegues](#).

A partir del análisis de la calidad y completez en la resolución de los laboratorios por parte del estudiantado, nos es posible obtener una aproximación cualitativa a su contribución y eficacia cubriendo los objetivos didácticos propuestos para cada ejercicio.

En general, se observa que los y las estudiantes resuelven de manera correcta y completa aquellos ejercicios que consisten en cálculos matemáticos cometiendo algunos errores puntuales. De igual forma, trabajaron bien con la red estereográfica tanto al graficar planos, rectas y hacer cálculos entre estos elementos, como al analizar fallas y pliegues con esta herramienta.

Sin embargo, a pesar de realizar bien las cuentas y las descripciones de estructuras, es evidente que el estudiantado encuentra dificultades en relacionar conceptos abstractos con estructuras reales, como por ejemplo, relacionar las partes de los pliegues con los planos y rectas que los representan en la red. Otra evidencia de esto mismo yace en el hecho de que algunos esquemas de estructuras, como son secciones geológicas, o bien, la descripción de litologías en las muestras de pliegues carecen de sentido geológico y los conceptos que emplean parecen desarticulados.

En la mayoría de los laboratorios los ejercicios se resolvieron en su totalidad, aunque algunos no fueron concluidos. En estos casos notamos que la complejidad de los ejercicios es más elevada, o bien, que las instrucciones eran deficientes, por lo que los laboratorios que se presentan en este artículo ya fueron modificados para que las instrucciones sean más claras.

Encuesta

Se recibieron 29 respuestas por parte de las y los estudiantes a la encuesta planteada, las cuales pueden consultarse en el material suplementario del [Anexo 4](#). El total de estudiantes que cursó la asignatura fue de 82 personas, por lo que las 29 respuestas recibidas corresponden con un 34 % de participación.

De acuerdo con las respuestas recibidas, el estudiantado considera que el contenido de la asignatura fue cubierto de forma satisfactoria mediante la incorporación de los laboratorios y los múltiples recursos didácticos que acompañan estas actividades. También fue relevante la resolución de ejercicios en equipos pequeños, la aplicación de evaluaciones breves y frecuentes a lo largo del semestre, así como la retroalimentación detallada que les fue brindada tanto en la solución de los laboratorios como en los exámenes.

Con frecuencia se menciona en las respuestas de la encuesta, que el material didáctico utilizado les permitió desarrollar habilidades de percepción espacial, mismas que han sido de gran ayuda en el reconocimiento de estructuras en campo y para reforzar los conceptos que se explican en las lecturas de ésta y de otras asignaturas. Además, el alumnado menciona que los cursos fueron dinámicos, completos y bien organizados, y que las explicaciones del profesorado fueron claras y bien estructuradas. Esto en conjunto les motivó a estar atentos y participativos, a hacer reflexiones más profundas e integrales sobre los temas presentados en clase, y en última instancia, a hacer propio el conocimiento.

Con respecto a los laboratorios, los y las alumnas comentan que los ejercicios resueltos les permitieron asentar la teoría revisada en clase con antelación, y ponerla en práctica, así como afianzar habilidades espaciales. El tiempo de elaboración osciló entre dos y ocho horas, y su resolución les representó una dificultad entre media y alta. Es una respuesta común que la carga de trabajo fue pesada y que hubieran preferido que los laboratorios fuesen más breves, aunque se incrementaran en número o bien, que tuvieran más tiempo para entregarlos. En general, las indicaciones de los ejercicios se consideran claras, aunque la redacción podría mejorar.

Por otro lado, las respuestas recibidas sugieren que los materiales didácticos adicionales con que se acompañó el curso fueron útiles.

En particular, les resultó de gran ayuda la consulta de videos, el análisis detallado de fotografías de estructuras, el empleo de la red estereográfica para resolver problemas estructurales y, en menor proporción, la elaboración de dibujos y esquemas. Respecto al análisis de fotografías de estructuras, se expresa con mucha frecuencia que éstas les ayudan a aterrizar cómo se ven las estructuras en afloramiento y que les fue posible reconocerlas y abordarlas con seguridad.

En cuanto a los videos, se menciona que es ventajoso que éstos sean cortos y claros, que resuelvan ejercicios paso a paso iniciando con una pequeña introducción, así como el hecho de que pueden reproducirlos muchas veces y retroceder o avanzar a su gusto. Estas tres ventajas resultan en un buen acompañamiento de la teoría impartida en clase y les permiten culminar de forma exitosa sus ejercicios. En contraste, consideran como desventajas que algunos videos están en inglés y que no se aborden otros conceptos más amplios relacionados con el tema.

ANEXOS

[Anexo 1: Laboratorio 1. Planos y rectas](#)

[Anexo 2: Laboratorio 2. Fallas](#)

[Anexo 3: Laboratorio 3. Pliegues](#)

[Anexo 4: Resultados de la encuesta](#)

[Anexo 5: Ejemplos de resolución de laboratorios](#)

DISCUSIÓN

Al diseñar el material se pretendió que los alumnos desarrollaran distintas habilidades visuales y espaciales y obtuvieran las bases para describir estructuras geológicas. También se buscó que la información fuera clara, entretenida y directa. En esta sección discutimos los aciertos y áreas en las que puede mejorar el material, que se distinguieron a partir de la encuesta y la revisión de laboratorios resueltos, tomando en cuenta los objetivos específicos planteados para cada ejercicio (Tabla 1 y [Anexo 4](#)). De manera conjunta, consideramos pertinente incluir la experiencia que tuvimos como docentes durante la interacción y trabajo virtual del alumnado con este material. A pesar de que los resultados no son cuantificables, notamos que las evaluaciones reflejan el entendimiento de conceptos complejos y un buen desarrollo de habilidades espaciales.

Las experiencias compartidas por el alumnado y las propias nos permitieron identificar elementos ventajosos para la enseñanza y el aprendizaje de habilidades espaciales. A grandes rasgos, es evidente que el material didáctico presentado cumple su función de complementar los cursos teóricos, además de ser suficiente y pertinente. Los laboratorios de manera conjunta permiten a los y las estudiantes afianzar su conocimiento teórico y resolver cuestiones prácticas de manera exitosa, como describir estructuras, manipular datos espaciales de planos y líneas, proyectarlos en la red estereográfica y analizar conjuntos de datos.

Por otro lado, elementos como los modelos analógicos, las estructuras en papel, y la medición de la orientación de objetos cotidianos en casa fortalecen las habilidades espaciales del alumnado, a través de la manipulación y visualización directa de cuerpos en tres dimensiones. Estos análisis resultan ser una herramienta relevante que motiva al estudiante al razonamiento analítico, a la indagación

y al pensamiento de orden superior para la resolución de problemas prácticos. Además, el análisis de estructuras mediante esquemas y fotografías, les permite relacionar conceptos abstractos con estructuras geológicas reales, lo cual ayuda a cubrir una de las mayores deficiencias que se encontraron en las respuestas de los alumnos.

Es muy importante resaltar la relevancia del trabajo en brigadas de dos a tres integrantes, ya que se fomenta el trabajo en equipo, la verbalización de ideas y conceptos abstractos, la discusión crítica y la reflexión colectiva. Los espacios pequeños de diálogo dan confianza al alumnado y permiten a los profesores brindar una asesoría más cercana y personalizada.

Durante el diseño y redacción de los laboratorios, se buscó que la información contenida fuera suficiente, completa y clara para que pudieran ser resueltos de manera autónoma. Consideramos que con las indicaciones es necesario revisar y enriquecer continuamente su redacción y contenido. Además, las respuestas de los y las alumnas acusan un problema en la integración de conceptos de diferentes áreas de la Geología al trabajar con estructuras geológicas, por lo que creemos que es importante reforzar este conocimiento previo en los cursos teóricos o bien recomendar lecturas afines.

CONCLUSIONES

La enseñanza virtual en Geología Estructural durante la pandemia por el virus SARS-CoV-2 presentó un reto tanto para docentes como para estudiantes. En este contexto, los laboratorios para el aprendizaje autónomo propuestos en este trabajo atendieron aspectos prácticos relacionados con el desarrollo de habilidades de visualización espacial. A partir de las encuestas respondidas y la revisión de los laboratorios resueltos es evidente que la interacción del alumnado con materiales y dinámicas inmersivas resultó en una experiencia enriquecedora.

Este material, aunque perfectible, es completo, pertinente, claro y utiliza información veraz y de calidad, publicada en español, con lo cual se enriquece la oferta de recursos didácticos disponibles de manera gratuita para docentes de Geología Estructural. Así mismo, tanto la diversidad de recursos, como la claridad del material fortalecen las habilidades de resolución de problemas y pensamiento abstracto espacial.

Los recursos presentados tienen algunas debilidades que pretendemos revisar y corregir continuamente a partir de la retroalimentación de los y las usuarias de este material. Se puede mejorar a través del uso de fotografías de afloramientos tridimensionales. Así mismo, debido a la poca oferta de material, fue imprescindible utilizar videos y *software* en inglés, lo cual puntualmente obstaculiza y retrasa el entendimiento de los ejercicios para algunos estudiantes. Con esto queremos resaltar la necesidad y responsabilidad que tenemos como docentes de compartir y generar material en español, o bien de traducir textos y audios, para con nuestras comunidades estudiantiles. Consideramos de gran importancia que otros docentes prueben este material en sus cursos y nos compartan sus comentarios para su mejora. Así mismo, invitamos a la comunidad de Geología Estructural de habla hispana a desarrollar y compartir su material de enseñanza a favor de la educación pública.

Finalmente, notamos que la enseñanza acompañada de múltiples recursos permite abrir un canal de aprendizaje más fluido. Los

laboratorios presentados cumplen su función de implementar varias técnicas de enseñanza-aprendizaje y de estimular a las personas a imaginar y comprender, tanto conceptos abstractos, como estructuras propias de esta rama de la Geología.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al alumnado que utilizó los materiales presentados en este trabajo a lo largo de los cursos virtuales por sus comentarios y participación activa al responder la encuesta. De igual forma agradecemos las sugerencias pedagógicas de Jessica Evangelista quien nos ayudó a plantear la encuesta, así como los objetivos didácticos de los laboratorios. También agradecemos a Aura Martínez y Alberto Vásquez, profesores que compartieron sus vivencias durante la impartición de estos cursos. Finalmente, agradecemos las revisiones y sugerencias de Mónica Guadalupe Ramírez Calderón, Gilberto Silva Romo, así como de las editoras y correctoras de estilo de la revista que ayudaron a mejorar sustancialmente este manuscrito

REFERENCIAS

- Fossen, H. (2016). *Structural Geology*. 2nd Ed. Cambridge University Press.
- Fossen, H. (2022). *Structural Geology*. E-modules. Recuperado de: <https://folk.uib.no/nglhe/StructuralGeoBookEmodules2ndEd.html>
- Kastens, K. A., Manduca, C. A., Cervato, C., Frodeman, R., Goodwin, C., Liben, L. S., y Titus, S. (2009). How geoscientists think and learn. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(31), 265-266.
- Shiple, T. F., Tikoff, B., Ormand, C., y Manduca, C. (2013). Structural geology practice and learning, from the perspective of cognitive science. *Journal of Structural Geology*, 54, 72-84.
- Titus S. y Horsman E. (2009). Characterizing and Improving Spatial Visualization Skills. *Journal of Geoscience Education*, 57:4, 242-254.
- Van der Pluijm, B. A., y Marshak, S. (2004). *Earth structure*. New York

Manuscrito recibido: 1 de octubre de 2022

Manuscrito corregido-recibido: 30 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 5 de diciembre de 2022

UN EXPERIMENTO SENCILLO PARA ILUSTRAR LAS INVERSIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Violeta Ortiz-Olvera^{1*} y Thierry Calmus¹

¹Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Luis Donaldo Colosio y Madrid S/N, Campus UNISON, Hermosillo, Sonora, México, C.P. 83000. *violet.13.tierra@gmail.com

RESUMEN

Entender y divulgar los procesos geológicos representa una dificultad pedagógica por múltiples razones, entre ellas la necesidad de conocer conceptos de diversas ciencias básicas para explicar cada proceso. Es el caso de los fenómenos relacionados con la Tectónica de Placas, como la formación de nueva corteza oceánica y cómo ocurre el desplazamiento de los continentes conforme crece el piso oceánico. Este artículo presenta un experimento sencillo, accesible y de bajo costo que permite visualizar y entender el origen, la generación y la migración de las anomalías magnéticas que se forman en las dorsales oceánicas. El experimento se acompaña de una explicación de los conceptos básicos como el campo magnético terrestre, el proceso de magnetización, la magnetización termorremanente y la estructura de la dorsal oceánica. También se resaltan las implicaciones que se tuvieron para entender este proceso durante el desarrollo de la teoría de la Tectónica de Placas.

Palabras clave: Campo magnético terrestre, piso oceánico, anomalías magnéticas, dorsal, experimento.

ABSTRACT

The understanding of geological processes represents a challenge for many reasons, including the appropriate handling of concepts from many sciences. This is the case of the phenomena related to Plate Tectonics such as oceanic accretion, which causes the creation of new oceanic crust and the displacement of the continents. This article presents the implementation of a simple experiment that allows visualizing and understanding the origin, generation and migration of magnetic anomalies forming parallel along of mid-ocean ridges. The experiment is accompanied by an explanation of basic concepts such as the Earth's magnetic field, the magnetization process, thermoremanent magnetization and the structure of an oceanic ridge. Additionally, the relevance of these concepts in the Plate Tectonics development is highlighted. The material needed for the experiment is very accessible and cheap.

Key words: Earth's magnetic field, ocean floor, magnetic anomalies, ocean ridge, experiment.

INTRODUCCIÓN

La Tierra es un sistema dinámico constituido por varios sistemas que se diferencian por múltiples características, como la densidad, la temperatura y la composición química. Además, cada capa interactúa de forma directa o indirecta con las otras, como es el caso de la corteza con el manto y el manto con el núcleo (Tarbuck *et al.*, 2015). De tal manera que muchos fenómenos naturales son el resultado de la interacción de varias capas. Por esta razón que es necesario estudiar cada fenómeno natural en un contexto general, tomando en cuenta todos los componentes, lo cual requiere de una visión multidisciplinaria (Tarbuck *et al.*, 2015).

Un ejemplo de un fenómeno que requiere de este tipo de visión multidisciplinaria es la distribución simétrica de las anomalías magnéticas en el piso oceánico. Una anomalía es la desviación entre la medición magnética en un punto y el valor teórico esperado del campo magnético. Conviene subrayar que el arreglo de las anomalías tuvo una gran importancia en el entendimiento de la dinámica de la Tierra y para el desarrollo de la teoría de la Tectónica de Placas, porque permitió entender la creación simétrica de nueva corteza oceánica a nivel de las dorsales oceánicas, así como cuantificar la velocidad y dirección del movimiento de las placas tectónicas (Vine y Matthews, 1963; Turcotte y Schubert, 2002).

Con el objetivo de ilustrar este fenómeno terrestre, se realizó el diseño de un experimento que modela la expansión del piso oceánico y las inversiones magnéticas. La magnetización es un fenómeno que resulta en primera instancia del movimiento de convección y de rotación del núcleo exterior, el cual genera el campo magnético terrestre. Se buscó ofrecer un experimento sencillo que sea aplicable desde el nivel de secundaria, cuando se da a conocer a los alumnos el concepto de la Tectónica de Placas. Además de construir un modelo, se buscó desarrollar la habilidad de observación de un fenómeno en condiciones controladas, entender las causas del fenómeno, para luego correlacionarlo con el fenómeno natural que ocurre en la Tierra. En suma, los aprendizajes que se buscan alcanzar son: 1) conocer la existencia de las inversiones del campo magnético terrestre; 2) conocer el mecanismo de registro del campo magnético en las rocas; 3) entender el patrón de las anomalías magnéticas en el piso oceánico y 4) explicar cómo ayudaron las inversiones del campo magnético terrestre a explicar el movimiento de los continentes.

METODOLOGÍA

Para la construcción del modelo se utilizan materiales que son de fácil acceso (Tabla 1). Salvo la limadura de hierro, el resto de los materiales como el papel, el cartón, la vela y el imán son materiales de fácil acceso y de bajo precio. Además, su construcción es bastante sencilla, solo se necesita una base de cartón con un espacio abajo donde entre la mano de la persona que realiza el experimento. Lo demás se realiza sobre el cartón y no es necesaria una preparación adicional. Así pues, el modelo fue diseñado para que fuera claro observar cómo se expande el piso oceánico de ambos lados de las dorsales oceánicas. El video del modelo está disponible en el siguiente enlace:

<https://youtu.be/u23tt4h3RS4>

Para empezar, se requiere una base de cartón con una ranura alargada (Figura 1A) que representa la dorsal oceánica por donde se hacen pasar dos tiras de papel dirigidas hacia cada lado (Figura 1B). Luego, se distribuyen las limaduras de hierro sobre el papel y se coloca el imán por debajo del cartón (Figura 1C). Como resultado las limaduras se van a orientar de forma paralela al campo magnético del imán y después se vierte cera líquida sobre ellas (Figura 1C). Una vez endurecida la cera, la orientación de las limaduras se mantendrá fija. A continuación, las tiras de papel se jalan hacia lados opuestos, y la cera se divide en dos, recorriéndose perpendicularmente de ambos lados de la dorsal como franjas paralelas a la misma dorsal. El proceso se realiza varias veces, invirtiendo la orientación del imán en cada fase.

El experimento consta de dos etapas. La primera consiste en generar un patrón moviendo el imán y la segunda en generar otro patrón moviendo la base de cartón (Figura 2). En cada etapa del experimento se hace una analogía con el proceso real. Además, se menciona que las anomalías magnéticas son un registro del campo magnético durante el crecimiento del piso oceánico, lo cual fue una de las bases más sólidas

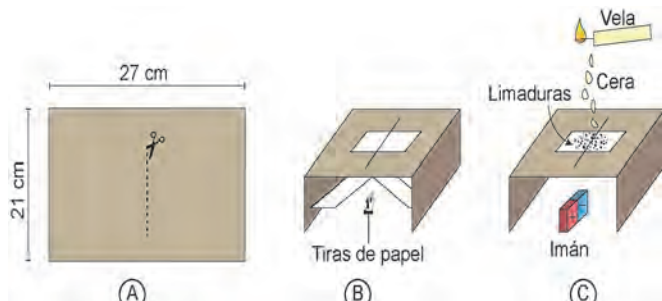


Figura 1. A) Esquema de las dimensiones del cartón, así como de la ubicación de la ranura. B) Las dos cintas de papel se introducen en la ranura. C) Ubicación de todos los objetos necesarios para este experimento.

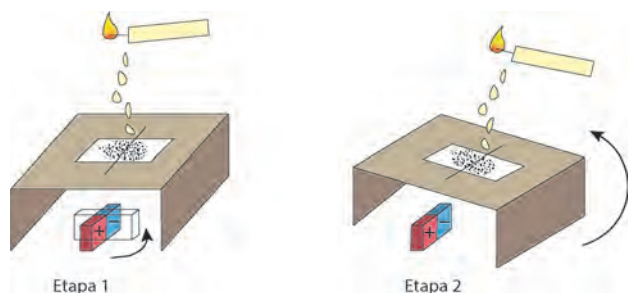


Figura 2. Etapa 1) en la primera etapa el experimento consiste en girar el imán ubicado por debajo del cartón. Etapa 2) en esta etapa el experimento consiste en girar el cartón y mantener fijo el imán. Ubicación de todos los objetos necesarios para este experimento.

para el desarrollo de la teoría de la Tectónica de Placas (Véase el video de este experimento en: <https://youtu.be/u23tt4h3RS4>)

Tabla 1. Lista de materiales	
• Pedazo de cartón	Dimensiones: 27 cm x 21 cm
• 4 tiras de papel bond	Dimensiones: 27 cm x 10 cm
• Una vela	
• Un imán	
• Limadura de hierro	Aproximadamente 100 g

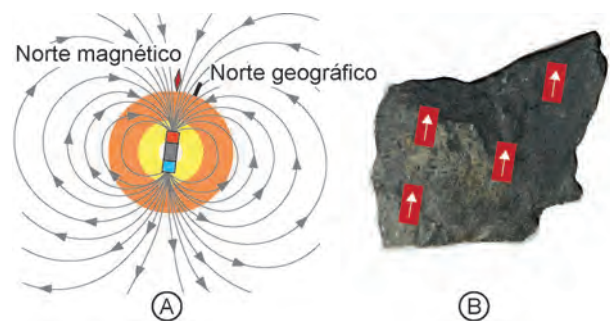


Figura 3. A) Representación del campo magnético terrestre, se observa que el polo norte magnético es distinto del polo norte geográfico. El campo magnético terrestre se origina en el núcleo terrestre. B) La magnetización termoremanente en las rocas se forma cuando los minerales magnéticos se orientan con respecto al campo magnético terrestre durante el enfriamiento.

PROPUESTA DEL EXPERIMENTO

Antes de realizar el experimento es necesario presentar algunos conceptos para entender la analogía del modelo con la realidad. En primer lugar, el campo magnético terrestre se origina en el núcleo externo líquido, y es similar al campo generado por un dipolo magnético (Figura 3A) colocado en el centro de la Tierra cuya polaridad se invierte cada cierto tiempo por motivos aún no bien entendidos, probablemente relacionados con el sentido del movimiento del material en el núcleo externo, o con las interacciones entre núcleo interno y externo. En el experimento, se recrea el campo magnético

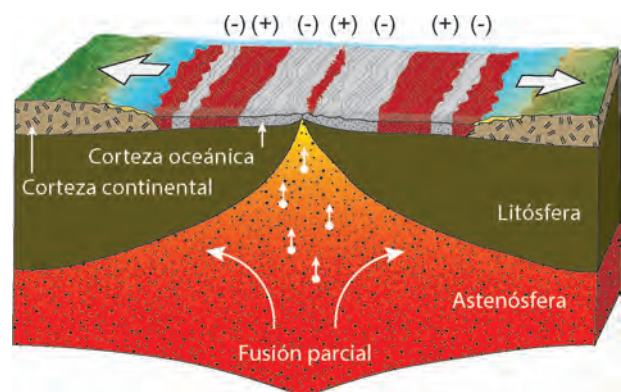


Figura 4. Esquema de las partes de una dorsal oceánica. En una dorsal oceánica se forma nueva corteza oceánica y manto litosférico por el ascenso de magma proveniente de la astenósfera que se forma por fusión parcial. El espesor de la litósfera aumenta proporcionalmente alejándose de la dorsal oceánica. El movimiento relativo opuesto de las placas deja permanentemente un espacio a nivel de la dorsal, lo cual permite la subida de material astenosférico hasta la superficie. El piso oceánico tiene un patrón simétrico paralelo a la dorsal de anomalías magnéticas positivas y negativas. Modificada de Tarbuck y Lutgens (2015) y Turcotte y Schubert (2002).

con un imán. En segundo lugar, las rocas que forman el piso oceánico provienen de magmas que se generan en el manto astenosférico y se emplazan a lo largo de las dorsales, para formar franjas de corteza oceánica que van desplazando a las rocas formadas en un episodio anterior (Figura 4). En realidad, este fenómeno es continuo a escala geológica, pero las anomalías dan la falsa impresión de que la acreción se produce durante etapas discretas o discontinuas (Figura 4). Durante el enfriamiento del magma, los minerales magnéticos se alinean paralelamente con la dirección del campo magnético terrestre (Figura 3B). Este fenómeno es semejante al que ocurre cuando una aguja de una brújula se alinea con el campo magnético terrestre. Por lo anterior, en las rocas queda un registro del campo magnético existente al momento de su enfriamiento, llamado magnetización

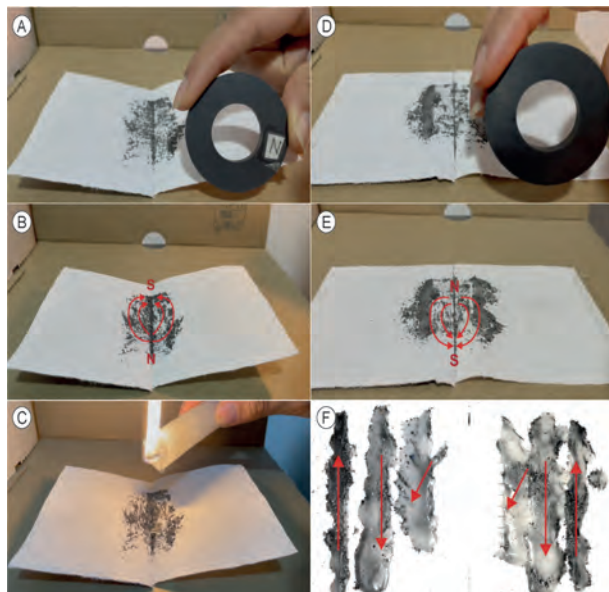


Figura 5. Capturas de pantalla del experimento en video. A) Muestra de la orientación del imán que se ubicará por debajo del cartón. B) Limaduras de hierro orientadas de acuerdo con el campo magnético del imán. Las flechas rojas indican el sentido de las líneas de fuerza y ubicación de los polos magnéticos. C) Momento en que se vierte cera derretida sobre las limaduras orientadas. D) El siguiente paso muestra cuando se invierte la orientación del imán, se rotó 180°. E) limaduras de hierro libres orientadas con el imán en su nueva posición. La cera fría del paso anterior se encuentra en los bordes. F) Patrón final obtenido con 3 pasos. Las limaduras contenidas en la cera tienen tres orientaciones distintas y son simétricas respecto al centro de las hojas.

termorremanente. El estudio de la magnetización fósil en las rocas, o paleomagnetismo, permite reconstruir la evolución del piso oceánico y de su migración paulatina desde las dorsales oceánicas (Figura 4). En particular, se descubrió que, en el fondo marino las medidas hechas por magnetómetros indicaron que las rocas formaban bandas simétricas con respecto a la dorsal y estaban intercaladas con polaridad normal e inversa.

La primera etapa del experimento representa el proceso de expansión oceánica que ocurre en las dorsales oceánicas. Es decir, la ranura por donde salen las tiras del papel representa el eje de la dorsal; jalar las tiras de papel representa la expansión del piso oceánico; la limadura representa los minerales ferromagnesianos; y el imán representa el campo magnético terrestre (Figura 5A). Al verterlas, las limaduras se orientan con el campo magnético del imán (Figura 5B). Verter la cera es análogo a la acreción del magma a lo largo del eje de la dorsal (Figura 5C). El enfriamiento de la cera representa el enfriamiento del magma y las limaduras representan

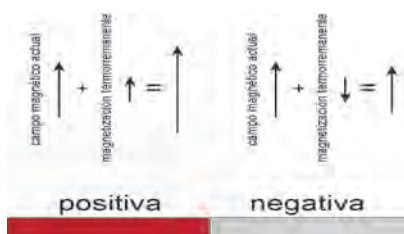


Figura 6. La anomalía magnética positiva corresponde a una orientación de la magnetización termorremanente en el mismo sentido que el campo magnético actual. Al contrario, la anomalía negativa indica que la magnetización termorremanente es opuesta a la imantación del campo magnético actual. Modificado de Larroche y Virieux (2001).

los minerales orientados con el campo magnético del imán. El cambio en la polaridad del imán cuando lo rotamos 180° representa el fenómeno de inversión del campo magnético terrestre (Figuras 5D y 5E). De esta manera, el resultado final está constituido por dos tiras de papel con un patrón simétrico de cera y limaduras con respecto a la ranura que representa la dorsal (Figura 5F). Este patrón es el reflejo de la distribución simétrica del piso oceánico con respecto a las dorsales oceánicas.

El campo magnético que se mide en algún punto del piso oceánico es entonces la resultante del campo magnético actual y de la magnetización termorremanente. Si el campo magnético y la magnetización termorremanente están en el mismo sentido, se mide una anomalía magnética positiva o normal (Figura 6). Al contrario, si están en sentidos opuestos, se detecta una anomalía negativa o invertida (Figura 6).

Así pues, en este experimento se relacionaron las anomalías magnéticas con el fenómeno ya conocido de inversión del campo magnético de la Tierra. Los estudios paleomagnéticos del piso oceánico durante la década de los 1960's mostraron un patrón

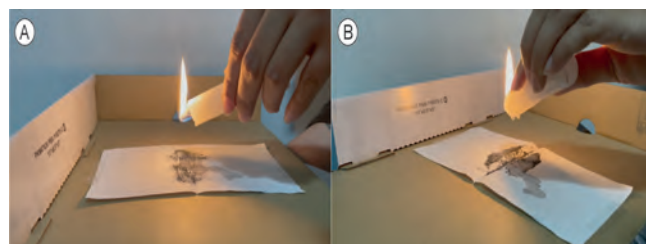


Figura 7. Capturas de pantalla del experimento en la segunda etapa. A) primer paso del experimento con el cartón en su posición original. B) segundo paso con el cartón rotado. En este caso el imán no cambia de posición.

simétrico en las anomalías magnéticas respecto a la dorsal oceánica. Vine y Matthews (1963) relacionaron directamente las anomalías magnéticas con la inversión del campo magnético terrestre. Posteriormente, otros estudios determinaron la edad de las rocas del piso oceánico, de tal manera que se estableció una escala temporal de las anomalías magnéticas. De ahí fue posible, conociendo la edad y la distancia de una anomalía magnética a la dorsal, calcular la velocidad de expansión del piso oceánico (Turcotte y Schubert, 2002).

Finalmente, el estudio de las dorsales oceánicas y las anomalías magnéticas ayudaron a entender los procesos de expansión de la litósfera del planeta. Eso tuvo grandes implicaciones en el desarrollo de la teoría de la Tectónica de Placas porque aclaró el fenómeno de la deriva de los continentes (Turcotte y Schubert, 2002).

La segunda parte del experimento consiste en volver a generar un patrón de anomalías, pero ahora moviendo la base de cartón (Figura 7A). En cada paso, primero se cambia la posición del cartón, se esparce la limadura, se coloca el imán por debajo en una posición fija para orientar las limaduras y se vierte la cera en el eje de la ranura (Figura 7B). Con esta segunda parte del experimento se pone en evidencia que el cambio en las orientaciones de las anomalías también está relacionado con el cambio de orientación de la dorsal.

El paleomagnetismo no solamente estudia las anomalías magnéticas termorremanentes, sino que también estudia la orientación de la magnetización en otras rocas, en particular continentales. La variación aparente de la orientación del campo magnético fósil corresponde a un desplazamiento de las rocas con respecto a su posición original. Es la técnica que se utiliza para reconstruir las trayectorias de los continentes en el pasado (Turcotte y Schubert, 2002).

CONCLUSIÓN

Se propone un experimento innovador que busca explicar un fenómeno terrestre relacionado con la teoría de la Tectónica de Placas. A través de un modelo analógico, se muestra el origen, la generación y la migración de las anomalías magnéticas en el piso oceánico. Este modelo tiene la ventaja de ser accesible y sencillo. Al mismo tiempo, se introducen conceptos geológicos como las anomalías magnéticas, el paleomagnetismo, el magnetismo remanente y la expansión del piso oceánico cuya enseñanza representa un reto pedagógico. Además, a través del ejemplo del paleomagnetismo se busca fomentar la capacidad de observación, de razonamiento científico y de construcción de conocimiento.

El video está disponible en el siguiente enlace:

<https://youtu.be/u23tt4h3RS4>

AGRADECIMIENTOS

Violeta Ortiz agradece al Diplomado en Enseñanza de Ciencias de la Tierra y en especial a la doctora Susana Alaniz Álvarez por brindar una enseñanza tan amena y sensible, aún en tiempos pandémicos. Este experimento es fruto de la creatividad incentivada por la Dra. Alaniz-Álvarez para no limitarse a intentar enseñar temas que aparentemente son complejos. Gracias al Ing. Emiliano Morones por su apoyo en la construcción del modelo y en la grabación del video.

REFERENCIAS

- Larroche, C., y Virieux, J. (2001) *Physique de la Terre solide, observation et théories*, Collection Géosciences. Gordon and Beach Science Publishers.
- Tarback, E.J. y Lutgens, F.K. (2015) *Earth Science*. (14ª Ed.). Pearson.
- Turcotte, D.L. y Schubert, G. (2002) *Geodynamics*. (2ª ed.). Cambridge University.
- Vine, F. y Matthews, D. (1963) Magnetic anomalies over ocean ridges. *Nature*, 199, 947-949.

Manuscrito recibido: 1 de septiembre de 2022

Manuscrito corregido recibido: 11 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 14 de noviembre de 2022

IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS CONCEPTOS ERRÓNEOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Gustavo M. Bastien-Montoya^{1*}, Bernardo A. Bastien-Olvera²,
Raiza Pilatowsky-Gruner³ y Carlos Gay-García⁴

¹Universidad Autónoma Metropolitana, México. Av. San Pablo No. 180 Col. Reynosa Tamaulipas C.P. 02200 Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México. *mbastien@azc.uam.mx

²Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, 9500, Gilman Drive La Jolla, CA. C.P. 92093. bbastien@ucsd.edu

³Estudios Planeteando, Refugio 86, Col. Nativitas C.P. 03500, Alcaldía Benito Juárez, Ciudad de México. raiza.pila@gmail.com

⁴Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México. cgay@unam.mx

RESUMEN

Los conceptos erróneos son razonamientos equivocados muy arraigados que se resisten a cambiar incluso cuando se abordan mediante la enseñanza. En el campo del cambio climático y la educación ambiental, se han estudiado los conceptos erróneos con el fin de rectificar la comprensión errónea del tema, especialmente en los estudiantes, que serán los responsables de la toma de decisiones en un mundo futuro que experimentará los mayores impactos del cambio climático. Algunos de los conceptos erróneos más dominantes están relacionados con la incompreensión de la capa de ozono, el efecto invernadero y el concepto de calentamiento global. Sin embargo, se sabe muy poco sobre cómo se relacionan estos conceptos erróneos entre sí y si existen diferentes niveles de importancia entre ellos. Aquí demostramos que los conceptos erróneos particulares sobre el cambio climático y las interacciones específicas entre ellos funcionan como predictores de la incompreensión general del tema. Para ello, analizamos las respuestas de los estudiantes universitarios a las encuestas sobre los conceptos del cambio climático utilizando métodos de *bosque aleatorio*. A diferencia de estudios anteriores que han proporcionado una lista categórica de conceptos erróneos sobre el cambio climático, este estudio encuentra los niveles de importancia relativa entre los conceptos erróneos, revelando que la creencia de que el agujero en la capa de ozono es la causa principal del cambio climático y que el efecto invernadero ha sido provocado por los seres humanos. Estos son conceptos erróneos significativos que también actúan como predictores de la incompreensión general del tema. Estos resultados nos permiten identificar las ideas clave con las que los alumnos tienen más dificultades. Este estudio podría servir como punto de partida para comprender la interrelación de ideas que hacen del cambio climático un campo de estudio complejo.

Palabras clave: Modelos mentales, conceptos erróneos, cambio climático, educación, capa de ozono.

ABSTRACT

Misconceptions are deep-seated and erroneous thought processes that resist change even when addressed through teaching. In the field of climate change and environmental education, misconceptions have been studied in order to rectify the misunderstanding of the topic, especially in students, who will be the decision makers of a future world that will experience the greatest impacts of climate change. Some of the most dominant misconceptions are related to the misunderstanding of the ozone layer, the greenhouse effect and the concept of global warming. However, very little is known about how these misconceptions relate to each other, and whether there are different levels of importance between them. Here we demonstrate those particular misconceptions about climate change and specific interactions between misconceptions function as predictors of general misunderstanding of the topic. To do so, we analyze college students' responses to surveys on climate change concepts using random forest methods. Unlike previous studies that have provided a categorical list of climate change misconceptions, this study finds levels of relative importance among misconceptions, revealing that the belief that the ozone hole is the primary cause of climate change and that the greenhouse effect has been caused by humans are significant misconceptions that also act as predictors of general misunderstanding of the topic. These results allow us to identify the key ideas with which students have the most difficulty. This study could serve as a starting point for understanding the interrelationship of ideas that make climate change a complex field of study.

Keywords: Mental models, misconceptions, climate change, education, ozone layer.

INTRODUCCIÓN

La correcta comprensión del cambio climático por parte de los estudiantes universitarios es fundamental, ya que en los próximos años se convertirán en responsables de la toma de decisiones que podrían influir en la forma de mitigar el cambio climático y adaptarse a él (Gautier *et al.*, 2006).

Esto adquiere mayor importancia ya que los estudios demuestran que el conocimiento de las causas del cambio climático y de sus repercusiones puede aumentar la preocupación psicológica por el tema, así como predecir si se tomarán medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Bord *et al.*, 2000; Spence *et al.*, 2011). Sin embargo, al igual que ocurre con otros temas complejos en la enseñanza de las ciencias, como la selección natural (Ferrari y Chi, 1998), se han detectado en los estudiantes varias ideas erróneas sobre los conceptos y procesos centrales del cambio climático (Chang y Pascua, 2016; Gautier *et al.*, 2006; Karpudewan *et al.*, 2015; Ramírez Vázquez *et al.*, 2016). La presencia de estos razonamientos erróneos es preocupante porque impide adquirir nuevos conocimientos científicos. Por lo tanto, el estudio de las ideas erróneas sobre el cambio climático en los estudiantes de nivel universitario resulta crucial, ya que la mayoría de ellos ya no tomarán cursos relacionados con el cambio climático, e incluso si lo hacen, es posible que sus razonamientos erróneos arraigados sobre el cambio climático permanezcan.

Investigaciones anteriores sobre las ideas erróneas sobre el cambio climático han identificado varias ideas incorrectas que tienen los estudiantes de distintos niveles educativos, como la creencia de que el cambio climático se origina con el deterioro de la capa de ozono (Ramírez Vázquez *et al.*, 2016), que el cambio climático puede reducirse separando la basura, que el CO₂ genera el agujero en la capa de ozono, o que podemos controlar las concentraciones de CO₂ en nuestras tasas de emisión actuales o por encima de ellas (Dutt y Gonzalez, 2012).

Por ejemplo, una investigación con estudiantes de nivel universitario (De La Chaussée-Acuña y Cházari-De La Chaussée, 2017) ha descubierto que, aunque no entiendan lo que significa el cambio climático, sí se comprenden sus efectos. En un caso centrado específicamente en el efecto invernadero mediante el uso de mapas conceptuales, los investigadores descubrieron que los modelos mentales de los estudiantes universitarios mostraban una falta de comprensión de cómo funcionan los procesos radiativos, al explicar el efecto invernadero como energía solar atrapada o gases de efecto invernadero atrapados, así como una falta de conocimiento de que la Tierra tiene un efecto invernadero natural (Gautier *et al.*, 2006; Rebich y Gautier, 2005). Por otra parte, en un estudio realizado con estudiantes universitarios británicos sobre sus conocimientos del cambio climático global, más concretamente sobre el efecto invernadero y el agotamiento de la capa de ozono, los resultados muestran que en general tenían una buena comprensión de ambos fenómenos, aunque sus conocimientos sobre el agotamiento de la capa de ozono eran significativamente mayores que los del efecto invernadero (Spellman *et al.*, 2003).

En el nivel de secundaria, la mayoría de los estudios han constatado que dentro de los temas del calentamiento global, el efecto invernadero y el cambio climático, así como sus diferencias, causas, impactos y posibles soluciones, los alumnos tienen modelos mentales erróneos y, como en otros casos, ven una relación entre la capa de ozono como fuente o consecuencia del efecto invernadero (Jacobson *et al.*, 2017; Shepardson *et al.*, 2011). En un ejemplo reciente de Singapur (Chang y Pascua, 2016), los autores evaluaron el grado de completitud, coherencia y corrección de los conocimientos de los alumnos de 9º curso sobre varios temas relacionados con el cambio climático. Sus conclusiones indican que los modelos mentales de los alumnos se construyen con información errónea e incompleta,

de la que no son conscientes y, por tanto, son resistentes al cambio.

Aunque todos estos estudios han aportado grandes conocimientos acerca de los conceptos erróneos sobre el cambio climático, sólo se han centrado en crear listas categóricas, sin analizar las relaciones entre los distintos conceptos erróneos. En este estudio exploramos si ciertos conceptos erróneos podrían utilizarse como indicadores de modelos mentales erróneos de los estudiantes sobre el cambio climático, e identificamos la importancia relativa de los conceptos erróneos sobre el cambio climático conocidos para predecir la corrección de la comprensión de los estudiantes universitarios sobre el cambio climático utilizando árboles de regresión y métodos de Bosque Aleatorio o *Random Forest* (RF), así como la comprensión de otras variables clave con un modelo de regresión lineal. De febrero a julio de 2018, encuestamos a 315 estudiantes de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en la Ciudad de México de tres áreas de estudio (sociología/economía, ingeniería y diseño/arquitectura) a lo largo de un amplio rango de unidades cursadas (ver Métodos). La encuesta estuvo conformada por ocho preguntas cerradas y dos abiertas que tuvieron como objetivo alinear afirmaciones falsas y verdaderas sobre el cambio climático con diferentes razonamientos que explicaran si esa afirmación podía ser falsa o verdadera, lo que nos permitió identificar no sólo si los estudiantes conocían la veracidad de las afirmaciones, sino también si tenían un razonamiento detrás de la respuesta que pudiera considerarse un modelo explicativo congruente, aun cuando la afirmación fuera falsa.

MÉTODOS

Datos. Nuestros datos contienen las respuestas de 315 estudiantes de la Universidad Autónoma Metropolitana campus Azcapotzalco, lo que da cuenta de una muestra estadísticamente representativa de los estudiantes inscritos en el primer trimestre de 2018. La encuesta consta de ocho preguntas de opción múltiple y dos preguntas abiertas. Cada pregunta de opción múltiple contiene una afirmación sobre el cambio climático y el estudiante debe responder si es falsa, verdadera o desconocida para él. Cada afirmación tiene un segundo conjunto de opciones de elección múltiple que daba cuenta de la razón del estudiante de esa elección. El conjunto de opciones representaba una razón correcta informada científicamente, una razón incorrecta informada científicamente, una razón informada por los medios de comunicación y una razón que daba cuenta de la falta de información. Las preguntas y las opciones de la encuesta se formularon inicialmente a partir de una amplia revisión bibliográfica y se publicó una primera versión que fue revisada por expertos en cambio climático y educación científica (Bastien Montoya *et al.*, 2018), teniendo en cuenta criterios de claridad, brevedad, vocabulario común, contenido y relevancia. Las preguntas y las respuestas correctas pueden consultarse en el [Anexo 1](#).

Con las respuestas creamos primero un índice binario para cada respuesta que ilustra si la respuesta es congruente. Una respuesta congruente viene dada por un par de opciones que no genera una contradicción. Si la respuesta del alumno es correcta (incorrecta) en cuanto a si una determinada afirmación es verdadera o falsa, tiene que tener necesariamente la razón correcta (incorrecta) asociada, científicamente informada, para considerarla una respuesta congruente.

Bosque aleatorio (RF). Sumamos las respuestas correctas y congruentes y obtenemos una puntuación total para cada alumno. Utilizamos esta puntuación para revelar los conceptos clave mediante una técnica de aprendizaje supervisado denominada Bosque Aleatorio (Breiman, 2001). Un árbol de regresión se genera dividiendo una variable de predicción en dos subconjuntos óptimos que generan el menor error cuadrático medio entre el valor observado de cada variable de respuesta dentro del subconjunto y el valor medio de respuesta del propio subconjunto. Se realizan más subdivisiones dentro de cada subconjunto hasta que se utilizan todas las variables predictoras y el valor medio de la respuesta del último subconjunto se utiliza como valor de predicción del árbol. Un bosque aleatorio es un conjunto de un gran número de árboles utilizados conjuntamente para predecir un único valor. Los árboles individuales de un bosque crecen utilizando una submuestra aleatoria de los predictores en cada paso de división.

El valor del bosque se obtiene con la media de todos los árboles, bajo la premisa de que varios modelos buenos son mejores que un único modelo sobreajustado. Nuestra variable de respuesta es la puntuación global, y su predictor es el valor binario individual correcto y congruente de cada pregunta. Por definición, cada rama de un árbol que tenga una observación (no) congruente y correcta dará lugar a puntuaciones globales más altas (más bajas). Sin embargo, la técnica de muestreo *bootstrapping* aplicada en cada árbol del bosque nos permitirá identificar los predictores que generaron mejores modelos, es decir, los conceptos más importantes que conducen a puntuaciones globales más altas o más bajas.

Obtenemos cuatro como número óptimo de variables de submuestra para el *bootstrap* utilizando una técnica de validación cruzada. El número de árboles en el bosque es de 500, como suele establecerse por defecto (Breiman, 2002). Por último, medimos la importancia de las variables estimando la profundidad mínima a la que se encuentra la variable en cada árbol del bosque. Cuanto menor sea la profundidad, la variable será encontrada más rápido por el algoritmo de *bootstrapping* como una variable de partición óptima que produce el menor error cuadrático medio, por lo tanto, las profundidades mínimas más bajas representan variables más importantes.

Para las interacciones entre conceptos erróneos, los valores condicionales se calculan con un enfoque similar, sin embargo, la profundidad mínima no se calcula con respecto a todo el árbol sino sólo con respecto a la variable condicional, dicho cálculo se realizó con el paquete del software "r" *explainmyforest*.

Regresiones. Las dos últimas preguntas están relacionadas con la percepción individual. Preguntamos a los alumnos si han experimentado personalmente el cambio climático y si creen que el clima terrestre reciente puede considerarse normal. Es importante distinguir que estas preguntas están directamente relacionadas con la percepción del alumno y no con la ciencia del cambio climático. Por lo tanto, no hay respuestas erróneas, ya que no podríamos desacreditar las percepciones de las personas.

Realizamos regresiones para la percepción personal del cambio climático y la percepción de condiciones normales en el clima global reciente utilizando diferentes especificaciones de ecuación (lineal y binomial) y diferentes variables. Utilizando el criterio de información de Akaike (Gareth *et al.*, 2013) encontramos el modelo relativamente mejor. Para la variable dependiente de percepción personal, el

mejor modelo fue una función de regresión binomial de género, log(unidades) y percepción del cambio global. Sin embargo, no hubo variables estadísticamente significativas para las regresiones realizadas a la percepción del cambio climático global como variable dependiente. En particular, los conceptos erróneos no mostraron ninguna relación estadísticamente significativa con estas variables. Se realizó un análisis similar con la puntuación de la suma de las respuestas correctas y congruentes (C&C) como regresión, pero ahora utilizando modelos de regresión lineal y de Poisson (Gareth *et al.*, 2013). El modelo relativamente mejor es un modelo de Poisson dependiente de la percepción del cambio climático global, las unidades y el área de estudio, pero no del género ni de la percepción personal del cambio climático.

RESULTADOS

En primer lugar, clasificamos cada respuesta asociando la veracidad de la afirmación con la congruencia del razonamiento que la sustenta (Tabla 1) y cuantificamos dos tipos de puntuación global para cada alumno: la suma de las respuestas correctas y la suma de las respuestas correctas y congruentes (C&C). La figura muestra las distribuciones de frecuencias de dichas puntuaciones, lo que demuestra que las puntuaciones C&C más altas son menos frecuentes que las puntuaciones sólo correctas.

	Razonamiento correcto	Razonamiento erróneo
Declaración verdadera	Correcto y congruente (C&C)	Correcto e incongruente (Otros)
Declaración falsa	Incorrecto y congruente (Otros)	Incorrecto e incongruente (Otros)

Una prueba de ANOVA sobre estos datos arroja un valor p de 0.03, lo que hace que la diferencia entre las puntuaciones de C&C y las de sólo corrección sea estadísticamente significativa a un nivel del 97 % (Figura 1). Consideramos que esta evidencia es suficiente para confiar más en las puntuaciones de C&C en el próximo análisis y para recomendar el uso de este marco de razonamiento de apoyo a futuros estudios.

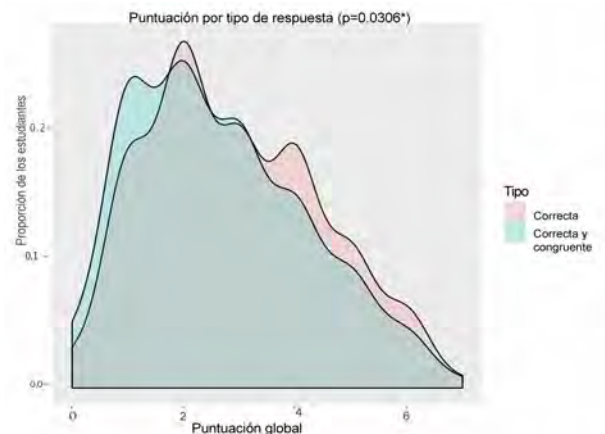


Figura 1. Distribución de la frecuencia de las respuestas correctas en comparación con las de C&C.

Las puntuaciones de C&C para cada pregunta (Figura 2) muestran que más del 60 % de los estudiantes consideran que el cambio climático significa lo mismo que el calentamiento global (Q1); el 85.5 % afirma que el cambio climático está científicamente demostrado (Q2); dos tercios de la muestra señalan el agujero de la capa de ozono como la principal causa del cambio climático (Q3); más de cuatro quintas partes de los estudiantes respondieron que los gases de efecto invernadero son contaminantes (Q4) y que el efecto invernadero es antropogénico (Q5); que los acontecimientos extremos puntuales son una prueba del cambio climático (Q6) y que un aumento de 4 °C de la temperatura media en superficie por encima de los niveles preindustriales no tendrá consecuencias graves (Q7). Sólo un 10 % de los alumnos respondió que el vapor de agua es un gas de efecto invernadero (Q8). Estos resultados coinciden con las conclusiones de investigaciones anteriores (Gautier et al., 2006; Jacobson et al., 2017; Karpudewan et al., 2015; Rebich y Gautier, 2005).

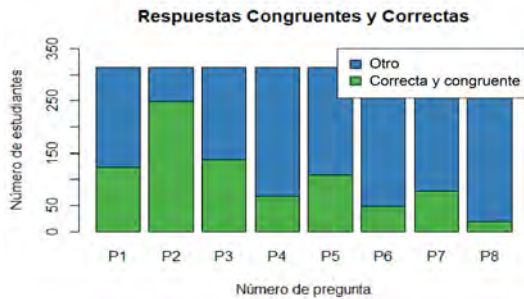


Figura 2. Respuestas C&C por pregunta

Siguiendo a otros autores (Viennot, 1978), podemos utilizar los patrones de error para construir un pequeño modelo explicativo de las respuestas más comunes de los alumnos, como sigue:

“Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero han hecho un agujero en la capa de ozono, lo que permite la entrada de más radiación y provoca un calentamiento global; estos gases o contaminantes son puramente causados por la actividad humana y excluyen de forma natural el vapor de agua; la temperatura puede aumentar unos 4 °C sin mayores consecuencias.”

El modelo anterior es muy simple (y erróneo) y explica gran parte de las respuestas erróneas de los alumnos. Sin embargo, no dice nada sobre las relaciones entre los conceptos erróneos o la importancia en la comprensión general del cambio climático. Para analizar la importancia relativa de conceptos erróneos específicos en la experiencia general sobre el cambio climático, generamos un bosque aleatorio que predijo la puntuación general de C&C basándose en subconjuntos aleatorios de respuestas individuales a los conceptos erróneos. Por definición, el bosque aleatorio podría predecir muy bien la C&C global, sin embargo, lo interesante es analizar las variables que resultaron más importantes en este ejercicio.

La Figura 3 muestra la profundidad mínima a la que se encuentra cada variable en cada uno de los 500 árboles de regresión del bosque. Los valores más bajos de la profundidad mínima significan que esas variables fueron óptimas para dividir los datos al principio del proceso de generación del árbol de regresión, por lo que nuestro análisis indica que las respuestas C&C a las preguntas 3 y 5 son de gran importancia para determinar la comprensión general de los conceptos del cambio climático. Estas preguntas reflejan las ideas erróneas: el cambio climático causado por el agujero de la capa de ozono y el efecto invernadero es causado por los seres humanos.

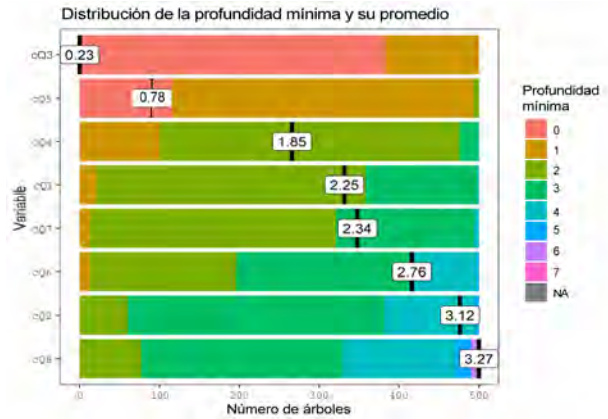


Figura 3. Distribución de la profundidad mínima para cada concepto erróneo. Las etiquetas “cQ” en el eje Y hacen referencia a "Pregunta contestada correctamente" (del inglés "correct Question").

Esta importancia relativa puede verse a través de la investigación realizada por Chi y Roscoe (2002), quienes sostienen que la solidez de las concepciones erróneas proviene de las categorizaciones ontológicas erróneas. Estos autores argumentan que los errores conceptuales pueden dividirse en dos: preconceptos y conceptos erróneos. Los conceptos erróneos resultan de la asignación de categorías ontológicas inapropiadas; por ejemplo, pensar que la corriente eléctrica es "una sustancia" implica una asignación diferente de su categoría ontológica correspondiente, que sería la de "un proceso" y, por tanto, es difícil de modificar. Las preconcepciones, en cambio, pertenecen a su categoría ontológica y, por tanto, son más fáciles de corregir. Siguiendo esta clasificación, los conceptos erróneos indican una falta de comprensión más profunda sobre el fenómeno en cuestión, y sólo pueden modificarse con lo que se conoce como cambio conceptual.

A partir de los resultados de este estudio, vemos que hay una categorización errónea asociada al agujero de la capa de ozono, que pertenece a una categoría ontológica diferente a la que le asignan los alumnos. El agujero de la capa de ozono y el cambio climático son dos categorías distintas que pertenecen a una categoría superior que podemos denominar "Cuestiones medioambientales", donde podemos encontrar categorías como el cambio climático, el agujero de la capa de ozono, la eliminación y acumulación de residuos, los plásticos de los océanos, y otras con los mismos niveles de complejidad. De todas las preguntas de nuestro cuestionario, el único

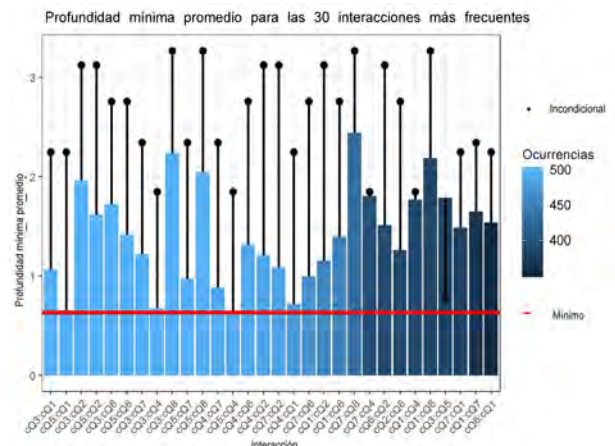


Figura 4. Interacciones importantes entre los conceptos erróneos

concepto erróneo es el Q3, que, junto con Q5, señala la presencia de otras ideas preconcebidas.

Además, realizamos un análisis de interacción que nos permite explorar los efectos condicionales de determinados conceptos erróneos en la comprensión general del cambio climático. La Figura 4 muestra la profundidad mínima media de las 30 interacciones más frecuentes entre conceptos erróneos. Dicha métrica refleja la importancia de preguntar un concepto erróneo específico una vez que se conoce la respuesta de uno anterior, siendo la interacción Q5:Q4 la más importante de entre ellas, lo que significa que, si se ha formulado la pregunta Q5, la mejor pregunta inmediata posible para predecir mejor la puntuación global de C&C sería la Q4.

Como se muestra en la Tabla 2, estas interacciones podrían reflejar la intercongruencia entre las respuestas a los conceptos erróneos. Dado que la pregunta Q4 y la pregunta Q5 se refieren a conceptos íntimamente relacionados (sobre el efecto invernadero y los gases de efecto invernadero), una respuesta intercongruente que tenga ambas respuestas correctas y congruentes podría reflejar un modelo conceptual global más congruente sobre el cambio climático y, por tanto, puntuaciones globales más altas. Notablemente, todas las profundidades mínimas medias incondicionales (la media de la profundidad mínima de cada pregunta sin estar condicionada a otra) están muy por encima de sus efectos de interacción, lo que significa que, por sí solas, esas preguntas no son tan importantes como la interacción con el concepto erróneo condicional. Una excepción es Q3:Q5, que resulta ser la interacción entre los dos conceptos erróneos más importantes, esto significa que la pregunta Q3 tiene más poder predictivo por sí misma que la aportación adicional de la pregunta Q5.

Tabla 2. Matriz de intercongruencia
GEI: gases de efecto invernadero

Matriz de intercongruencia	El efecto invernadero es causado por los humanos.	El efecto invernadero no es causado por los humanos.
Los GEI son contaminantes	Intercongruente pero equivocado	No intercongruente
No todos los GEI son contaminantes	No intercongruente	Intercongruente y correcto

Para la última parte del análisis, nos interesaba investigar hasta qué punto la puntuación global de C&C estaba relacionada con las características de los estudiantes y hasta qué punto podía determinar las percepciones de los estudiantes con respecto a la percepción del efecto del cambio climático. Para ello, empleamos estadísticas inferenciales sobre nuestros datos para identificar posibles relaciones causales.

En primer lugar, especificamos ecuaciones de regresión múltiple para hacer una regresión de la percepción personal del cambio climático sobre múltiples regresores como la puntuación de C&C, el género (hombre o mujer), el área de estudio (ingeniería, diseño/arquitectura, sociología/economía), las unidades completadas (número de créditos) y la percepción del clima global como normal (clima global normal), utilizando modelos lineales simples y modelos lineales generalizados con distribuciones binomiales, dado que el regresor es una variable binaria. Hicimos una búsqueda sistemática de diferentes ecuaciones y variables; utilizando el criterio de información de Akaike (que utiliza una función de Poisson) encontramos el modelo

con la mayor calidad relativa que se muestra en la Tabla 3 (Modelo 1).

Además, hicimos modelos de regresión de la puntuación de C&C utilizando el mismo enfoque sistemático que en las regresiones anteriores. Sin embargo, esta vez incluimos la posibilidad de utilizar un modelo lineal generalizado con una función de Poisson, dada la forma distinta de la distribución de C&C (véase la Figura 1). Un criterio de información de Akaike arrojó el mejor modelo de regresión relativo, que se muestra en la Tabla 3 (Modelo 2).

Tabla 3. Modelos de mayor calidad relativa indicados a través del criterio de información de Akaike. *Nivel de significancia $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$

Modelo 1		Modelo 2	
Variable independiente	Variable dependiente: ¿Has experimentado personalmente el cambio climático? (1=Sí, 0=No)	Variable independiente	Variable dependiente: C&C
Clima global normal	-0.078* (0.042)	Clima global normal	-0.177* (0.097)
Log(créditos)	-0.054*** (0.021)	Créditos	-0.106* (0.056)
Género	-0.083*** (0.032)	Ingeniería	0.194*** (0.089)
Constante ec. de regresión	1.238*** (0.108)	Diseño y arquitectura	0.276*** (0.094)
		Constante para sociología/economía	1.367*** (0.279)
Observaciones	315	Observaciones	315
R ²	0.047	Probabilidad lógica	-565.682
R ² ajustada	0.038	Akaike Inf. Crit.	1,141.364
Error estándar residual	0,280 (df=311)		
Estadística F	5,131*** (f=3;311)		

El Modelo 1 nos dice que la percepción de las condiciones climáticas normales afecta negativamente a la percepción de que los estudiantes han experimentado personalmente el cambio climático, lo que significa que los que perciben que el clima global ha sido anormal también lo perciben a nivel personal. Además, encontramos que cuantos más créditos hayan cursado en la universidad, menos perciben los cambios climáticos a nivel personal. Por último, las personas que no se identifican como mujeres tienden a tener una menor percepción del cambio climático a nivel personal. Cabe destacar que la puntuación de los estudiantes en C&C y el área de estudio no mostraron ninguna relación estadísticamente significativa con la percepción personal del cambio climático, lo que significa que las ideas erróneas no determinan la concientización, como también se ha demostrado en estudios anteriores.

En el caso del Modelo 2, los resultados nos indican que los estudiantes que no perciben un cambio en el clima global y los que han cursado más créditos en la universidad tenderán a tener puntuaciones

más bajas en C&C. Además, los estudiantes de ingeniería tienen menos conceptos erróneos sobre el clima que los de ciencias sociales, mientras que los arquitectos y diseñadores tienen menos conceptos erróneos que los estudiantes de ingeniería. La mejor comprensión de los estudiantes de arquitectura y diseño podría explicarse debido a que su trabajo se relaciona mucho más con el medio ambiente, algo que no se ve tan claramente en las demás profesiones. Se destaca que la percepción de la experiencia personal sobre el cambio climático no guardó ninguna relación estadísticamente significativa con la puntuación de C&C. Asimismo, el género no guardó una relación estadísticamente significativa con la puntuación de C&C.

CONCLUSIONES

Esta investigación ha mostrado que los conceptos erróneos sobre el cambio climático previamente estudiados en la literatura están presentes en los estudiantes universitarios mexicanos. Además, hemos analizado la importancia relativa de dichos conceptos erróneos a través de un marco de congruencia e intercongruencia entre ellos, arrojando luz sobre la relevancia de los argumentos de apoyo a los conceptos erróneos y una metaestructura congruente del modelo conceptual. Como se ha mencionado anteriormente, se ha identificado que la concepción errónea más importante es la que representa diferencias a nivel ontológico con respecto al concepto correcto, podemos decir que un alumno que no presente estos dos errores conceptuales (agujero de la capa de ozono y efecto invernadero) será muy probablemente capaz de manejar información interrelacionada, lo que requiere una buena comprensión de los conceptos y sistemas implicados.

Las preguntas relativamente poco importantes (Q1, Q2, Q4, Q6 y Q7) no difieren a nivel ontológico del concepto científico y no aseguran que haya un malentendido de otros conocimientos. Estos resultados muestran que, en este aparente mar desordenado de preconcepciones y conceptos erróneos, hay dos que son fundamentales y que indican el estado de comprensión de los conceptos básicos del cambio climático en una población.

No existen cursos generales obligatorios ni otras acciones en la mayoría de las universidades, para que el conocimiento sobre el cambio climático mejore con el tiempo, lo que nos da una primera aproximación al nivel de conocimiento de los actuales responsables políticos que toman decisiones sobre políticas de inversión pública que afectan a todo un país. Por último, determinar las ideas erróneas más fuertes y las relaciones entre ellas ayudará a clarificar los objetivos de los cursos generales sobre el cambio climático, para hacer un mejor uso de los recursos, especialmente en los dirigidos a los estudiantes universitarios y de educación secundaria donde posiblemente se están empezando a formar estas ideas erróneas sobre el cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a los docentes de las Divisiones de Ciencias Sociales y Humanidades, de Ciencias y Artes para el Diseño, y de Ciencias Básicas e Ingeniería, que permitieron la aplicación de los 315 cuestionarios con los que se realizó este trabajo.

REFERENCIAS

- Bastien Montoya, G. M., Bastien-Olvera, B. A. y Gay-García, C. (2018). Percepción del cambio climático en alumnos universitarios. En *Compendio de Ciencia Aplicada*, 431-438. Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México.
- Bord, R. J., O'Connor, R. E. y Fisher, A. (2000). ¿En qué sentido necesita el público entender el cambio climático global? *Public Understanding of Science* 9, 205-218. <https://doi.org/10.1088/0963-6625/9/3/301>.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning* 45, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Breiman, L. (2002). *Manual On Setting Up, Using, And Understanding Random Forests V3.1*. Tech. Rep., Departamento de Estadística, Universidad de California Berkeley, Estados Unidos de América. URL
- Chang, C.-H. y Pascua, L. (2016). Singapore students' misconceptions of climate change. *Investigación internacional en educación geográfica y ambiental* 25, 84-96. URL <https://doi.org/10.1080/10382046.2015.1106206>.
- Chi, M. T. H. y Roscoe, R. D. (2002). The Processes and Challenges of Conceptual Change. En Limon, M. y Mason, L. (eds.) *Reconsidering Conceptual Change: Issues in Theory and Practice*, 3-27. Springer Netherlands, Dordrecht. URL <https://doi.org/10.1007/0-306-47637-1>.
- De La Chaussée-Acuña, M. E. y Chazari-De La Chaussée, R. (2017). Las causas del cambio climático desde la perspectiva de estudiantes universitarios. En Calixto Flores, R. (ed.) *Investigaciones educativas en torno al cambio climático*, Horizontes Educativos. Universidad Pedagógica Nacional, Ciudad de México.
- Dutt, V. y González, C. (2012). Las decisiones por experiencia reducen las ideas erróneas sobre el cambio climático. *Journal of Environmental Psychology* 32, 19-29.
- Ferrari, M. y Chi, M. T. H. (1998). La naturaleza de las explicaciones ingenuas de la selección natural. *International Journal of Science Education* 20, 1231-1256. <https://doi.org/10.1080/0950069980201005>.
- Gareth, J., Daniela, W., Trevor, H., y Robert, T. (2013). *An introduction to statistical learning: With applications in R*. Springer.
- Gautier, C., Deutsch, K. y Rebich, S. (2006). Misconceptions About the Greenhouse Effect. *Journal of Geoscience Education* 54, 386-395. <https://doi.org/10.5408/1089-9995-54.3.386>.
- Jacobson, M. J., Markauskaite, L., Portolese, A., Kapur, M., Lai, P. K., y Roberts, G. (2017). Designs for learning about climate change as a complex system. *Learning and Instruction*, 52, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.03.007>
- Karpudewan, M., Roth, W.-M. y Chandrakesan, K. (2015). Remediating misconception on climate change among secondary school students in Malaysia. *Environmental Education Research* 21, 631-648.
- Ramírez Vazquez, Y., y González Gaudiano, E. J. (2016). Representaciones sociales del cambio climático en estudiantes de dos universidades veracruzanas. CPU-e. *Revista de Investigación Educativa* 0-0.
- Rebich, S. y Gautier, C. (2005). Concept Mapping to Reveal Prior Knowledge and Conceptual Change in a Mock Summit Course on Global Climate Change. *Journal of Geoscience Education* 53, 355-365.
- Shepardson, D. P., Choi, S., Niyogi, D. y Charusombat, U. (2011). Seventh grade' mental models of the greenhouse effect. *Environmental Education Research* 17, 1-17. URL <https://doi.org/10.1080/13504620903564549>.
- Spellman, G., Field, K. y Sinclair, J. (2003). An Investigation into UK Higher Education Students' Knowledge of Global Climatic Change. *International Research in Geographical and Environmental Education* 12, 6-17. <https://doi.org/10.1080/10382040308667509>.
- Spence, A., Poortinga, W., Butler, C. y Pidgeon, N. F. (2011). Percepciones del cambio climático y disposición a ahorrar energía relacionadas con la experiencia de las inundaciones. *Nature Climate Change* 1, 46-49.
- Viennot, L. (1978). *Le raisonnement spontane en dynamique élémentaire*. Hermann, París.

Manuscrito recibido: 1 de septiembre de 2022

Manuscrito corregido-recibido: 27 de octubre de 2022

Manuscrito aceptado: 23 de noviembre de 2022

USO DEL VIDEOQUIZ COMO ESTRATEGIA DIDÁCTICA PARA EL APRENDIZAJE DE ALUMNOS DE PREPARATORIA

Viridiana Yazmin Jiménez Zuñiga

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

yazvira8163@gmail.com

RESUMEN

La incorporación del manejo de las herramientas digitales en el ámbito educativo, y el fácil acceso a ellas por parte de los alumnos, brinda la oportunidad de generar nuevas formas de aprendizaje. Por ello, se tiene como propósito usar el *videoquiz* como estrategia didáctica de aprendizaje. Metodológicamente, se diseñó una secuencia didáctica en donde se emplean las herramientas digitales de *Educaplay*, *Nearpod* y *Blooket*. La implementación se llevó a cabo en el Colegio Queen Mary School con el grupo 6031 de Preparatoria. Como productos finales se generaron nuevos recursos educativos (*videoquizzes*) los cuales se recomiendan ser empleados desde primaria alta hasta preparatoria.

Se puede concluir que el diseño de un *videoquiz* es funcional como estrategia de aprendizaje, permite a los alumnos poner en práctica la autorregulación del aprendizaje, así como la autoevaluación.

Palabras clave: Autogestión, elementos químicos, estrategia didáctica, herramientas digitales, recurso educativo, *videoquiz*.

ABSTRACT

The incorporation of the management of digital tools in the educational field, and the easy access to them by students, provides the opportunity to generate new forms of learning. Therefore, the purpose is to use the videoquiz as a didactic learning strategy. Methodologically, a didactic sequence was designed where the digital tools of Educaplay, Nearpod, and Blooket were used. The implementation was carried out at the Queen Mary School with the 6031 high school group. As final products, new educational resources (videoquizzes) were generated, which are recommended to be used from high school to high school. It can be concluded that the design of a videoquiz is functional as a learning strategy, it allows students to put into practice self-regulation of their own learning, as well as self-assessment.

Keywords: Self-management, chemical elements, didactic strategy, digital tools, educational resource, *videoquiz*.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se emplea al *videoquiz* como estrategia de aprendizaje para fomentar el desarrollo de la autogestión del conocimiento y de la autoevaluación en alumnos de bachillerato.

Se trabajó en el Colegio *Queen Mary School* que cuenta con un modelo educativo constructivista, centrada en el alumno, dando pie a la incorporación de la tecnología que permita dejar de lado la enseñanza tradicional; encaminando el desarrollo de habilidades cognitivas y metacognitivas, así como digitales para generar un aprendizaje significativo.

Para determinar los beneficios de la estrategia se empleó un cuestionario, que se utilizó en dos momentos: el primero fue previo al diseño del *videoquiz* y en un segundo momento, después de la generación del *videoquiz*. La herramienta digital que se empleó para los cuestionarios fue: *Blooket*, la cual presenta los cuestionamientos en forma de juegos, lo que elimina el estrés de una evaluación tradicional.

Al analizar los resultados obtenidos se pudo determinar que el *videoquiz* potencializa la autogestión del conocimiento, así como el desarrollo de habilidades metacognitivas.

Las herramientas digitales facilitan la elaboración de estrategias didácticas que permiten el enriquecimiento educativo para los alumnos. Se tiene de ejemplo al *videoquiz*, el cual es una actividad interactiva con información que se presenta dentro de un video, la interacción se da cuando el alumnado responde a una serie de cuestionamientos a lo largo del video. Permitiendo que el estudiante sitúe su atención al contenido y que ponga a “prueba” lo que está comprendiendo.

De acuerdo a lo anterior, el uso del *videoquiz* como estrategia de aprendizaje es apropiada para demostrar el nuevo conocimiento adquirido, fomentar el desarrollo de habilidades cognitivas, metacognitivas como digitales y, también permite la generación de un nuevo recurso educativo. También es muy importante mencionar que el *videoquiz* que se emplee en cualquier asignatura y nivel educativo, puede ya estar creado o puede ser diseñado.

En este trabajo, se busca generar un recurso educativo (*videoquiz*) diseñado por el alumnado. Para el desarrollo del *videoquiz* se utilizan las herramientas digitales: *Educaplay* y *Nearpod*, sin embargo, se puede emplear alguna otra.

METODOLOGÍA

El Colegio *Queen Mary School* es una institución privada, ubicada en la Ciudad de México, que oferta educación desde nivel preescolar hasta nivel preparatoria, esta última incorporada al sistema educativo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El grupo con el que se trabajó el diseño del *videoquiz* fue el 6031 de preparatoria, en la asignatura de Geografía Económica con un total de 9 alumnos, que tienen en promedio 17 años, durante el primer periodo de evaluación del ciclo escolar 2022-2023 (Figura 1). El diseño de la secuencia didáctica plantea cuatro fases: a) fase de iniciación, b) fase de información, c) fase de aplicación y, d) fase de conclusión.

a) **Fase de iniciación.** Busca concientizar a los alumnos con respecto a sus conocimientos previos sobre el tema: Elementos químicos en la naturaleza. Para ello, se presentó al grupo una evaluación diagnóstica de 10 reactivos empleando la herramienta digital: Blooket en su variante de: el cofre del tesoro. La evaluación se realiza a través de respuestas correctas (aciertos) e incorrectas (Tabla 1).



Figura 1. Alumnos realizando la evaluación diagnóstica.

Tabla 1. Resultados obtenidos en la evaluación diagnóstica.

Alumnos	Porcentaje de aciertos
Scarlett	85 %
Aldo	77 %
Facundo	74 %
Chang	68 %
Jinah	67 %
Javier	66 %
Rodrigo	65 %
Carlos	58 %
Paula	55 %

b) **Fase de información.** Se presenta la forma de procesamiento de la información, planteando a los alumnos un “reto” cognitivo como el diseño de un *videoquiz*. También, se comparte con los alumnos el recurso audiovisual: Abundancia de los elementos químicos en la naturaleza:

<https://youtu.be/tttRs9DkZxs>.

Con el cual diseñará cada alumno un recurso educativo (*videoquiz*).

c) **Fase de aplicación.** El grupo pone en práctica la metacognición para evaluar lo aprendido.

En este caso, los alumnos no requieren conocimientos sobre programación ni edición, debido a que la herramienta digital Educaplay brinda un pequeño manual en forma de tutorial para crear un *videoquiz* (recurso interactivo). En el caso de *Nearpod*, presenta de una manera “autodidáctica” la creación de un video interactivo.

Se comparte con el grupo dos videos que indican cómo crear una cuenta de usuario, como son las etapas del desarrollo y, la publicación del recurso interactivo para cada herramienta digital.

Educaplay. <https://www.youtube.com/watch?v=V4gED0IFW9k>

Nearpod. https://www.youtube.com/watch?v=4vhik7nYeZ8&ab_channel=MozartGarc%C3%ADa

d) **Fase de conclusión.** Se evalúa el nuevo aprendizaje adquirido, para lo cual se aplicó el mismo cuestionario que al principio; con la misma herramienta digital; pero con la variante: carreras. La elección del cambio es con un el único fin de variar la presentación del cuestionario, no altera el contenido de la valoración. La evaluación final se realiza a través de respuestas correctas e incorrectas (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados obtenidos en la evaluación final.

Alumnos	Porcentaje de aciertos
Scarlett	100 %
Javier	100 %
Aldo	89 %
Rodrigo	88 %
Carlos	83 %
Facundo	78 %
Paula	71 %
Jinah	57 %
Chang	50 %

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 3. Porcentaje promedio de respuestas correctas de la evaluación diagnóstica y final.

Alumnos	Evaluación diagnóstica	Evaluación final
Scarlett	85 %	100 %
Aldo	77 %	89 %
Facundo	74 %	78 %
Chang	68 %	50 %
Jinah	67 %	57 %
Javier	66 %	100 %
Rodrigo	65 %	88 %
Carlos	58 %	83 %
Paula	55 %	71 %
Porcentaje Promedio	68.33 %	79.56 %

En la Figura 2 se muestra el porcentaje de aciertos de ambas evaluaciones del grupo 6031 de preparatoria.

El porcentaje promedio de respuestas correctas en la evaluación diagnóstica fue del 68.33 %. Se puede observar que la alumna Scarlett obtuvo el mayor porcentaje de respuestas correctas y, que la alumna Paula obtuvo el menor porcentaje de aciertos.

En el caso de la evaluación final el porcentaje promedio de aciertos fue del 79.56 %, observando un aumento en el porcentaje de respuestas correctas entre una evaluación y otra. Se puede observar que nuevamente la alumna Scarlett obtuvo el mayor porcentaje de aciertos, junto con el alumno Javier, obteniendo ambos el 100 %, el menor porcentaje de respuestas correctas fue para Chang con un 50 %.

A continuación, se presentan 3 ejemplos de los recursos educativos terminados:

https://es.educaplay.com/juego/13026558-elementos_quimicos.html?sessid=58ofmrgapjj4dl1ns4k6vsojmh
<https://app.nearpod.com/presentation?pin=DNRGZ>
<https://app.nearpod.com/presentation?pin=BQMUC>

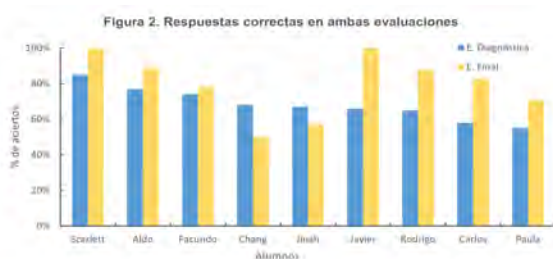


Figura 2. Porcentaje de aciertos de los alumnos en ambas evaluaciones.

CONCLUSIONES

De acuerdo con mi experiencia docente y a los resultados obtenidos, se propone incluir al *videoquiz* como un recurso educativo en toda asignatura y en los distintos niveles educativos.

En función del objetivo de aprendizaje, el *videoquiz* será empleado como un recurso educativo o como un producto final y, de acuerdo al momento de instrucción podrá ser usado como un instrumento de evaluación diagnóstica, formativa o final (sumativa).

Por supuesto, es importante resaltar que la implementación del uso del *videoquiz* como estrategia didáctica no es infalible; se debe de tener muy claro los objetivos y los recursos necesarios para alcanzar las metas propuestas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar, al Diplomado en Enseñanza de Ciencias de la Tierra del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme los conocimientos teóricos, así como las diferentes metodologías para fortalecer, diversificar y potencializar el aprendizaje dentro de mi práctica docente. En particular, agradezco a la Dra. Susana Alaniz por siempre motivar e incentivar la mejora del ejercicio docente.

También, agradezco a las revisoras M. en C. Ana Cecilia Lopera Gasca y a la M. en C. Raiza Pilatowsky Gruner por los comentarios y sugerencias que permitieron enriquecer en gran medida este trabajo. Así mismo al M. en C. Rodrigo Gutiérrez Navarro.

Agradezco, al Colegio *Queen Mary School*, institución sede donde se llevó a cabo la estrategia de aprendizaje y, a mis estimados alumnos: Scarlett, Jinah, Paula, Aldo, Javier, Rodrigo, Facundo, Carlos, Chang de quienes aprendo día a día.

REFERENCIAS

- Díaz-Barriga, F. (2021) "TIC y competencias docentes del siglo XXI". En Carneiro, R. Toscano, J. C. y Díaz, T. (Coords). Los desafíos de las TIC para el cambio educativo. España: OEI/Fundación Santillana (Metas Educativas). 139-154.
- Educaplay TV. (19 de marzo de 2019). Cómo crear un videoquiz en Educaplay. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=V4gED0IFW9k>
- García, M. (7 de agosto 2020). Crea actividades de video interactivo con Nearpod (Nueva característica 2020). [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=4vhik7nYeZ8&ab_channel=MozartGarc%C3%ADa
- López, P. V. M. (2022). Secuencia didáctica para la enseñanza de los temas de reacción química y energía química con herramientas digitales para la educación media superior. Tesis MADEMS Química. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Moreno, T. (2016). Evolución del aprendizaje y para el aprendizaje. Reinventar la evaluación en el aula. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Mundo Geológico. (29 de octubre del 2020). Abundancia de los elementos químicos en la naturaleza. [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=ttrRs9DkZxs&feature=youtu.be&ab_channel=MundoGeol%C3%B3gico
- Velasco, G. A. M., et al. (2018). "Los videos educativos como herramienta disruptiva para apoyar el proceso de aprendizaje de algoritmos de resta y multiplicación en estudiantes de segundo grado de primaria". Revista Educación, 42(2), 149–169. <https://doi.org/10.15517/revedu.v42i2.24236>

Manuscrito recibido: 1 de octubre de 2022

Manuscrito corregido recibido: 19 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 1 de diciembre de 2022

VIDEOQUIZ “LA EDAD DE LA TIERRA”: RECURSO DIDÁCTICO PARA ENTENDER EL AVANCE DE LA CIENCIA EN EL TIEMPO

Susana A. Alaniz-Álvarez^{1*}, Ángel F. Nieto-Samaniego¹, F. Hernández-Díaz¹, Viridiana Y. Jiménez-Zuñiga²

¹Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Blvd Juriquilla 3000, Querétaro, 76230, México.*alaniz@geociencias.unam.mx

²Colegio Queen Mary School, Sección Preparatoria; Río Balsas 12, Alcaldía Cuauhtémoc, 06500 Ciudad de México, México.

RESUMEN

Cuál es la edad de la Tierra ha sido una pregunta que se han hecho desde religiosos hasta científicos. Hemos tardado más de 500 años en alcanzar una edad absoluta fuera de duda. Se presenta aquí un video donde se explican seis de las hipótesis que se han planteado para tratar de calcularla, señalando los argumentos de partida y las evidencias que las han desechado. En el video se muestran experimentos para explicar los conceptos científicos en que se apoyan las distintas hipótesis. Estos conceptos que surgieron a lo largo del tiempo en distintas disciplinas científicas han permitido buscar respuestas a preguntas como la edad de la Tierra. Se presenta así el video completo, con duración de 30 minutos, listo para proyectarse en el salón; también se presentan los vínculos a seis *videoquizzes*, uno por hipótesis, donde se incorporan preguntas antes del video para atraer la atención de los estudiantes a los puntos principales y se les solicita contestarlas después de haber visto el video. También se reporta aquí el resultado de un cuestionario contestado por más de 500 estudiantes de escuelas de nivel secundaria del centro de México. Se concluye que el video puede funcionar como estrategia de enseñanza de cómo evoluciona el conocimiento científico, usando una pregunta que se ha tratado de contestar por más de quinientos años desde distintas disciplinas científicas.

Palabras clave: Radiactividad, edad de la Tierra, extinción de especies, transporte de calor, erosión y sedimentación.

ABSTRACT

The age of the Earth has been a recurrent question throughout history, from religious people to scientists. More than 500 hundred years have passed until scientists reached an absolute age of Earth without a doubt. Here we present a 30' video where six of the hypotheses that have been postulated are explained, trying to answer that important question, mentioning the assumptions and the arguments against each hypothesis. Also, in the video experiments are shown to explain the scientific concepts based on those hypotheses. These concepts have

been formed over time in many scientific disciplines: Geology, Biology, Physics, and Chemistry. The complete video is presented here, with a duration of 30 minutes, ready to be projected in the classroom. The links to six videoquizzes are also presented, one per hypothesis, where questions are incorporated before the video to attract the attention of the students to the main points; and they are asked to answer them after having seen the video. The results of a questionnaire answered by more than 500 students from secondary schools in central Mexico are also reported here. It is concluded that this video can function as a teaching strategy on how scientific knowledge evolves, using a question that has been tried to be answered for more than five hundred years from different scientific disciplines.

Keywords: Radioactivity, age of Earth, species extinction, heat transport, erosion-sedimentation.

INTRODUCCIÓN

Durante el 2020 y 2021, en México y en varias partes del mundo, se suspendieron las clases presenciales y la enseñanza se hizo a distancia. Durante este tiempo, numerosos recursos didácticos florecieron, en especial las plataformas educativas; además, escuelas y universidades ofrecieron clases en video. Paralelamente, los videos en Youtube permitieron la divulgación científica. Aquí se propone un video acompañado de un *quiz* (prueba rápida) en el que se unen las dos estrategias para generar un *videoquiz*. En el video de ficción “La edad de la Tierra”, con duración de 30 minutos, tres estudiantes en un campus universitario discuten los pros y contras de las distintas hipótesis que se han planteado para tratar de conocer la edad de la Tierra. Estas hipótesis se sitúan en el tiempo en que fueron propuestas usando conceptos de Biología (extinción de las especies), Geología (eras geológicas, erosión y sedimentación), Química (transmisión del calor, cristalización, disolución, mezclas y radiactividad) y Física (aceleración de la gravedad, cálculos de volúmenes), de vanguardia en ese entonces. Además, se presentan

los resultados de un cuestionario sobre el video proyectado en aulas, que fue contestado en papel por cerca de 500 estudiantes de secundaria. Se discute la comparación de respuestas de estudiantes a preguntas técnicas con las preguntas de relleno y entre las respuestas de estudiantes de los tres tipos de secundaria que hay en México (Generales, Técnicas y Telesecundarias).

ANTECEDENTES

Con motivo del Año Internacional del Planeta Tierra (2008) se publicaron en el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ocho fascículos de experimentos científicos que pueden ser consultados en la página web:

<https://tellus.geociencias.unam.mx/index.php/serie/>

Para el video presentado aquí se utilizó como base el fascículo “La edad de la Tierra” (Nieto-Samaniego y Alaniz-Álvarez, 2013), séptimo título de la colección. Este libro se escribió para conmemorar el centenario del libro homónimo de Arthur Holmes (Holmes, 1913).

En ambas publicaciones se describen las diversas hipótesis que se han planteado para conocer la edad de la Tierra, desde la basada en la Biblia (propuesta por James Ussher, 1581-1656), pasando por las que se basan en la acumulación de sedimentos (Leonardo Da Vinci 1452-1519), la extinción de las especies (Charles Lyell 1797-1875-Charles Darwin 1809-1882), la salinidad del mar (John Joly 1857-1933, el agua del mar originalmente estaba sin sales, erosión) y el enfriamiento de la Tierra (Lord Kelvin 1824-1907, la Tierra originalmente estaba incandescente), terminando con la propuesta basada en fechamientos isotópicos (Ernest Rutherford, 1871-1937, con elementos radiactivos a tasas de desintegración constantes) y la edad obtenida con el meteorito Allende en 1969 (Fireman *et al.*, 1970; Allegre *et al.*, 1995). Estas hipótesis son una simplificación de importantes discusiones con las aportaciones científicas de su época (Holmes, 1913).

Como parte de las celebraciones del centenario del libro “La edad de la Tierra” de Arthur Holmes (Holmes, 1913), el fascículo “La edad de la Tierra” (Nieto-Samaniego y Alaniz-Álvarez, 2013) sirvió como base de un video financiado por la Academia Mexicana de Ciencias, la Coordinación de la Investigación Científica y la Dirección General de Apoyo a la Docencia, las dos últimas de la UNAM. Este video fue subido al canal de Youtube del Centro de Geociencias:

<https://youtu.be/PuqClnfWjyg>

EL VIDEO USADO COMO RECURSO DIDÁCTICO EN SECUNDARIAS

La educación secundaria en México representa el tercer nivel de la Educación Básica. Consta de tres modalidades: General, Técnica y Telesecundaria, que en esencia tienen el mismo programa de materias (SEP, 2017). En la General y Técnica, cada grupo tiene varios profesores, uno por materia, mientras que en la Telesecundaria hay sólo uno o dos profesores por grupo. La Secundaria Técnica se distingue por ofrecer talleres; dependiendo de la zona pueden ser del área agropecuaria, industrial o de servicios administrativos de apoyo para la producción. En la modalidad técnica se ofrecen

una gama de 21 actividades tecnológicas y su carga de trabajo es de entre 8 y 12 horas diarias. Por otro lado, en la Telesecundaria las clases se imparten, casi exclusivamente, a través de medios electrónicos (televisión, señal satelital, videos).

Durante el cese de clases presenciales por la pandemia, la Secretaría de Educación Pública (SEP) se basó en el modelo de las telesecundarias para implementar el modelo educativo virtual.

El video “La edad de la Tierra” se proyectó en junio de 2019, unos meses antes del cierre escolar por la pandemia, en los tres tipos de secundaria. Con los resultados de los cuestionarios por los estudiantes, contestados el mismo día y una semana después, de los tres tipos de secundarias, podremos comparar si el uso de videos en horas de clase funciona igual para todos.

METODOLOGÍA

Para utilizarlo como recurso educativo, en una primera etapa, este video se dividió en seis cápsulas y se proyectó durante el horario de clases en escuelas de nivel secundaria, previa autorización del director de cada escuela. Se solicitó a cada estudiante que contestara un cuestionario en papel que fue leído previo a proyectar cada cápsula y contestado por los estudiantes al término de su proyección.

Para una segunda etapa, y para formalizarlo como recurso educativo virtual, se hizo a manera de *videoquiz* con la herramienta digital *Genially*. De acuerdo con el diseño de la primera etapa, las preguntas correspondientes a cada hipótesis aparecen al inicio de cada cápsula y los estudiantes la contestan en el programa al final de la proyección de cada una. Las preguntas del *quiz* se obtuvieron y fueron avaladas por el ejercicio que se describirá posteriormente. Así, la clase virtual consiste en seis *videoquizzes*, donde el docente del grupo puede intervenir y comentar entre las cápsulas los distintos conceptos que se explican y que pueden estar relacionados con los temas ofrecidos en su grado escolar. Se hizo de esta manera ya que se ha documentado que los videos actúan como una forma pasiva de aprendizaje, pero al combinarlo con un *quiz* el estudiante vincula la información con su autoevaluación del aprendizaje (Jimenez-Zúñiga, 2022).

Se reportan aquí únicamente los resultados de la primera etapa. El video “La edad de la Tierra” fue proyectado en salones de 1.º, 2.º y 3.º grado de secundaria de los estados de Querétaro y Guanajuato, México. A cada estudiante se le entregó al inicio de la clase una hoja con un cuestionario dividido en 6 partes (*Anexo 1*), cada parte con 6 o 7 preguntas. El video se proyectó dividido en seis cápsulas, una por hipótesis. Antes de cada cápsula el instructor leyó las preguntas correspondientes. Después de ver la cápsula los estudiantes contestaron el cuestionario. Para presionar a que pusieran atención, se les advirtió que al final sus compañeros calificarían sus cuestionarios.

El cuestionario fue puesto primero como prueba piloto en varios grupos de educación secundaria, ajustando las preguntas y opciones de respuesta hasta que se logró que el análisis de fiabilidad diera un valor Alpha de Cronbach de 0.841 considerando el total de 41 ítems (*Anexo 1*). Este valor permite afirmar que el cuestionario tiene consistencia interna y puede predecir su repetibilidad. El cuestionario corregido fue el utilizado en los grupos que se menciona adelante.

Muestra

Para el estudio que se presenta aquí participaron 584 estudiantes de cinco escuelas secundarias: dos de Telesecundaria (137 estudiantes),

dos de Secundarias Generales (344 estudiantes), y de una Secundaria Técnica (103 estudiantes); 270 estudiantes son de primer grado, 199 de segundo y 115 de tercer grado.

Comparación de medias

Los cuestionarios se calificaron inmediatamente después de ver las seis cápsulas del video (A) y después de entre cuatro a diez días de haberlo proyectado en clase (D). Se calculó el promedio que se obtuvo en cada tipo de secundaria y se separaron las preguntas de relleno (col) de las técnicas (tec).

En la Tabla 1 se presenta el porcentaje de respuestas correctas de las 3 modalidades educativas. En las preguntas de relleno del día de la proyección del video (AcolProm), se ve que en todas se obtiene más del 80 % de aprobación, destacando la Telesecundaria como se esperaba. En los resultados obtenidos días después de ver el video (DcolProm), se ve una disminución en el porcentaje de aprobación, manteniéndose con mayor porcentaje los obtenidos en la Telesecundaria (Figura 1).

Para las preguntas técnicas del día de la proyección del video (AtecProm), se obtiene en la Secundaria Técnica más del 60 % de aprobación, mientras que en la Secundaria General y la Telesecundaria se obtiene más del 70 % de aprobación, destacando como se esperaba la Telesecundaria con un 4.5 % más. Con los resultados de porcentaje obtenidos días después de ver el video, se puede ver un cambio: la Secundaria General obtuvo el mayor porcentaje, seguida de la Telesecundaria y con el menor porcentaje la Secundaria Técnica (Figura 2).

El promedio más bajo en todas las categorías lo obtuvieron los estudiantes de la Secundaria Técnica, tanto en el día de la proyección como días después de ver el video.

	Sec. General	Sec. Técnica	Telesecundaria
AcolProm	86.3 %	82.7 %	88.6 %
AtecProm	70.8 %	66.4 %	75.3 %
DcolProm	72 %	66.7 %	79.1 %
DtecProm	65 %	55.3 %	63.5 %
Días después de ver el video	4 y 5 días	6 días	7 y 10 días

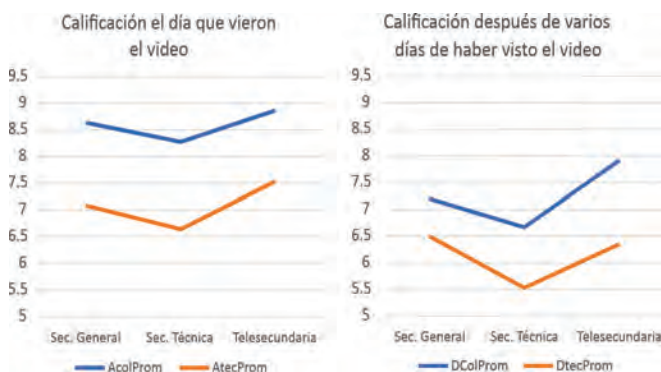


Figura 1. Calificación de dos tipos de preguntas (con base en el porcentaje de respuestas correctas) de las preguntas técnicas (tec) y las de relleno (col), durante el día de proyección del video (A) y después de varios días (entre 4 y 10) de haber visto el video.

Análisis estadístico ANOVA

Para evaluar si las diferencias son significativas entre los tres tipos de secundaria se utilizó ANOVA de una vía. Se eligió el grupo de datos de las respuestas de preguntas técnicas varios días después de haber visto el video, porque es el único grupo que cumple con los criterios de normalidad.

El análisis ANOVA mostró que los estudiantes de la Secundaria Técnica tienen menor retención del contenido técnico que los de la Secundaria General y los de Telesecundaria. Se identificó el efecto del tipo de secundaria sobre la calificación del cuestionario con una $F_{2, 466} = 8.034$, $p < .001$. Los análisis post hoc, con base en Bonferroni mostraron que los estudiantes de las Secundarias Técnicas tuvieron calificaciones significativamente más bajas que los de las Secundarias Generales ($p > .001$) con un intervalo de confianza de 95 % [38, 1.542], y más bajas también que los estudiantes de las Telesecundarias ($p < .01$) con un intervalo de confianza de 95 % [0.1503, 1.4972].

La prueba de normalidad se hizo con el método Z de Kolmogorov-Smirnov y la homogeneidad de las varianzas se probó con el estadístico de Levene, dando un valor de .510 y $p = .601$, apoyando la hipótesis nula. Esto quiere decir que las únicas diferencias significativas son de la Secundaria Técnica con la Secundaria General y con la Telesecundaria.

VIDEOQUIZ

A partir de esta experiencia se procedió a llevar este recurso a una segunda etapa, separar en seis cápsulas e incorporar las preguntas a cada una. Así se generaron los siguientes seis *videoquizzes*, cada uno con una de las seis hipótesis sobre el cálculo de la edad de la Tierra discutidas en el video. Se diseñaron con la herramienta digital de *Genially* para que puedan ser compartidos y ser aplicados como estrategia de enseñanza-aprendizaje dentro de las aulas de educación de primaria alta (4.°, 5.° y 6.° grado), de educación secundaria, así como de la educación de nivel medio superior.

Hipótesis 1. La edad de la Tierra se puede obtener con los descendientes de Adán.

Hipótesis 2. La edad de la Tierra se puede obtener del registro fósil.

Hipótesis 3. La edad de la Tierra se puede obtener con la salinidad del mar.

Hipótesis 4. La edad de la Tierra se puede obtener con el registro geológico.

Hipótesis 5. La edad de la Tierra se puede obtener calculando el enfriamiento de la Tierra.

Hipótesis 6. La edad de la Tierra se puede obtener con la desintegración radiactiva.

RECOMENDACIONES

- El video “La edad de la Tierra” puede proyectarse en clase desde primaria alta hasta la licenciatura, ya sea completo o en cápsulas.
- Puede usarse con o sin el cuestionario.
- Puede compartir los enlaces de los *videoquizzes* para que el estudiante los resuelva de manera sincrónica o asincrónica.
- El docente puede usarlo como complemento de los temas tratados en el video para contextualizar algún concepto en un marco científico que abarque un tema global.
- Se recomienda en las materias y temas siguientes:

- Física: aceleración de la gravedad, cálculo de salinidad de los mares.
- Geología: sedimentación, erosión, eras geológicas.
- Biología: extinción de las especies.
- Química: transmisión del calor, cristalización, disolución, mezclas, radiactividad, fechamiento isotópico.

Se concluye que el video puede ser usado con propósitos educativos, ya que muestra el avance de la ciencia con el tiempo: de un cálculo inicial de la edad de la Tierra, de 5994 años, hasta el ahora calculado y aceptado de 4567 millones de años.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo queremos agradecer a las autoridades y estudiantes de las siguientes escuelas secundarias: Bicentenario de la Independencia (11DES0106P), Centenario del Ejército Mexicano (11DES0119T), Secundaria Técnica No. 19 (11DST0049G), Telesecundaria No. 71 (11ETV0398Z), ubicadas en San José Iturbide, Gto., y Andres Balvanera (22DTV0079U), ubicada en Juriquilla, Querétaro. Además, queremos agradecer a la Lic. Angélica María Hernández Ramírez y a Lluvia Huerta Landaverde de la Secretaría de Educación de Guanajuato por su constante apoyo en la implementación de talleres de ciencia para escuelas públicas de ese estado, y a Juan Carlos Mesino Hernández, a Janet Sánchez Sánchez y a Arturo Eruviel Hernández Tirado quienes ayudaron en las primeras experiencias de poner videos y capturar respuestas en grupos de adolescentes.

REFERENCIAS

- Allegre, C. J., Manhès, G., y Göpel, C. (1995). The age of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(8), 1445-1456.
- Fireman, E.L., DeFelice, J., y Norton, E. (1970). Ages of the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(8), 873-881.
- Holmes, A. (1913). *La edad de la Tierra*. London: Harper & Brothers, 195 p. <https://archive.org/details/ageofearth00holmuoft/page/n9/mode/2up>.
- Nieto-Samaniego, A. F. y Alaniz-Alvarez, S.A., (2013). Experimentos simples para entender una Tierra complicada: 7: La edad de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, 40p. ISBN 978-607-02-4115-4. https://tellus.geociencias.unam.mx/wp-content/uploads/2020/01/libro7_edad_tierra.pdf
- Secretaría de Educación Pública (SEP). (2017). Aprendizajes clave para la educación integral. https://www.planyprogramasdestudio.sep.gob.mx/descargables/APRENDIZAJES_CLAVE_PARA_LA_EDUCACION_INTEGRAL.pdf

Manuscrito recibido: 18 de octubre de 2022

Manuscrito corregido-recibido: 18 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 29 de noviembre de 2022

LA ONTOGENIA LACUSTRE: UN VISTAZO A LA EVOLUCIÓN DE LOS LAGOS

Gustavo Olivares-Casillas

Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México C.P. 04510, México. golivarescas@geociencias.unam.mx

RESUMEN

Las dinámicas ambientales de los lagos están en constante evolución debido a la influencia de agentes externos que pueden ser regionales, como el clima, o locales, como las actividades humanas. La "ontogenia lacustre" hace referencia al proceso de transformación de un lago, que puede manifestarse como cambios en el estado trófico o la transición a otro tipo de ecosistema. En la Península de Yucatán el incremento del nivel del mar, los cambios regionales en el ciclo del agua, y la larga ocupación humana han sido mecanismos de forzamiento en la evolución de los sistemas lacustres durante los últimos 10 000 años. La región del sureste de México sirve como un laboratorio natural para abordar cómo han cambiado los sistemas lacustres (aguadas, cenotes, lagunas costeras) debido a causas naturales y/o antropogénicas. Se elaboró un video para explicar el término "ontogenia lacustre" y las causas que propician los cambios en los lagos. El objetivo es transmitir a un público general los conceptos básicos del origen, la formación, el funcionamiento y la importancia social que rodea a estos sistemas acuáticos.

Palabras clave: Lagos, ontogenia, ciclo del agua, eutrofización, Península de Yucatán.

ABSTRACT

The environmental dynamics of lakes are in constant evolution because they are subject to the influence of external agents, which can be regional, such as the climate, or local, such as human activities. "Lacustrine ontogeny" refers to the process of transformation of a lake that manifests itself as changes in the trophic state or the transition to another type of ecosystem. In the Yucatan Peninsula, sea level rise, regional changes in the water cycle, and the long human occupation have been forcing mechanisms in the evolution of lacustrine systems during the last 10 000 years. The southeast of Mexico serves as a natural laboratory to address the evolution of lacustrine systems (aguadas, cenotes, coastal lagoons) due to natural and/or anthropogenic causes. A video was made to explain the "lacustrine ontogeny" and the causes that lead to changes in the

lakes. The aim is to transmit to a general public the basic concepts of the origin, formation, functioning and social importance that surround these aquatic systems.

Keywords: Lakes, ontogeny, water cycle, eutrophication, Yucatan Peninsula.

INTRODUCCIÓN

La divulgación científica busca volver accesible el conocimiento científico a todo público no especializado. Los materiales audiovisuales facilitan el entendimiento de los procesos o fenómenos naturales que son complejos o que no son visibles (i.e. Sugimoto *et al.*, 2013). La elaboración de este tipo de videos permite transmitir temas específicos de manera entretenida a personas interesadas en dicho tema particular (i.e. Haran y Poliakov, 2012). El video "ontogenia lacustre" sirve como base para futuros capítulos que tendrán como objetivo explicar la importancia de los lagos como archivos naturales de los cambios ambientales.

Los sistemas lacustres albergan ecosistemas altamente productivos que desempeñan un papel clave dentro de las dinámicas de los ciclos de nutrientes y del agua, (Jeppesen *et al.*, 2014). Al mismo tiempo, estos cuerpos de agua funcionan como refugio de una alta diversidad biológica y suministran servicios ecosistémicos a las poblaciones humanas que habitan cerca de ellos (Wetzel, 2001). Sin embargo, estos cuerpos de agua son altamente vulnerables a las perturbaciones externas. Durante las últimas décadas se ha observado una acelerada degradación en su estructura y funcionalidad. Por ejemplo, actualmente es posible apreciar una reducción sustancial de los volúmenes hídricos, un incremento en la concentración de sales minerales, una disminución en la disponibilidad de recursos ambientales (agua y alimento), enriquecimiento acelerado de nutrientes (eutrofización), pérdida de biodiversidad (especies endémicas), así como una subsecuente transformación antrópica debido al ingreso de pesticidas, fertilizantes, y desechos humanos a los lagos (contaminación) (Jenny *et al.*, 2020).

Las características ambientales de los lagos son definidas, en principio, por los mecanismos de formación en su origen geológico (i.e. por actividad volcánica, represamiento, disolución kárstica, entre otros), ya que condicionan la geomorfología de la cuenca de captación (área de captura, área del lago, profundidad) (Wetzel, 2001). Por otra parte, la variabilidad climática ha modulado la evolución en el estado hidrológico y productivo de los lagos. El tipo de clima al que está sometido un lago varía de acuerdo con su posición geográfica (latitud), altitud sobre el nivel del mar, continentalidad, precipitación anual, y patrones de insolación y viento (Beck *et al.*, 2018). Las entradas (lluvia, escorrentía y afluentes) y salidas de agua (evaporación, flujos superficiales) modulan el nivel promedio y la química de un lago, mientras que el grado de erosión, producido por la misma precipitación, influye en la tasa de entrada de nutrientes que afectan la relación entre la fotosíntesis y la respiración dentro de un sistema lacustre (Wetzel, 2001).

Actualmente, existe un creciente interés entre el público no especializado, tanto rural como urbano, que se cuestiona las causas del cambio en la calidad del agua y los recursos que derivan de los lagos. Debido a esto, nace la necesidad de realizar un video de divulgación para comunicar, de manera clara y concisa, la información científica disponible acerca de las causas en la variabilidad ambiental de los sistemas lacustres. Se espera que el cambio climático actual modifique los ciclos hidrológicos globales, alterando los patrones de lluvia (aumentando o disminuyendo la disponibilidad de agua) en muchas regiones. Además, debido al incremento de la población mundial, la presión por producir más alimento y vivienda intensifican los procesos de cambio de uso de suelo en torno a los lagos. Esto acelera la erosión local, propiciando la eutrofización en muchas localidades (Jeppesen *et al.*, 2014).

La "ontogenia lacustre" se define como el proceso de desarrollo de un cuerpo de agua, que involucra tanto las causas que dieron lugar a su origen como aquellas que condujeron a su transformación. En general, el estudio de la evolución de los sistemas lacustres sostiene que 1) los cuerpos de agua cambian de estados prístinos caracterizados por aguas claras con pocos nutrientes (estado oligotrófico) a estados altamente productivos ricos en nutrientes y con aguas turbias (estado eutrófico), o que 2) los lagos (o lagunas) acumulan sedimentos compuestos por restos orgánicos e inorgánicos hasta que son llenados y se transforman en otro tipo de ecosistemas terrestres, por ejemplo, un pantano o una marisma (Binford *et al.*, 1983; Brenner y Escobar, 2009).

En México, gran parte de los sistemas lacustres se encuentran amenazados debido al desgaste y sobreexplotación de los mantos freáticos. En el norte del país las lluvias son escasas y muchos lagos se han secado (Alcocer y Bernal-Brooks, 2010). Las diferencias espaciales en la disponibilidad de la humedad están asociadas principalmente a la variación en los patrones de lluvia que ocurren durante la estación lluviosa de verano y los sistemas ciclónicos de latitud media (también conocidos como Nortes) durante el invierno (Cavazos y Hastenrath, 1990; Alcocer y Bernal-Brooks, 2010). Además, importantes cambios en la disponibilidad de humedad toman lugar durante la ocurrencia de oscilaciones climáticas (i.e. El Niño Oscilador del sur, ENSO, en Magaña *et al.*, 2003). Por otra parte, es notable el deterioro ambiental de numerosos cuerpos de agua para diversas localidades del norte, centro y sur de México. El incremento en la entrada de nutrientes y materia orgánica particulada en los lagos debido a actividades ganaderas, agrícolas, turísticas o por uso doméstico, ha causado un aceleramiento en el

proceso de eutrofización (i.e. Herrera-Silveira, *et al.*, 2002; Bravo-Inclán *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2011; Sigala *et al.*, 2017; Alcocer *et al.*, 2018). La contaminación química del agua debido al exceso en la entrada de nutrientes (i.e. fósforo), metales pesados, así como sustancias químicas (i.e. pesticidas) y micro plásticos, se ha visto reflejada en una alta toxicidad del agua y a una mayor exposición a patógenos que pueden tener efectos letales en la biodiversidad y las poblaciones humanas (Alcocer y Bernal-Brooks, 2010; Ansari *et al.*, 2010; Schwarzenbach *et al.*, 2010).

La Península de Yucatán es una extensa plataforma carbonatada al sureste de México que está compuesta por una alta diversidad de ecosistemas. Esta región está caracterizada por presentar poco relieve y estar rodeada de masas oceánicas que actúan como las fuentes primarias de humedad, las cuales condicionan la hidroquímica de la columna de agua en los sistemas lacustres (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011) (Figura 1). El clima es de tipo estacional y está caracterizado por una marcada temporada de lluvia (de mayo a septiembre) y otra seca (octubre a abril). El patrón estacional de precipitación en verano es determinado por los mecanismos de convección (lluvia convectiva) que ocurren en torno a las albercas cálidas de los mares interamericanos (Mar Caribe, Golfo de México y el nororiente del Océano Pacífico tropical) (Magaña y Caetano, 2005). La humedad es transportada en dirección a la Península de Yucatán por medio de los vientos del este (o vientos alisios). Asimismo, la formación de huracanes tropicales en el mar Caribe y el Golfo de México es una fuente importante de humedad (Wang y Lee, 2007). Mientras que los Nortes proveen humedad durante los meses fríos de invierno (Magaña *et al.*, 2003). El paisaje está compuesto principalmente por vegetación caducifolia, perennifolia y mangle (Ibarra-Manríquez *et al.*, 2002) que rodean diversos cuerpos de agua, entre ellos, aguadas, cenotes, y lagunas costeras de origen kárstico (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). De esta manera, este sitio resulta un laboratorio natural para estudiar cómo influyen los diversos procesos oceánicos, climáticos y antropogénicos sobre la ontogenia lacustre de los diversos sistemas acuáticos.

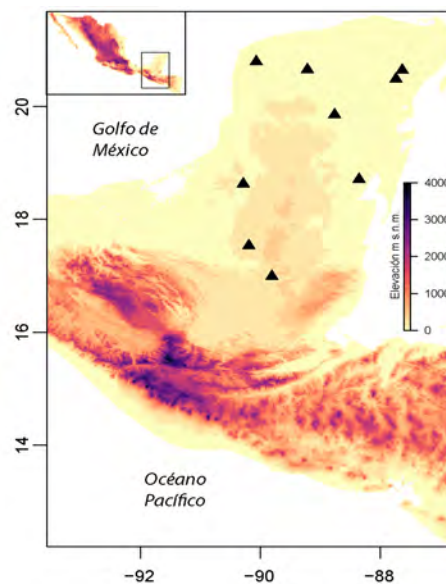


Figura 1. Localización de la Península de Yucatán (proyección UTM en el sistema de coordenadas WGS84). Se representan las variaciones de elevación (metros sobre el nivel del mar, m s.n.m.). Las principales aguadas, cenotes y lagunas costeras (i.e. San José Chulchaca, Yalahau, Coba, Punta Laguna, Chichancanab, Silvituc, La Encantada, Puerto Arturo, Petén Itzá, Salpetén) distribuidas a lo largo de la Península de Yucatán están denotadas por triángulos negros.

METODOLOGÍA

Un proyecto de investigación es la elaboración de un escrito especializado teórico y metodológico de un tema de interés que describe los pasos: título, marco teórico, antecedentes, marco conceptual, justificación, objetivos, hipótesis, preguntas de investigación, y marco metodológico, con el fin de resolver una o varias problemáticas actuales. De este proyecto de investigación pueden derivar proyectos de tesis, informes técnicos, así como proyectos de divulgación. En particular, la difusión de la ciencia pretende alcanzar a un público no especializado que quiera aprender y conocer del tema de una manera práctica. El proyecto “Una aproximación multi-indicador y multi-registro a la variabilidad ambiental de la Península de Yucatán a través del Holoceno” tiene como objetivo reconstruir la compleja historia ambiental (en términos biológicos, climáticos e hidrológicos) de los ecosistemas distribuidos en la Península de Yucatán durante los últimos 10 000 años (época geológica Holoceno). La variabilidad ambiental de estos ecosistemas es influenciada por la conectividad espacial y temporal que existe entre los procesos continentales y marinos sobre el paisaje. A su vez, busca encontrar las causas naturales y antropogénicas de dicha variabilidad ambiental.

Como parte del proyecto de investigación, se planteó el desarrollo de una serie de videos con un enfoque educativo que buscan informar a un público general el alcance de los estudios multi-indicador y los resultados logrados durante este proyecto de investigación. Estos videos abarcaran temas teóricos de variabilidad ambiental y métodos para el análisis de paleo-indicadores. En este trabajo se presenta un video que explica los estados tróficos (Figura 2) y las causas por las cuales los lagos se transforman debido a sus dinámicas internas y a su sensibilidad a estímulos externos (Figura 3). Este video es una esquematización que comprende una recopilación teórica acerca de la evolución de los lagos, y se localiza en la dirección:

<https://drive.google.com/file/d/13Z9hPePVi4QeLvVbFuFOTmI4O62nvDYa/view?usp=sharing>

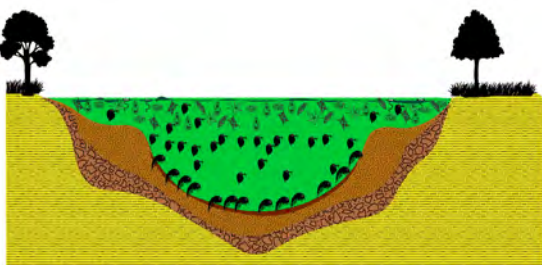


Figura 2. Esquematización de un lago en estado eutrófico (altamente productivo). Imagen utilizada en el video.

El video llamado “Ontogenia lacustre” tiene una duración de 2 minutos con 20 segundos. Este video introduce al público en el tema del deterioro de los lagos y sus causas. El video explica mediante ejemplos generales, y de manera detallada, cómo es la evolución de un lago, respondiendo dos principales preguntas: 1) ¿Qué les está pasando a nuestros lagos?, 2) ¿Por qué se transforman los lagos?

Este video será difundido a través de las principales redes sociales usadas y que tienen un mayor alcance mediático por un público no especializado (i.e. YouTube, Facebook), adjuntando datos del autor por si surgieran dudas respecto al tema. Datos de contacto: M. en C. Gustavo Olivares Casillas, correo electrónico golivarescas@geociencias.unam.mx.

El video fue elaborado mediante el programa Filmora®. La teoría del video está basada en información científica especializada (libros científicos, artículos científicos y comunicación personal con expertos en el tema). Los clips del video y los esquemas animados fueron producidos por el autor del escrito usando una cámara casera de celular y la aplicación de programas especializados en fotografía y gráficos (Illustrator® y Photoshop®). Las imágenes utilizadas en este video son de uso libre y provienen de páginas de internet como freepik.com, pixabay.com e iStockphoto.com. La música pertenece al compositor Benjamin Tissot que es de uso libre y está integrada dentro del banco de audio digital bensound.com. Este video es de uso libre mencionando la autoría. Su contenido podrá ser utilizado por docentes en clases que abarquen temas como los ecosistemas acuáticos o procesos de contaminación en el agua. Otros exponentes podrán utilizarlo como punto de partida para ejemplificar la evolución de un lago por cambios naturales o los causados por actividades humanas, y posteriormente podrán integrar casos de estudio para localidades particulares.



Figura 3. Esquematización de la contaminación de un lago causado por actividades antropogénicas (Imagen utilizada en el video).

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto “Una aproximación multi-indicador y multi-registro a la variabilidad ambiental de la Península de Yucatán a través del Holoceno” dirigido por el Dr. Alexander Correa Metrio del Centro de Geociencias de la UNAM. Al taller “Comunica tu investigación” dirigido por la M. en C. Mónica Ramírez Calderón adscrita al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM, por su orientación en la elaboración de este video.

REFERENCIAS

- Alcocer, J., Bernal-Brooks, F.W., 2010. Limnology in Mexico. *Hydrobiologia*, 644, 1-54.
- Alcocer, J., Merino-Ibarra, M., Oseguera, L.A., Escolero, O., 2018. Anthropogenic impacts on tropical karst lakes: “Lagunas de Montebello,” Chiapas. *Ecohydrology*, 11(8), e2029.
- Ansari, A.A., Gill, S.S., Khan, F.A., 2010. Eutrophication: Threat to Aquatic Ecosystems. In: Ansari, A., Singh, Gill, S., Lanza, G., Rast, W. (eds.). *Eutrophication: causes, consequences and control*. Springer, Dordrecht. 401 pp.

- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B.R.N., Charvet, G., Marín, L.E., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., 2011. Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19, 507-524.
- Beck, H., Zimmermann, N.E., McVicar, T.R., Nergopolan, N., Berg, A. Wood, E.F., 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 180214.
- Binford, M.W., Deevey, E.S., Crisman, T.L., 1983. Paleolimnology: An Historical Perspective on Lacustrine Ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 14, 255-286.
- Bravo-Inclán, L.A., Olvera-Viascán, V., Sánchez-Chávez, J.J., Saldaña-Fabela, P., Tomasini-Ortiz, A.C., 2010. Trophic state assessment in warm-water tropical lakes and reservoirs of the central region of Mexico. In: van Bochove, E., Vanrolleghem, P.A., Chambers, P.A., Thériault, G., Novotná, B., Burkart, M.R. (eds.). *Issues and solutions to diffuse pollution: Selected papers from the 14th International conference of the IWA diffuse pollution specialist group, DIPCON 2010. Conférence sur la pollution diffuse 2010 inc, Québec, Québec, CANADA*, 495 pp.
- Brenner, M., Escobar, J., 2009. Ontogeny of Aquatic Ecosystems. In: *Encyclopedia of Inland Waters*, ed. Likens, G.E., Academic Press, Oxford, 456-461.
- Cavazos, T., Hastenrath, S., 1990. Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the southern oscillation. *International Journal of Climatology*, 10(4), 377-386.
- Haran B, Poliakov, M., 2012. The periodic table of videos. *Science*, 332, 10460-1047.
- Herrera-Silveira, J.A., Medina-Gomez, I., Colli, R., 2002. Trophic status based on nutrient concentration scales and primary producers community of tropical coastal lagoons influenced by groundwater discharges. *Hydrobiologia*, 475-476(1), 91-98.
- Ibarra-Manriquez, G., Villasenor, J.L., Duran, R., Meave, J., 2002. Biogeographical analysis of the tree flora of the Yucatan Peninsula. *Journal of Biogeography*, 29, 17-29.
- Jenny J., Anneville O., Arnaud F., Baulaz Y., Bouffard D., Domaizon I., Bocaniov S., Chèvre N., Dittrich M., Dorioz J., Dunlop E., Dur G., Guillard J., Guinaldo T., Jacquet S., Jamoneau A., Jawed Z., Jeppesen E., Krantzberg G., Lenters J., Leoni B., Meybeck M., Nava V., Nöges P., Patelli M., Pebbles V., Perga M., Rasconi S., Reutz C., Rudstam L., Salmaso N., Sapna S., Straile D., Tammeorg O., Twiss M., Uzarski D., Ventelä A., Vincet W., Wilhelm S., Wäng-berg S., Weyhenmeyer G., 2020. Scientists' warning to humanity: rapid degradation of the world's large lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 46, 686-702.
- Jeppesen, E., Meerhoff, M., Davidson, T.A., Trolle, D., Søndergaard, M., Lauridsen, T.L., Beklioglu, M., Brucet, S., Volta, P., González-Bergonzoni, I., Nielsen, A., 2014. Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. *Journal of Limnology*, 73(s1), 88-111.
- Magaña, V.O., Vázquez, J.L., Pérez, J.L., Pérez, J.B., 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313-330.
- Magaña, V., Caetano, E., 2005. Temporal evolution of summer convective activity over the Americas warm pools. *Geophysical Research Letters*, 32, L02803.
- Pérez, L., Bugja, R., Lorenschat, J., Brenner, M., Curtis, J., Hoelzmann, P., Islebe, G., Scharf, B., Schwalb, A., 2011. Aquatic ecosystems of the Yucatán Peninsula (Mexico), Belize, and Guatemala. *Hydrobiologia*, 661, 407-433.
- Schmitter-Soto, J.J., Comín, F.A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L.E., Steinich, B., 2002. Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, 467, 215-228.
- Schwarzenbach, R.P., Egli, T., Hofstetter, T.B., von Gunten, U., Wehrli, B., 2010. Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 109-136.
- Sigala, I., Caballero, M., Correa-Metrio, A., Lozano-García, S., Vázquez, G., Pérez, L., Zawisza, E., 2017. Basic limnology of 30 continental waterbodies of the Transmexican Volcanic Belt across climatic and environmental gradients: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(2), 313-370.
- Sugimoto C.R., Thelwall, M., Larivière, V., Tsou, A., Mongeon, P., Macaluso, B., 2013. Scientists Popularizing Science: Characteristics and Impact of TED Talk Presenters. *PLoS ONE*, 8(4), e62403.
- Wang, C., Lee, S.-K., 2007. Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters*, 34, L02703.
- Wetzel, R.G., 2001. *Limnology Lake and Reservoir Ecosystems*. Academic Press, San Diego, 1006 pp

Manuscrito recibido: 1 de octubre de 2022
 Manuscrito corregido recibido: 23 de noviembre de 2022
 Manuscrito aceptado: 7 de diciembre de 2022

EL RECONOCIMIENTO DE LAS CAPAS INTERNAS DE LA TIERRA

Francisco Chacón-Hernández

Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla La Mesa, Querétaro, México. C.P. 76230. chacon@geociencias.unam.mx

RESUMEN

La existencia de diferentes capas en el interior de la Tierra fue algo desconocido todavía hacia finales del siglo XIX. Su conformación y desarrollo actual conllevó todo un proceso evolutivo de millones de años por el que tuvo que pasar el planeta entero, el cual sigue siendo objeto de estudio. En este escrito, se describe y explica cómo, a partir de la Sismología como área de estudio, se pudo reconocer la existencia de diferentes capas en el interior de la Tierra. Así mismo, se explica de manera concisa cómo a partir de este reconocimiento, se propusieron las bases para el establecimiento de los procesos y mecanismos dinámicos que hasta el día de hoy han permitido sustentar la formación y evolución de las capas internas y del planeta mismo.

Palabras clave: Capas internas de la Tierra, sismología, ondas sísmicas.

ABSTRACT

The existence of different layers inside the Earth was still unknown towards the end of the XIX century. The conformation and delimitation that can be observed today involved an evolutionary process of millions of years that the entire planet had to go through, which is still under study. In this writing, it is described and explained thanks to Seismology as a study area, it was possible to recognize the existence of different types of layers inside the Earth. Likewise, it is concisely explained how from this discovery, the bases were proposed for the establishment of the dynamic processes that until today have allowed to support the formation and evolution of the internal layers and of the planet itself.

Keywords: Inner layers of the Earth, seismology, seismic waves.

INTRODUCCIÓN

La Sismología y el fenómeno sísmico

La Sismología es la disciplina encargada del estudio de las ondas sísmicas que se generan y propagan en el interior de la Tierra. Cuando estas ondas alcanzan la superficie de la Tierra, generan el movimiento del suelo, el cual puede ser perceptible en el momento de su propagación. Pero ¿qué son estas ondas sísmicas? o ¿cómo se generan? Generalmente, debido a que el interior de la Tierra no se encuentra en un estado de equilibrio o reposo sino sometido a diferentes niveles de esfuerzos, los cambios de éstos en las masas de rocas desencadenan perturbaciones que son conocidas como sismos o terremotos. La energía liberada por estos sismos genera el movimiento de las masas de rocas, siendo esto conocido como ondas sísmicas.

El fenómeno sísmico se remonta hasta los primeros días de la formación de la Tierra y los mecanismos o circunstancias que lo provocan han ido cambiando con el paso del tiempo. Por ejemplo, dentro de los primeros 500 Ma (millones de años) desde su formación (hace aproximadamente unos 4,000 Ma), en la Tierra imperaban condiciones propias de un planeta en constante formación y crecimiento, sin la existencia de continentes y cubierto por material incandescente, siendo continuamente impactado por cuerpos de roca llamados planetesimales que hacían vibrar el planeta entero (de acuerdo con la teoría de la Nebulosa solar que postula la formación del sistema solar; Larimer, 1967; Grossman, 1972). Más de 1,000 Ma después, con la formación de los primeros bloques de rocas que culminarían con la formación del primer gran supercontinente llamado Ur (hace aproximadamente unos 3,000 Ma, Rogers y Santosh, 2003), los sismos comenzarían a generarse bajo los mismos mecanismos que en la actualidad se pueden observar (p.ej., los relacionados a fenómenos volcánicos o tectónicos).

La Sismología, cuyo término fue acuñado por el geofísico irlandés Robert Mallet (1810-1881), no fue considerada como disciplina de estudio hasta bien entrado el siglo XVIII, cuando el filósofo y naturalista inglés John Michell (1724-1793) dedujo en 1760, a partir del gran sismo de Lisboa en 1755, que los sismos eran ondas causadas por el movimiento de las masas de roca debajo de la superficie. No obstante,

la curiosidad por encontrar la verdadera causa sobre el movimiento del suelo ya había surgido en algunas civilizaciones antiguas que intentaron descifrar sus posibles causas. Por ejemplo, el erudito chino Zhang Heng (78-139), fue el primero en obtener las direcciones en las que se movía el suelo, gracias a un sismoscopio primitivo que inventó; no obstante, él atribuía los movimientos del suelo a cambios del viento y de la presión atmosférica. El erudito griego Tales de Mileto (ca. 624 a.e.c.- 546 a.e.c.), observó que los sismos generaban movimientos similares a los de un barco sobre el oleaje, por lo que consideró que la superficie de la Tierra debía flotar sobre agua. Si bien estos eruditos proponían diferentes razonamientos, la mayoría de la gente de aquellos días atribuía estos fenómenos sísmicos a fuerzas divinas bajo diferentes enfoques mitológicos. Fue con el devenir de los siglos, hasta alcanzar la llamada edad moderna (en el año de 1492), que el aporte de conocimiento por parte de diferentes personajes (por ejemplo, Galileo Galilei (1564-1642), Isaac Newton (1643-1727), Edmond Halley (1656-1742), Rene Descartes (1596-1650), Immanuel Kant (1724-1804), Pierre Simon Laplace (1749-1827), o Robert Mallet (1810-1881)) permitió el desarrollo de una mejor instrumentación, así como de las bases físico-matemáticas que permitieron forjar los pilares para el análisis del fenómeno sísmico.

Hacia mediados del siglo XIX, Europa comenzó a vivir un auge científico que favoreció el desarrollo del primer sismómetro moderno (también llamado receptor sísmico) en 1842, gracias al físico inglés James David Forbes (1809-1868). Esto permitió estudiar de manera más eficiente el movimiento del suelo. Fue hacia finales del siglo XIX y principios del XX que el mejoramiento técnico en los sismómetros y el aporte de diversas técnicas y metodologías permitió tener una mejor comprensión de los movimientos del suelo, impulsando con ello el desarrollo matemático de las ondas sísmicas y la obtención aproximada de los hipocentros sísmicos (ubicación o foco del sismo).

Evidencias de las capas internas

La primera persona en deducir la existencia de las capas internas de la Tierra fue el geofísico alemán Emil Wiechert (1861-1928). Él concluyó en 1896, que el hecho de que hubiera rocas con diferentes densidades en la superficie terrestre, es decir, algunas rocas que pesaran más que otras, significaba que la Tierra debía estar compuesta por diferentes tipos de rocas en su interior, por lo que propuso un modelo conformado por diversas capas. No obstante, la primera evidencia de la existencia de alguna capa interna la obtuvo el sismólogo inglés Richard Dixon Oldham (1858-1936) en 1906, a la cual denominó como núcleo. En 1926, el geofísico inglés Harold Jeffreys (1891-1989), consideró la existencia de un núcleo más líquido en la parte más externa del núcleo que había propuesto Oldham. En



Figura 1. Bosquejo del modelo geoquímico, basado en los componentes químicos de cada capa interna de la Tierra. Las capas internas del modelo no se encuentran a escala. N.E.: Núcleo externo; N.I.: Núcleo interno; MOHO: Discontinuidad de Mohorovičić. Figura original del autor.

1936, la sismóloga danesa Inge Lehmann (1888-1993) igualmente observó la existencia de un núcleo sólido en la parte más interna del núcleo que había propuesto Oldham. Hacia principios del siglo XX, el sismólogo austriaco Andrija Mohorovičić (1857-1936) y el sismólogo alemán Beno Gutenberg (1889-1960), reconocieron por primera vez la existencia de la corteza, el manto y el núcleo, lo que les llevó a proponer la división del interior de la Tierra en diferentes capas.

Estudios posteriores sobre la delimitación de las capas internas de la Tierra fueron llevados a cabo por los geofísicos Keith Edward Bullen (1906-1976), Francis Birch (1903-1992), Edward Bullars (1907-1980), entre otros. Ellos propusieron algunos de los primeros modelos que intentaron delimitar las capas internas de la Tierra a partir de la densidad y composición química de sus componentes (Bullen, 1950; Birch 1952, 1954; Bullard, 1957). No obstante, el estudio de la delimitación de las capas internas ha continuado hasta nuestros días.

En la Figura 1 se presenta un bosquejo, sin escala, de las capas internas de la Tierra bajo un enfoque químico, también llamado 'modelo geoquímico'. En este modelo se ha propuesto que el núcleo interno está conformado por hierro y níquel sólidos, con un espesor que podría alcanzar hasta los 1,275 km. El núcleo externo también se compone de hierro y níquel, pero en un estado líquido, cuyo espesor podría alcanzar hasta los 2,225 km. El manto es la capa interna que presenta un mayor espesor, la cual está compuesta principalmente por un grupo de minerales como son el olivino y piroxeno, así como de óxidos de calcio y aluminio, cuyo espesor podría alcanzar los 2,900 km. La capa más superficial es la corteza, la cual está compuesta principalmente por silicatos sólidos que conforman las rocas y cuyo espesor promedio ronda los 35 km. Este espesor puede variar entre los 8 y 70 km, dependiendo de la región de la Tierra sobre la que se esté analizando. Entre el manto y la corteza se localiza el llamado Moho o discontinuidad de Mohorovičić, en honor a Andrija Mohorovičić, que es una zona de transición que divide a ambas capas y que marca un cambio significativo en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas.

La conformación y delimitación de las capas del modelo geoquímico llevó al cuestionamiento sobre cómo se pudieron formar tales capas. Básicamente se ha considerado que desde que la Tierra comenzó su proceso de formación, siendo una gran bola de fuego en crecimiento, los diferentes tipos de compuestos y materiales incandescentes se fueron acomodando en el interior de la Tierra dependiendo de su peso. Esto delimitó composicionalmente el interior, depositando los compuestos y materiales más pesados al fondo. No obstante, con la proposición de la teoría de la Deriva Continental, hecha en 1915 por el científico alemán Alfred Wegener (1880-1930) en su libro "El origen de los continentes y océanos" (Wegener, 1915), se tuvo la interrogante durante las siguientes décadas de si los continentes que actualmente conocemos estuvieron unidos en el pasado y si el interior de la Tierra presenta movimientos dinámicos. Esto trajo, por consiguiente, la búsqueda de un proceso que conceptualizara la movilidad de los continentes. En 1929, Holmes propuso el llamado proceso de convección en el manto, con el que intentó explicar el movimiento de los continentes en la teoría de deriva continental (Holmes, 1931). No obstante, la conceptualización de este proceso tuvo que esperar hasta el año de 1962 con el aporte del geólogo estadounidense Harry Hess (1906-1969). Él pudo refinar la idea de Wegener y Holmes, lo que permitió, a principios de los años 1970, la postulación de la llamada teoría de tectónica de placas.

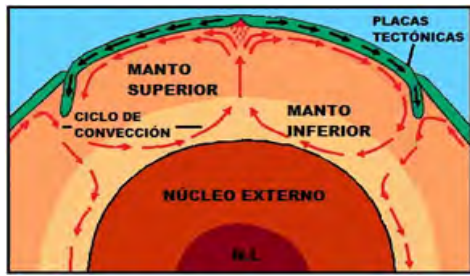


Figura 2. Movimiento de las placas tectónicas (flechas en color negro) a partir de la idealización del proceso de convección en el manto, observándose las corrientes de convección que suben y bajan (flechas en color rojo) junto con el movimiento de las placas tectónicas. N.I.: Núcleo interno. (Modificado de Davies y Richards, 1992).

La teoría de tectónica de placas dio por sentado, no sólo el movimiento de los continentes, sino también del suelo marino, sobre grandes bloques de masa de rocas denominados “placas tectónicas” (Figura 2). Para esta teoría, el proceso de convección resulta vital, ya que no sólo es el motor que permite llevar a cabo la movilidad de las placas tectónicas a partir de un movimiento cíclico, sino que también considera la separación de los materiales más densos de los menos densos. Ello genera que los materiales más densos sean colocados en las partes más profundas del interior de la Tierra para continuar dando forma al núcleo, mientras que los menos densos son colocados en partes menos profundas, para continuar dando forma al resto de capas internas (Figura 2). Por lo tanto, a partir de estas consideraciones y tomando en cuenta la evidencia de que grandes cantidades de volcanes y sismos eran generados en ciertas zonas conocidas como límites de placas (márgenes que delimitan el movimiento horizontal de las placas tectónicas, Davies y Richards, 1992), fue que se propuso la existencia de otro tipo de capas internas, pero no bajo una denominación química sino dinámica.

Desde la perspectiva del modelo geoquímico, sus distintas capas brindan una inmejorable visualización de cómo se conforma el interior de la Tierra. Sin embargo, estas no son apropiadas para representar los procesos dinámicos que ocurren tanto en el interior de la Tierra como en la superficie (por ejemplo, el surgimiento de volcanes y sismos) o en la atmósfera (por ejemplo, las auroras boreales). Por lo tanto, partiendo de la idea de convección de Holmes, fue que se propuso un modelo geodinámico. Este modelo, mostrado en la Figura 3, plantea la existencia de siete capas dinámicas bajo características particulares. La capa dinámica más superficial, denominada litosfera, está conformada por al menos trece gigantescas placas tectónicas que constantemente se mueven y que pueden extenderse desde la corteza hasta la parte superior del manto. La astenósfera está por debajo de la litosfera, abarcando la parte superior del manto



Figura 3. Bosquejo del modelo geodinámico, el cual está basado en los procesos dinámicos que ocurren en el interior de la Tierra. Las capas del modelo no se encuentran a escala. N.E.: Núcleo externo; N.I.: Núcleo interno; D: Estrato ‘D’. Figura original del autor.

a una profundidad de aproximadamente 30 y 130 km y hasta los 660 km, la cual está conformada por materiales de silicio en estado sólido semifundido. Sobre esta capa se lleva a cabo el movimiento de las placas tectónicas. Los términos litosfera y astenósfera fueron primeramente acuñados hacia principios del siglo XX para analizar la densidad y el equilibrio de gravedad de grandes masas de roca (Barrel, 1914). La capa denominada como mesosfera o zona de transición, primeramente propuesta por Birch (1954), se ubica por debajo de la astenósfera abarcando gran parte del manto, principalmente en su parte superior, y siendo la principal fuente de magma (denominación dada a la masa de roca incandescente o fundida que proviene del interior de la Tierra). Por debajo de la mesosfera se localiza la parte inferior del manto, siendo esta una zona de transición de materiales y de flujo de calor debido tanto al proceso de convección como al ascenso de calor proveniente del núcleo externo. Entre la parte más profunda del manto y el núcleo externo se localiza el llamado estrato ‘D’ (identificado por Stacey y Loper, 1983), con un espesor aproximado de 300 km. Al estrato ‘D’ se le considera el lugar donde surgen las llamadas plumas del manto o penachos, los cuales consisten en segregaciones de magma capaces de ascender hasta la superficie terrestre y generar fenómenos volcánicos. En la parte más profunda del modelo geodinámico se encuentra el núcleo, siendo el núcleo externo de donde migra energía en forma de calor y materiales hacia la parte inferior del manto, influyendo en la transformación del estrato ‘D’ (Bloxham y Gubbins, 1978). Mientras tanto, el núcleo interno actúa como un gran almacenador y principal fuente de calor que amortigua el enfriamiento de todo el planeta (Dobson, 2016).

ESTUDIO Y CONCEPTUALIZACIÓN

De acuerdo con lo mencionado en las secciones anteriores, vemos que el reconocimiento de las capas internas de la Tierra ha necesitado de muchos siglos de análisis y estudio. Sin embargo, ¿cómo fue que se pudo delimitar los espesores de las capas internas de la Tierra y su composición a partir del movimiento de las masas de rocas? Básicamente, la evidencia sobre la existencia de las capas internas provino de observar variaciones tanto de los tiempos de arribo como de las velocidades de las ondas sísmicas. Esto responde la pregunta anterior, aunque para poder describir con mayor claridad estas evidencias es necesario primeramente mencionar algunos conceptos que son fundamentales en la Sismología.

Las ondas sísmicas, que son el resultado del movimiento de las masas de roca por causa de un sismo, son clasificadas en ondas de cuerpo (viajan en el interior de la Tierra) y en ondas superficiales (viajan en la superficie). Para este escrito, solo se conceptualizará y analizará a las ondas de cuerpo, ya que son estas las que permiten caracterizar las estructuras internas de la Tierra. Estas ondas de cuerpo se clasifican a su vez en ondas primarias, también llamadas ondas longitudinales (en los sismogramas se les identifica como fase P), y en ondas secundarias, también llamadas ondas transversales (en los sismogramas se les identifica como fase S) (ver el movimiento de las ondas P y S en Figura 4a). Cuando estas ondas sísmicas se propagan por el interior de la Tierra, presentan un frente de onda sísmica que se va expandiendo en el tiempo como cuando se tira una piedra en un estanque de agua y se generan ondas que se expanden desde el punto donde cayó el objeto (ver frente de onda que va de un tiempo T a un tiempo T1 en la Figura 4b). Para analizar de mejor forma estos frentes de ondas sísmicas, se han utilizado las llamadas

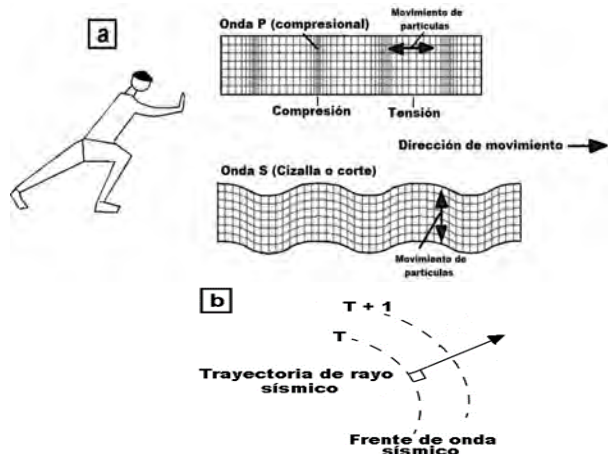


Figura 4. a) Esquema de las ondas sísmicas P y S, mostrando su movimiento a través de un material. Las ondas P comprimen y dilatan (tensan) el material por el que pasan, teniendo una dirección longitudinal y paralela a la dirección de movimiento (ver flechas negras en la onda P y la flecha que señala la dirección de movimiento). Las ondas S, también denominadas como transversales, generan cizalla por el material por el que pasan teniendo una dirección perpendicular a la dirección de movimiento (ver flechas negras en la onda S y compararlo con la flecha que señala la dirección de movimiento). Las ondas P siempre presentan una mayor velocidad que las ondas S. b) Ejemplo de trayectoria de rayo sísmico, señalada con la flecha en dirección perpendicular al frente de ondas (forma un ángulo de 90° con los frentes de ondas). Este frente de ondas se propaga de un tiempo T a un tiempo T+1. Imagen tomada y modificada de Stein y Wyssession, (2009).

trayectorias de rayo sísmico, las cuales consisten en líneas rectas perpendiculares que teóricamente salen del frente de propagación de las ondas sísmicas formando un ángulo de 90° (flecha negra que sale del frente de ondas en la Figura 4b). Esto permite tener una mejor interpretación de las trayectorias de las ondas sísmicas cuando se propagan en el interior de la Tierra.

Cuando las ondas sísmicas P y S se propagan en el interior de la Tierra, estas pueden viajar en una capa formada por un mismo tipo de roca y sin llegar a incidir sobre alguna otra capa formada por otro tipo de roca (diferentes propiedades físicas) (por ejemplo, ver la trayectoria de las ondas P y S en forma de rayo sísmico; número 1 en la Figura 5a).

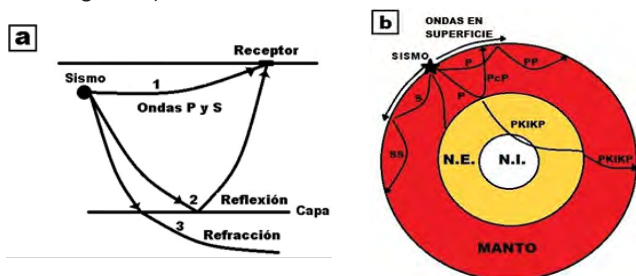


Figura 5. a) Ejemplo de propagación de las ondas P y S en forma de rayo sísmico, desde el lugar de origen del sismo (foco) y sin incidir sobre ninguna capa (1); incidiendo sobre una capa y generando su reflexión (2); incidiendo sobre una capa y generando su refracción (3). b) Ejemplo de las capas internas de la Tierra, analizadas por medio de las trayectorias de rayos sísmicos de las fases sísmicas, las cuales son propagadas a partir de una fuente en la superficie (marcada con una estrella). N.E. = Núcleo externo; N.I.=Núcleo interno. Dado que las velocidades de las ondas P y S se incrementan a mayor profundidad debido a que las masas de rocas son más densas, las trayectorias de los rayos sísmicos tienden a desviarse de la vertical en zonas más profundas y a hacerse más verticales en zonas más someras. Por ello es que las trayectorias suelen apreciarse más verticales cuando están más cerca de la superficie. Las capas del modelo no se encuentran a escala. (Figura 5b tomada y modificada de Shearer, 2001).

No obstante, las ondas P y S también pueden viajar sobre una capa y llegar a incidir sobre otras capas de roca conformadas por diferentes propiedades físicas, haciendo que parte de la energía de estas ondas se vea afectada al ser reflejada (rebotada) o refractada (pasa de un medio a otro cambiando su dirección de propagación), con cambios igualmente en sus velocidades (ver las trayectorias de los rayos sísmicos de las fases P y S, números 2 y 3 en la Figura 5a). Estos cambios de energía en las ondas sísmicas son registrados en los llamados sismogramas, los cuales hacen referencia a que estas ondas sísmicas incidieron o atravesaron tales capas internas (ver el ejemplo de sismograma en la Figura 6a).

Para poder diferenciar los cambios de energía sísmica en las ondas P y S cuando estas inciden sobre las distintas capas del interior de la Tierra, nuevas fases sísmicas son empleadas. Por ejemplo, analizando la Figura 5b, que es un modelo no a escala de la circunferencia de la Tierra, se puede ver que las ondas P y S y sus distintas fases se presentan en forma de rayo sísmico. Si estas ondas viajan desde el lugar donde se genera el sismo (ver estrella en la figura) y se reflejan solo una vez en la superficie terrestre hasta que son registradas en el receptor, sus fases sísmicas se denominan como PP y SS. Cuando las trayectorias de las ondas P y S son reflejadas entre los límites del manto y el núcleo externo para posteriormente ser registradas en el receptor, se les denomina como fases PcP y ScS. Cuando la onda P atraviesa el manto, el núcleo exterior y se refleja en el núcleo interno sin atravesarlo, su fase se denomina como PKP. Mientras que, cuando la onda P atraviesa el manto, el núcleo externo y el núcleo interno, su fase se denomina como PKIKP.

En el caso particular de la onda S, dado que esta onda no puede atravesar materiales líquidos debido a la particularidad de su movimiento de cizalla, tampoco puede atravesar el núcleo exterior ya que este se presenta en un estado líquido. Sin embargo, dado que la onda P sí puede atravesar el núcleo externo, la onda S debe convertirse primeramente en onda P para atravesar esta capa y posteriormente, una vez que la haya atravesado, debe convertirse nuevamente en onda S para continuar su viaje y atravesar el núcleo interno, por lo que su fase se denomina como PKJKP (ver Figura 5a). Este proceso de conversión de energía sísmica ocurre para ambas ondas P y S cuando inciden sobre una capa y son reflejadas o refractadas con un ángulo diferente al que presentaba la trayectoria del rayo sísmico antes de incidir.

Para el ejemplo mostrado en la Figura 6a, la primera fase que se registra en el sismograma es la onda P directa, que es la fase sísmica que viaja desde el lugar de origen del sismo sin incidir sobre ninguna capa terrestre (ver Figura 6b). En seguida arriban otras fases derivadas de la onda P, como son PP y pPP, las cuales inciden una y dos veces sobre la superficie terrestre antes de llegar al receptor sísmico. Dado que la onda P viaja con una mayor velocidad que la onda S, las fases de P se registran unos minutos antes que la fase S directa, que no incide con alguna capa terrestre, mientras que la fase SS, que incide una vez sobre la superficie terrestre, se registra tiempo posterior a la fase S (ver sismograma de la Figura 6a y propagación de las fases en la Figura 6b). También son observadas las fases PcP y ScS, las cuales comienzan en el lugar de origen del sismo como ondas P y S respectivamente, y se propagan a través el manto hasta reflejarse en el límite del mismo manto y del núcleo externo siendo posteriormente registradas en el receptor. En el caso de la fase PcS, es una onda P que viaja en el manto, incide entre el manto y el núcleo externo y se refleja como onda S hasta registrarse en el receptor sísmico.

En los ejemplos previamente analizados, es posible observar las diferentes trayectorias de las fases sísmicas de P y S, cuyas particularidades ahora si permiten responder a la pregunta del inicio de esta sección. Para poder calcular los espesores y la composición de las capas internas, es necesario conocer tres datos fundamentales: 1) distancias angulares, 2) tiempo de arribo de las fases sísmicas y 3) velocidades de las fases sísmicas. 1) La distancia angular que se necesita calcular es aquella entre la ubicación del sismo (hipocentro o foco) y la del receptor en la superficie terrestre. Esta distancia angular se debe a la redondez de la Tierra (por ejemplo, la distancia angular que existe entre el sismo marcado con un círculo negro y el receptor de la Figura 6b). 2) Para obtener los tiempos de arribo de las fases sísmicas, en este caso relacionadas con la capa que se desea analizar, se necesita localizar sus fases en los sismogramas. Por ejemplo, si se desea analizar el espesor del manto, en la Figura 6 se requerirá obtener la información de las fases PcP y ScS, ya que son las que inciden directamente entre los límites del manto y núcleo externo y se reflejan hasta ser registradas en el receptor sísmico. La localización de las fases sísmicas en los sismogramas debe realizarse cuidadosamente para poder obtener sus tiempos de arribo (tal y como se señala en la Figura 6a).

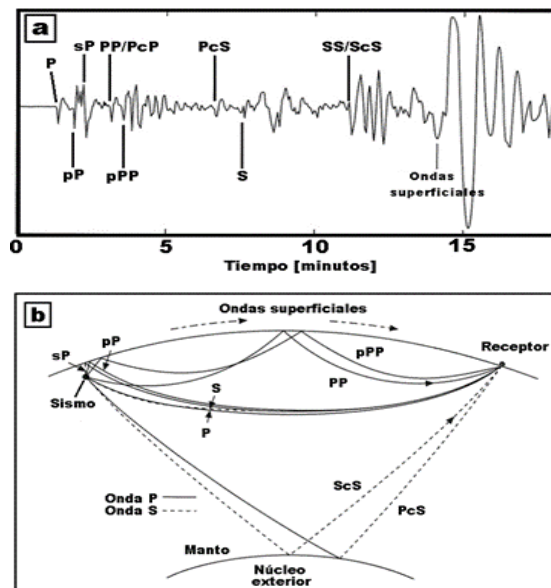


Figura 6. a) Ejemplo de un sismograma mostrando diferentes fases sísmicas de P y S marcadas para un sismo generado en Colombia y registrado en el Colorado, Estados Unidos. b) Trayectorias de rayo sísmico viajando a través de las capas internas de la Tierra. La fase sP consiste en una onda que inicia como S desde el origen del sismo (foco), sube y se refleja en la superficie terrestre pero regresa convertida en onda P hasta que se registra en el receptor; la fase pP es una onda P que comienza en el foco, sube y se refleja en la superficie terrestre; la fase pPP es la onda P que inicia desde el origen del sismo, sube y se refleja en la superficie terrestre, regresa y viaja a través del manto para posteriormente volver a incidir en la superficie terrestre y volver a reflejarse hasta que finalmente es registrada en el receptor. Las fases PP y SS son ondas P y S que inician en el foco propagándose por el manto hasta que inciden solo una vez sobre la superficie terrestre, posteriormente se reflejan y vuelven al manto antes de llegar al receptor sísmico; las fases PcP y ScS inician en el foco como ondas P y S respectivamente, se propagan a través del manto hasta reflejarse en el límite del mismo manto y del núcleo externo para finalmente registrarse en el receptor sísmico. La fase PcS consiste en una onda P que viaja en el manto, incide entre el manto y el núcleo externo y se refleja para continuar su viaje nuevamente en el manto hasta finalmente registrarse como onda S. Imagen tomada y modificada de Stein y Wysession, (2009).

Con esto no sólo se tendrá información acerca de las capas sobre las que han incidido las distintas fases sísmicas P y S, sino que también se tendrán sus tiempos de arribo y se podrán calcular sus velocidades. 3) La obtención de las velocidades aparentes de las fases sísmicas puede aproximarse a través de las llamadas curvas de tiempo de viaje (Figura 7), en las cuales se correlaciona el tiempo de arribo de las fases sísmicas de 2) (eje vertical T) con las distancias angulares de 1) (eje horizontal D). Así por ejemplo, dependiendo de dónde se origine el sismo (foco) y en dónde se ubique el receptor sísmico en la superficie, las mediciones de los tiempos de arribo y las distancias angulares de las fases P y PcP presentarán valores con ciertas tendencias, tal y como lo muestran los diferentes puntos negros en la Figura 7. Estos puntos representan la medición de las fases para cada sismo, por lo que se pueden ajustar mediante rectas o pendientes denominadas como m_1 y m_2 .

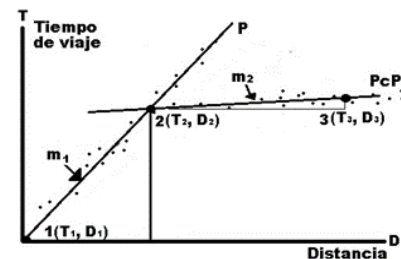


Figura 7. Ejemplo supuesto de las curvas de tiempo de viaje para las fases P y PcP. Los puntos 1 (T_1, D_1), 2 (T_2, D_2) y 3 (T_3, D_3) que pertenecen a las rectas de las fases P y PcP permiten aproximar los valores de las pendientes m_1 y m_2 .

El inverso de estas pendientes permite calcular las velocidades de las fases como:

$$m_1 = \frac{1}{V_{PcP}} = \frac{T_2 - T_1}{D_2 - D_1} \quad \text{y} \quad m_2 = \frac{1}{V_P} = \frac{T_3 - T_2}{D_3 - D_2}$$

en donde T_1, T_2, T_3, D_1, D_2 y D_3 corresponden a los puntos 1, 2 y 3 que forman parte de las rectas m_1 y m_2 que forman parte de las rectas m_1 y m_2 , mientras que V_{PcP} y V_P corresponden a las velocidades de las fases PcP y P

Para aproximarse a los espesores de las capas internas de la Tierra, es necesario el empleo de ciertas expresiones matemáticas en las que se toma en cuenta tanto las velocidades como los tiempos de arribo de las fases sísmicas a la capa analizada, así como el cálculo de las distancias angulares. Esto ha permitido observar, por ejemplo, cómo la corteza de la Tierra presenta variaciones en su espesor dependiendo del lugar de medición. En el caso particular de las velocidades de las fases sísmicas, éstas han permitido obtener información sobre las propiedades físicas de los materiales que componen cada capa. Una forma que ha permitido corroborar la composición de estas capas ha sido promediar las velocidades de las fases sísmicas obtenidas en diferentes partes del planeta, y correlacionarlas con mediciones de velocidad realizadas en laboratorios. Estos procedimientos han permitido observar cómo las fases sísmicas incrementan su velocidad con la profundidad, debido principalmente a que los materiales son más densos. Por lo tanto, desde el punto de vista geoquímico, se ha llegado a la conclusión de que la Tierra está conformada por capas internas cuya diferencia radica en los materiales que las componen.

BENEFICIOS DEL RECONOCIMIENTO DE LAS CAPAS INTERNAS

El conocimiento que la Sismología aporta con información obtenida de los sismos generados en el interior de la Tierra ha permitido reconocer las distintas capas que la conforman, lo cual ha sido de vital importancia al intentar comprender el funcionamiento de nuestro planeta. Este conocimiento no sólo ha permitido esquematizar y caracterizar el interior de la Tierra, sino también ha ayudado a vincular las capas internas con ciertos procesos y fenómenos que ocurren en el interior y que pueden ser observados en la superficie terrestre. Por ejemplo, se ha considerado que las plumas de manto surgen en el estrato 'D' (Figura 3), las cuales pueden ascender hasta la superficie terrestre y formar volcanes. El núcleo externo ha sido considerado como la principal fuerza en la generación del campo magnético de la Tierra, el cual la protege del impacto de partículas solares produciendo las llamadas auroras boreales. Así mismo, el movimiento de las placas tectónicas en la litosfera influye en la generación de sismos.

También es importante mencionar que el reconocimiento de las capas internas ha permitido, por un lado, establecer y al mismo tiempo respaldar el proceso de convección en el manto, vital para la realización de los procesos dinámicos internos que han influido en la transformación del planeta; por otro lado, ha brindado las bases para una mejor percepción sobre el proceso evolutivo al que ha estado sometida la Tierra desde su formación. Diferentes teorías han intentado formular el origen, conformación, desarrollo y futuro de la Tierra siguiendo los estudios y evidencias de las capas internas. No obstante, también ha sido necesario el apoyo de otras disciplinas científicas, que por medio de experimentos de laboratorio han ayudado a reforzar este conocimiento. Esto nos muestra como la historia de la Tierra se sigue construyendo y moldeando día a día, con pequeños pero constantes cambios.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias por sus comentarios en la revisión de este manuscrito a los revisores anónimos, así como a las editoras en jefe.

REFERENCIAS

- Barrell, J. (1914). The strength of the Earth's crust. *The Journal of Geology*, 22(7), 655-683.
- Birch, F. (1952). Elasticity and constitution of the Earth's interior. *Journal of Geophysical Research*, 57(2), 227-286.
- Birch, F. (1954). The Earth's mantle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 35(1), 79-85.
- Bloxham, J., Gubbins, D. (1987). Thermal core-mantle interactions. *Nature*, 325(6104), 511-513.
- Bullard, E. C. (1957). *Verhandel. Nederlandsch Geol.-Mijnbouwkund, Genootschap.*, 18, 23.
- Bullen, K. E. (1950). An Earth model based on a compressibility-pressure hypothesis. *Geophysical Journal International*, 6, 50-59.
- Davies, G. F., Richards, M. A. (1992). Mantle convection. *The Journal of Geology*, 100(2), 151-206.
- Dobson, D. (2016). Earth's core problem. *Nature*, 534(7605), 45-45.
- Grossman, L. (1972). Condensation in the primitive solar nebula. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36(5), 597-619.
- Holmes, A. (1931). Radioactivity and earth movements: *Geol. Soc. Glasgow Trans.*, v. 18, p. 559-606

- Larimer, J. W. (1967). Chemical fractionations in meteorites—I. Condensation of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(8), 1215-1238.
- Rogers, J.J.W., Santosh, M. (2003). Supercontinents in Earth History. *Gondwana Research*, 781 6(3), pp.357-368.
- Shearer, P. M. (2019). *Introduction to seismology*. Cambridge University Press. 3rd Edition. 442 pp.
- Stacey, F. D., Loper, D. E. (1983). The thermal boundary-layer interpretation of "D" and its role as a plume source. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 33(1), 45-55.
- Stein, S., Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons.
- Wegener, A. (1915). *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*: Vieweg & Sohr., Braunschweig; 2nd ed., 1920; 3rd ed., 1922, translated into English in 1924; 4th ed., 1924, revised by A. Wegener and translated into English in 1929.

Manuscrito recibido: 31 de agosto de 2022

Manuscrito corregido recibido: 7 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 28 de noviembre de 2022.

YÁ MFÄDI AR XIMHAI JAR HÑÄÑHO: LAS CIENCIAS DE LA TIERRA EN OTOMÍ

Ilse Elbjorn-Flores^{1*} y Roberto Aurelio Núñez-López²

¹Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, Campus UNAM-Juriquilla, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México. *ief1394@geociencias.unam.mx

²Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera Amealco-Temascalcingo km 1 Col. Centro. Amealco, C.P. 76894, México. aurelio.nunez@uaq.edu.mx

RESUMEN

En este artículo se presenta material didáctico interdisciplinario en el que se abordan temas básicos de las Ciencias de la Tierra. Se trata de un cuadernillo escrito en *hñäñho* (otomí) mediante el cual se busca promover el uso de esta lengua originaria en el ámbito científico, particularmente en el área de las Geociencias. Para ello fue necesario crear algunos neologismos referidos a los tecnicismos en español a partir de palabras coloquiales del *hñäñho* que puedan describir los conceptos científicos aludidos en este material, recurriendo a la metáfora y a la metonimia, procesos comunes en la creación de palabras en el *hñäñho* y en muchas otras lenguas. Los neologismos, junto con algunos préstamos lingüísticos hacen posible la modernización e implementación de las lenguas amerindias en el ámbito escolar y científico.

Palabras clave: *Hñäñho*, otomí, neologismos, préstamos lingüísticos, Ciencias de la Tierra, material didáctico.

ABSTRACT

This article introduces an interdisciplinary teaching resource that comprises several Earth science topics. The resource is a booklet written in hñäñho (Otomi); it intends to promote the use of the native language in a scientific context and, more specifically, within the Geosciences. To achieve this, we created some neologisms that refer to technical terms found in Spanish using colloquial Hñäñho terms. In the creation of neologisms, we employed metaphor and metonymy, which are common figures used in the creation of words in hñäñho and other languages. Neologisms and loanwords allow the modernization and the use of native American languages in education and science.

Keywords: *hñäñho*, Otomi, neologisms, loanwords, Earth science, teaching resource

INTRODUCCIÓN

México es un país que cuenta con una gran diversidad lingüística y cultural. En el territorio nacional se contabilizan 68 agrupaciones lingüísticas que incluyen 364 variantes (Instituto Nacional de Lenguas Indígenas [INALI], 2009). Sin embargo, todas estas lenguas originarias se encuentran amenazadas debido a la continua reducción en el número de hablantes, así como la disminución de los ámbitos donde es posible su uso (Hekking, 2014; 2020).

Comúnmente se refiere a las lenguas indígenas como “dialectos” que no pueden escribirse y que no cuentan con una gramática, lenguas de tradición oral exclusivamente. En este sentido la palabra “dialecto” se usa de manera peyorativa. Sin embargo, todas las lenguas pueden escribirse y todas tienen una gramática. El problema con muchas de las lenguas originarias de México es que no han sido suficientemente estudiadas y, en muchos casos, los hablantes nativos no han desarrollado un sistema de escritura.

Afortunadamente, en el caso del *hñäñho* se han superado estos problemas y actualmente se sabe cómo funciona la lengua. Se ha descrito su gramática (Hekking y Andrés de Jesús, 1984) y puede escribirse con un sistema de escritura fonético y estandarizado, avalado por los hablantes nativos de las distintas variantes de Querétaro (Hekking, 2010, 2014).

La legislación mexicana reconoce a las lenguas indígenas como parte del patrimonio cultural y lingüístico de México; si bien no se les ha otorgado el carácter de oficial como al español, son reconocidas como lenguas nacionales (Veladés, 2014). El artículo 11 de la Ley General de Derechos Lingüísticos de los Pueblos Indígenas (2022) garantiza el acceso a la educación bilingüe e intercultural con el fin de asegurar el respeto a la dignidad e identidad de los pueblos originarios. Esto exige el uso de las lenguas originarias como vehículo de enseñanza; sin embargo, es un requisito que no se cumple con frecuencia. Entre las condiciones que dificultan la enseñanza de las lenguas indígenas en los programas de educación bilingüe se encuentra la falta de materiales didácticos escritos en las distintas lenguas originarias de México.

Los materiales didácticos y de divulgación científica prácticamente son inexistentes en lenguas indígenas y representan una alternativa que

podría contribuir a la modernización, fortalecimiento y revitalización de las lenguas originarias, ampliándose su uso en los ámbitos académico, tecnológico y científico considerados de prestigio. Por lo mismo, estos materiales podrían ser incluidos en los programas de educación intercultural bilingüe (García-García, 2021; Hekking, 2014).

Para la creación de dichos materiales es necesaria la adaptación de las lenguas originarias a la terminología técnica y científica, una de las estrategias es la creación de neologismos. Éstos son palabras nuevas que no existen en el habla cotidiana de una comunidad pero que son creadas a partir de los términos propios de una lengua (Alcaraz y Martínez, 1997).

Los neologismos son parte del proceso de modernización de las lenguas originarias y permiten ampliar su uso en ámbitos académicos y científicos. Ello con la finalidad de comunicar conceptos y estudiar las ciencias en lenguas indígenas, a diferentes niveles de complejidad, tal como ocurre en el resto de las lenguas mayoritarias que han desarrollado y emplean léxico especializado en dichos ámbitos (Maaya K-Moots; Takeuchi, 2014).

Los términos técnicos y científicos también se pueden integrar a una lengua que carezca de ellos mediante el uso de préstamos lingüísticos o léxicos (Hekking y Bakker, 2010). Éstos involucran la adopción de una palabra y su significado desde otra lengua; sin embargo, se prefiere evitar la adquisición sistemática de préstamos cuando la lengua posee mecanismos propios para generar el léxico especializado, como es el caso del *hñāñho* (García, 2003).

La lengua *hñāñho*, como se le conoce a nivel nacional, es la séptima lengua indígena más importante de México por su número de hablantes. Actualmente, existen aproximadamente 296,658 hablantes de *hñāñho* que representan 1.3% de la población indígena, siendo Hidalgo, Estado de México y Querétaro los estados con mayor número de hablantes (INEGI, 2022). Además de los estados mencionados, el otomí es la lengua originaria de Ciudad de México, Guanajuato, Michoacán, Puebla, Tlaxcala y Veracruz. El *hñāñho* es una de las lenguas con mayor número de variantes lingüísticas y se estima una antigüedad de 1,500 años (Lastra, 2006; Hekking, 2014; 2020; INALI, 2017).

A pesar de lo anteriormente descrito, el *hñāñho*, al igual que el resto de las lenguas indígenas de México, se encuentra en riesgo de desaparecer debido al desplazamiento lingüístico y la discriminación hacia los pueblos originarios (Hekking, 1995; Hekking, *et al.*, 2007). La política de castellanización, implementada por el Estado mexicano a principios del siglo XX, tuvo como consecuencia la marginación y estigmatización de las lenguas y culturas indígenas en México. Los hablantes nativos fueron forzados a abandonar su lengua en el ámbito escolar y con frecuencia optaron por dejar de transmitirla a las siguientes generaciones (Núñez-López y Guerrero Hernández, 2014). Es por ello que una de las aproximaciones para la revitalización de la lengua hace énfasis en su revaloración y extensión a ámbitos considerados prestigiosos (Vargas, 2017).

Considerando lo anterior, se elaboró un cuadernillo titulado "Ya *ximhaji né ya nduji te*" (La Tierra y los fósiles) con la finalidad de proponer neologismos que representen conceptos básicos de Geociencias. El texto presentado puede emplearse para la difusión de las ciencias de la Tierra entre estudiantes hablantes de la lengua *hñāñho*.

METODOLOGÍA

El material didáctico "Ya *ximhaji né ya nduji te*" se planeó como un texto que acerque temas básicos de Ciencias de la Tierra a un público no especializado, particularmente niños y niñas de 8 a 13 años. Al momento de su elaboración se tuvieron en cuenta tanto la calidad de la información científica presentada, como la calidad de la comunicación en lengua *hñāñho*. Para ello, los textos de divulgación referenciados en el cuadernillo fueron a su vez cotejados con la información del libro "Introducción a las Ciencias de la Tierra" (Tarbuck y Lutgens, 2013), así como lo aprendido durante el Diplomado en Enseñanza de las Ciencias de La Tierra del Centro de Geociencias del campus Juriquilla-Querétaro de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El texto en *hñāñho* se escribió en una escritura fonemática y estandarizada con base en los diccionarios de Hekking y Andrés de Jesús (1989) y Hekking *et al.* (2010). Los neologismos de este material que se refieren a los conceptos técnicos y científicos fueron creados considerando las palabras propias de la lengua *hñāñho* y recurriendo al uso de la metáfora y metonimia. La metáfora es el proceso de trasladar un significado, con base en la similitud de aspectos, usos y funciones; mientras que la metonimia sustituye el nombre de una cosa por la de uno de sus atributos (Alcaraz y Martínez, 1997). Ambas son figuras literarias empleadas regularmente para la creación de palabras en esta lengua que ha sido documentada por el Dr. Ewald Hekking y colaboradores desde 1981.

La planeación del texto comenzó con la selección de temas. Se eligió el tema de los fósiles como el central ya que, además de ser interesante para los más jóvenes, es fácil de ilustrar y relacionar con otros temas como lo son las rocas y la teoría evolutiva. De esta manera, se diseñó un listado de temas amplio y diverso que se puede presentar en una secuencia lógica para permitir la construcción sistemática del conocimiento.

Dado que se trata de un cuadernillo introductorio de Ciencias de la Tierra, se planteó el inicio con una breve presentación de la Tierra como planeta. En esta introducción se menciona que, a lo largo de su existencia, la Tierra y las formas de vida que la habitan han sufrido cambios. Esto lleva a la pregunta de ¿cómo es que se sabe de todos estos cambios? y para contestarla, se comenzó por abordar el tema de las rocas, el ciclo de las rocas y cómo aquellas de tipo sedimentario pueden conservar un registro sobre la vida antigua a través de los



Figura 1. Contenido del cuadernillo Ar *Ximhaji ne ya nduji te* en *hñāñho* y español.

Tabla 1. Neologismos propuestos en el material didáctico <i>Ar Ximhaji ne ya ndui te</i> (modificado de Hekking, 2011).			
Concepto	Neologismo	Origen	Interpretación
Fósil	<i>Ndui te</i>	<i>Ndui</i> - primero, original, comienzo; <i>te</i> - vida	Vida primigenia
Roca ígnea	<i>Ar do xi meki</i>	<i>Do</i> - roca; <i>me</i> - solidez	Roca que solidifica
Roca sedimentaria	<i>Ar do xi hyge</i>	<i>Do</i> - roca; <i>hge</i> - asentarse en el suelo	Roca que se sienta
Roca metamórfica	<i>Ar do da mpuni</i>	<i>Mpuni</i> - transformarse; <i>do</i> - roca	Roca que se transforma
Paleontología	<i>Ar mfädi ya ndui te</i>	<i>Mfädi</i> - ciencia; <i>ndui</i> - primero; <i>te</i> - vida	Ciencia de la vida antigua

fósiles, el tema central. Finalmente, se incluyó la teoría evolutiva como una de las implicaciones más importantes que conlleva el estudio del registro fósil. La Figura 1 muestra la página del contenido completo del cuadernillo en *hñäñho* y en español.

Una vez delimitados los temas y su secuencia, se prosiguió a realizar una revisión bibliográfica para redactar la primera versión del cuadernillo en español. Las fuentes consultadas para ello se encuentran en la sección de referencias del propio texto.

Durante la escritura, se procuró utilizar un lenguaje simple que permitiera brindar explicaciones completas y claras. Simultáneamente, se diseñaron las páginas utilizando el software Canva, con el fin de presentar el texto de una forma visualmente atractiva. Se seleccionaron colores brillantes para llamar la atención de los lectores jóvenes y se emplearon las imágenes que ilustraran mejor el texto. Adicionalmente, los tópicos se acompañaron de algunas actividades sencillas, ya sea para evaluar la comprensión de la lectura o para ayudar en la comprensión del tema.

Además de los neologismos creados en la lengua *hñäñho* para referirse a los tecnicismos en español, se recurrió al uso de préstamos léxicos, los cuales se adaptaron a la escritura de la lengua indígena, tal es el caso de las palabras Clase y Paleozoico que en *hñäñho* se escribieron como *Klase* y *Paleosoiko* respectivamente.

En la Tabla 1 se muestran los neologismos propuestos para describir algunos de los conceptos comunes en la disciplina de Ciencias de la Tierra. Estos conceptos se formaron a partir de la combinación de un sustantivo con un verbo o un sustantivo con sustantivo, tal como sucede naturalmente en el *hñäñho*. Un ejemplo de ello se da en la palabra creada para el concepto de roca sedimentaria, donde se hace uso de la palabra existente para roca (*do*) y se modifica con ayuda del verbo *hge* que significa asentarse o caer.



Figura 2. Algunas páginas del cuadernillo *Ar Ximhaji ne ya ndui te* en *hñäñho* y español.

PROPUESTA

El material didáctico elaborado consiste en un cuadernillo con lecturas simples, ilustraciones atractivas, experimentos demostrativos, y actividades que permiten presentar los temas de Ciencias de la Tierra de forma interesante e interactiva utilizando la lengua *hñáñho* como medio de comunicación. En la Figura 2 se muestran algunas páginas del texto en *hñáñho* y español. La Tabla 2 presenta las ligas de la herramienta *Flipsnack* donde se pueden consultar ambas versiones completas del texto.

Tabla 2. Ligas de consulta a los cuadernillos *Ar Ximhaji ne ya ndui te*

Tabla 2. Ligas de consulta a los cuadernillos <i>Ar Ximhaji ne ya ndui te</i>	
Hñáñho	https://www.flipsnack.com/E5855566AED/ar_ximhai_ne_ya_ndui_te.html
Español	https://www.flipsnack.com/E5855566AED/la-tierra-y-los-fosiles-ief-v2.html

CONCLUSIONES

Los materiales didácticos bilingües son indispensables para la enseñanza de lenguas indígenas. A través de estos materiales se puede acercar la ciencia y tecnología a los integrantes de comunidades indígenas. Los conceptos especializados de estos ámbitos pueden ser expresados en las lenguas originarias, y en este caso del *hñáñho*, mediante la creación de neologismos o la incorporación de préstamos léxicos. Para ello es fundamental tener el conocimiento preciso de las dos lenguas y hacer un trabajo colaborativo entre especialistas de las disciplinas científicas con hablantes nativos.

El habla cotidiana de la comunidad *ñáñho*, o de cualquier otra comunidad indígena, es muy diferente al habla que se va adquiriendo en los ámbitos escolares o académicos, que precisan de un lenguaje especializado. Por ello, y como parte del proceso de modernización de una lengua, es necesaria la creación de neologismos a partir de términos sencillos de la propia lengua, recurriendo al uso de la metáfora y metonimia, procesos comunes en la creación de palabras de una lengua.

Una vez que se crea una propuesta de neologismo, el siguiente paso es socializarlo en la comunidad de habla y enseñarlo en las escuelas. La incorporación o asimilación de neologismos no es inmediata como la incorporación de préstamos léxicos, porque se requiere la reflexión lingüística en la propia lengua. Por lo mismo, la asimilación de neologismos, creados en ámbitos escolares podría ser complicada en ámbitos cotidianos con el grueso de la población ya que la mayoría de los indígenas mexicanos que aún hablan su lengua materna no saben escribir su propia lengua y desconocen el significado de los conceptos técnicos o especializados.

En el caso del *hñáñho*, la alfabetización requiere de profesores capacitados en la escritura de su lengua materna. El *hñáñho* es una lengua que tiene más vocales y consonantes que el español y además tiene tres tonos; alto, bajo y ascendente, que marcan diferencia de significado entre las palabras. Por ello, los materiales didácticos bilingües especializados, como el que se propone en este trabajo de las Ciencias de la Tierra, podría contribuir a la valoración, fortalecimiento, revitalización y modernización de la lengua *hñáñho*, lo que ayudaría a trascender de la oralidad a la escritura.



Figura 2 (Cont). Algunas páginas del cuadernillo *Ar Ximhaji ne ya ndui te* en *hñáñho* y español.

El éxito de la educación científica en la población general radica en tener acceso a información completa, y comprenderla permite tomar mejores decisiones y resolver problemas; los pueblos originarios no son la excepción. En México, se reconoce el derecho a la educación en la lengua materna para facilitar la comprensión y aprendizaje de las diversas asignaturas, entre las que se encuentran las ciencias. En este esquema educativo, el diálogo científico también permite recuperar conocimiento tradicional y contextualizarlo. Además, mediante la educación intercultural bilingüe de calidad es posible fomentar la inclusión y preservación de la herencia lingüística de los pueblos originarios.

En el aspecto lingüístico y cultural, se considera que gran parte del trabajo de revitalización de las lenguas originarias radica en su revalorización. Para ello es importante que la lengua indígena no se relegue a su uso cotidiano, sino que pueda implementarse como lengua de enseñanza y aprendizaje en los diferentes niveles de educación y se incluya en contextos considerados de prestigio, tales como el científico y el académico.

Con la elaboración del cuadernillo titulado *Ar Ximhaji ne ya ndui te* se generó un recurso que ejemplifica la implementación del *hñáñho* en la educación intercultural bilingüe de ciencia básica. A través de este proyecto se puede extender el uso de la lengua originaria al ámbito científico mediante la creación de neologismos para referirse a conceptos de las Ciencias de la Tierra que se encontraban ausentes en la lengua *hñáñho*. Es importante recordar que los neologismos son comunes en todas las lenguas vivas y su uso depende de los hablantes, quienes pueden adoptarlos o modificarlos a su conveniencia.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Diplomado en Enseñanza de las Ciencias de La Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de México por otorgarme las herramientas teóricas y prácticas para diseñar y elaborar este material. Al Dr. Ewald Hekking y la Facultad de Lenguas y Letras, campus Amealco de la Universidad Autónoma de Querétaro, que permiten el acercamiento a la lengua *hñāñho* mediante cursos y recursos propios. A los estudiantes del diplomado y cursos de lengua quienes brindaron apoyo y comentarios constructivos durante la elaboración del proyecto. Finalmente, y no menos importante, agradecemos a los revisores por su tiempo dedicado a la lectura de este artículo, por sus sugerencias y comentarios que han enriquecido este trabajo.

REFERENCIAS

- Alcaraz, E. y Martínez, M.A. (1997). Diccionario de Lingüística Moderna. Editorial Ariel, S. A.
- Cámara de Diputados de H. Congreso de la Unión (2022, 28 de abril). Ley General de Derechos Lingüísticos de los Pueblos Indígenas.
- García, J.M. (2003). El préstamo lingüístico en la enseñanza de las lenguas. Problemas de etnocentrismo. En M. Pérez y J. Coloma (Eds.), *El español, lengua de mestizaje y la interculturalidad*. (pp. 327-336). Centro Virtual Cervantes.
- García-García, L. (2021). El bilingüismo en la educación indígena: Apuntes para su reflexión. *Punto Cunorte*, 7(13), 69-97. <https://doi.org/10.32870/punto.v1i13.105>
- Hekking E. y Andrés de Jesús, S. (1984). Gramática otomí. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Hekking E. y Andrés de Jesús, S. (1989). Diccionario español-otomí de la comunidad de Santiago Mexquititlán Querétaro. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Hekking, E. (2014). Impacto del español sobre el hñāñhu y estrategias para reforzar la lengua indígena. En L. M. Lepe y N. Rebolledo (Eds.), *Educación bilingüe y políticas de revitalización de lenguas indígenas* (pp. 103-141). Abya Yala.
- Hekking E. y Bakker, D. (2010). Tipología de los préstamos léxicos en el otomí de Querétaro: una contribución para el estudio sistemático, y comparativo de diversas lenguas del mundo desde un enfoque interlingüístico. *Ciencia UAQ*, 3(1), pp. 27-47.
- Hekking, E., de Santiago, P., Núñez, R.A., de Jesús, S.A. (2010). *He'mi mpomuhñā ar hñāñho ar hñāmfo Ndāmaxeí / Diccionario bilingüe otomí-español del estado de Querétaro*. Instituto Nacional de Lenguas Indígenas.
- Hekking, E. y Bakker, D. (2020). Contacto lingüístico asimétrico entre el español y el hñāñho: préstamos, cambios gramaticales y nuevos patrones. En M. A. Soler y J. C. Serrano (Eds.), *Contacto lingüístico y contexto social. Estudios de variación y cambio* (pp. 49-107). Instituto de Investigaciones Filológicas, UNAM.
- Lastra, Y. (2006). *Los Otomíes; su lengua y su historia*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de investigaciones Antropológicas.
- Instituto Nacional de Lenguas Indígenas (2009). *Catálogo de las lenguas indígenas nacionales. Variantes lingüísticas de México con sus autodenominaciones y referencias geoestadísticas*. INALI.
- Instituto Nacional de Lenguas Indígenas (2017). *Norma de escritura de la lengua hñāñhu (otomí)*. INALI.
- Maaya K-Moots (s.f.) Neologismos. Recuperado el 3 de noviembre de 2022 de <https://www.maayakmoots.com/neologismos.html>.
- Núñez-López R. A. y Guerrero-Hernández, N. (2014). La interculturalidad en jóvenes bachilleres de una comunidad otomí: experiencia docente en Santiago Mexquititlán, Amealco, Querétaro. En L. M. Lepe y N. Rebolledo (Eds.), *Educación Bilingüe y políticas de revitalización de lenguas indígenas*. (pp.171-196). Abya-Yala.
- Tarback, E., y Lutgens, F. (2013). *Ciencias de La Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. 251 pp.
- Takeuchi, N. (2014) *Lenguas, culturas y ciencia en las comunidades indígenas de México*. *Revista Digital Universitaria*, 15(2).
- Veladés, D. (2014) *La lengua oficial y las lenguas nacionales en México y en derecho comparado*. En J. Vega-Gómez (Ed.), *Temas selectos de derecho internacional privado y de derechos humanos. Estudios en homenaje a Sonia Rodríguez Jiménez* (pp. 515-536). Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM.

Manuscrito recibido: 30 de septiembre de 2022

Manuscrito corregido recibido: 14 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 17 de noviembre del 2022



AGRADECIMIENTO A LOS ÁRBITROS

La garantía de la calidad de los artículos publicados en la revista depende el trabajo altruista de especialistas que revisan los manuscritos antes de su publicación. Aquí queremos agradecer el tiempo y esfuerzo de los árbitros de los artículos publicados en los números 1 y 2 del 2022.

Alejandro Perez Ricardez

Ángel F. Nieto Samaniego

Anthony Ramírez Salazar

César E. Mora Ley

Claudia C. Mendoza Rosales

Dalila Aldana Aranda

Dante Morán Zenteno

Eduardo Becerra Torres

Enrique González Torres

Fabricio Sánchez Granados

Francisco García Moctezuma

Gilberto Silva Romo

Juan Carlos Mesino Hernández

Julieta Fierro Gossman

Laura Mori

Lilia Montoya Lorenzana

Lorenzo Vázquez Selem

Ma. Teresa Orozco Esquivel

Marco Guzmán Speziale

María Isabel Vidal Reyes

Martín Carlos Velasques

Mónica G. Ramírez Calderón

Raiza Pilatowsky Gruner

Raúl Silva Aguilera

Rodrigo Gutiérrez Navarro

Sandra Fuentes Vilchis

Saúl A. Villafañe Barajas

Sergio Sanmartín Morales

Susana A. Alaniz Álvarez

Thierry Calmus

Yadira H. Hernández Pérez