

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 HIDROTÉRMICOS 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.

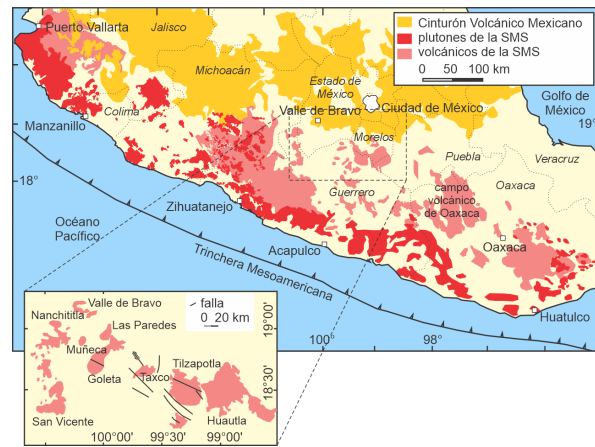


Figura 1. Mapa esquemático del sur de México que muestra la distribución del Cinturón Volcánico Mexicano y de las franjas plutónicas y volcánicas que conforman la provincia magmática de la SMS. En el recuadro abajo a la izquierda se aprecia con más detalle la distribución de los centros explosivos silíceos 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 Tejuipilco 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 Tlzapotla, 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 Teapulco, 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 Teapulco 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., Okoroafo, 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