



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Propuesta didáctica para el aprendizaje  
de la Geoquímica en la carrera de  
Ingeniería Geológica: de la teoría al uso  
de herramientas digitales**

**MATERIAL DIDÁCTICO**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geólogo**

**P R E S E N T A**

Cristian Martín Amezcua Meléndez

**ASESORA DE MATERIAL DIDÁCTICO**

Dra. Laura Mori



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado PROPUESTA DIDACTICA PARA EL APRENDIZAJE DE LA GEOQUIMICA EN LA CARRERA DE INGENIERIA GEOLOGICA: DE LA TEORIA AL USO DE HERRAMIENTAS DIGITALES que presenté para obtener el título de INGENIERO GEÓLOGO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

**CRISTIAN MARTIN AMEZCUA MELENDEZ**  
Número de cuenta: 318278403

# Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>EJERCICIOS.....</b>	<b>4</b>
1. Movilidad del arsénico en sistemas acuosos: análisis con diagramas Eh-pH.....	5
2. Meteorización química, distribución de elementos y exploración mineral.....	13
3. Adsorción de Metales en Agua Contaminada: Modelación con Visual MINTEQ.....	19
4. Evolución magmática y enriquecimiento en tierras raras (REE): implicaciones para la exploración.....	26
5. Análisis hidrogeoquímico y balance hídrico en un acuífero costero: el caso del acuífero La Paz.....	30
6. Ejercicio Integrador 1 - Agua Superficial y Contaminantes.....	37
<b>SOLUCIONARIO.....</b>	<b>48</b>
1. Movilidad del arsénico en sistemas acuosos: análisis con diagramas Eh-pH.....	49
2. Meteorización química, distribución de elementos y exploración mineral.....	53
3. Adsorción de Metales en Agua Contaminada: Modelación con Visual MINTEQ.....	57
4. Evolución magmática y enriquecimiento en tierras raras (REE): implicaciones para la exploración.....	60
5. Análisis hidrogeoquímico y balance hídrico en un acuífero costero: el caso del acuífero La Paz.....	65
6. Ejercicio Integrador 1 - Agua Superficial y Contaminantes.....	70

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi madre, la Licenciada en Relaciones Internacionales Reyna Dalia Cristina Meléndez Salgado, que a través de grandes sacrificios personales me dio una vida que me permitió destacar en una carrera que me apasiona. A mi abuela, la educadora María Cecilia Salgado Benítez y a mi abuelo, el profesionista David Ángel Meléndez Ramírez quienes me dieron un hogar durante la carrera. A mis tías, primos y abuela María Luisa De La Torre De Anda, quienes me apoyaron durante mis sesiones de estudio. A Stella Navas, Jimena Valverde, Gladys Alvarado, Patricia Duque y sus familias, quienes me educaron en mis años formativos e inculcaron en mí un gran interés por el estudio y alimentaron mi curiosidad por el mundo que me rodea.

De igual manera, agradezco a la Doctora en Ciencias de la Tierra Laura Mori, quien me permitió trabajar junto con ella y fue mi tutora durante la elaboración de este trabajo. A los sinodales de este trabajo, cuyas revisiones mejoraron su calidad, el Dr. Aldo Ramos Rosique, la M.C. Norma Erika Paredes López, el Dr. José Enrique Santos Jallath y el Ing. Gabriel Salinas Calleros.

No sería el profesionista en el que me he convertido sin el apoyo de mis profesorxs, las ingenieras Nallely Beatriz Trejo García y Nallely López García; las maestras Norma Erika Paredes López, María del Mar Almazán López, y Leticia Sánchez Guillén; las doctoras Silvia Elizabeth Rivera Olmos y Rosa María Prol Ledesma; los ingenieros Javier Mancera Alexandre, Rodolfo Ravael Ávalos Alexandre, Miguel Idefonso Vera Ocampo, Javier Arellano Gil y Lauro Horacio Barragán Ávila; y los doctores Renato Castro Govea, Enrique Alejandro González Torres y Aldo Ramos Rosique. Doy gracias por todo el conocimiento que se esforzaron por transmitirme y el apoyo que me han extendido durante mi trayectoria académica.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mis amistades, sin su compañía dudo que hubiera terminado esta etapa de mi vida. M.C. Carmen Vidal, Lic. Dylan Jhugroo, Diane Estefanía, Itzel Toxtle, Mayte Guevara, María Fernanda Torres Carbajal, Mauricio Trejo Puertos, Eduardo Cárdenas, Lic. Yannis Cruz, Fátima Soto, Fernando Ruiz, Ing. Ámbar Vargas, Sharon Ceceña, Akary Reyes, Cielo Gómez, Susana Moreno, Yolanda García, Nadia Ramírez, Ing. Sebastián Jiménez, Ing. Rodolfo Bautista, Alexander Donlucas, Brizio Martínez, Ing. Danna Lucero, Rommel Velázquez, Alexis Cervantes y Cristina Romo.

Todos me han apoyado en diferentes etapas de mi crecimiento y educación, sin ellos no estaría aquí hoy. Gracias por acompañarme en mis logros y permitirme acompañarles en los suyos.

## Introducción

La Geoquímica aplica los principios de la química al estudio de la Tierra para conocer la composición, distribución e interacciones entre los principales materiales terrestres (minerales, sedimentos, rocas, aguas naturales, etc.). Esta disciplina es trascendental para la formación de las y los ingenieros geólogos, ya que proporciona herramientas para abordar y resolver problemas como la exploración y recuperación de los recursos naturales o la remediación de agua y suelo contaminados.

En el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Geológica, Geoquímica es una asignatura de quinto semestre que sienta las bases para cursos sucesivos de petrología, hidrogeología, geología ambiental y yacimientos minerales. En este sentido, es prioritario que las y los alumnos adquieran buenos conocimientos teóricos de la materia, acompañados por competencias sólidas en el manejo e interpretación de datos geoquímicos diversos.

Respondiendo a estas necesidades, se ha elaborado una serie de actividades que, al contemplar el uso de datos geoquímicos reales y softwares libres, además de abordar cuestiones como la exploración de yacimientos minerales o la contaminación y remediación ambiental, fomentarán el aprendizaje significativo de la Geoquímica y el desarrollo de habilidades clave en el estudiantado de Ingeniería Geológica.

En las actividades propuestas, el alumnado analizará datos geoquímicos de diferentes medios geológicos (agua, sedimentos y rocas ígneas) empleando softwares de libre acceso como:

- Geochemist's Workbench

Paquetería de programas ocupados para el manejo, graficado y análisis de datos geoquímicos.

- GSS: Hoja de cálculo para su organización y verificación con varias herramientas menores de los demás programas como Gtplot y Spec8 que permite el análisis de datos directamente en la hoja.
- RXN: Especializado en el balanceo de reacciones químicas y el cálculo de constantes de equilibrio.
- Act2: Genera diversos diagramas (Pourbaix, fugacidad, estabilidad) para especies disueltas, útil para el análisis del comportamiento de soluciones.
- Tact: Generador de diagramas de temperatura-actividad y temperatura fugacidad.
- Spec8: Calculadora.
- Gtplot: Graficador simple.
- TEdit: Permite a usuarios editar las constantes termodinámicas que ocupa algún programa en sus operaciones.

Descargable en: [https://community.gwb.com/community\\_download.php](https://community.gwb.com/community_download.php)

- Visual MINTEQ

Software especializado en el modelaje de reacciones químicas, con un enfoque particular en la adsorción y formación de complejos con sitios de enlace superficiales.

Descargable en: <https://vminteq.com/download/>

- Quantum GIS

Sistema de información geográfica gratuito donde se pueden visualizar, manipular y generar datos con una ubicación geográfica dada. De igual manera permite la elaboración de medios gráficos para presentar los datos.

Descargable en: <https://qgis.org/download/>

- Google Sheets

Hoja de cálculo disponible en la paquetería de software de Google, permite la elaboración, edición y exportación de hojas de cálculo.

Los ejercicios contemplan el mapeo y reconocimiento de la distribución espacial de los datos; el ploteo de datos en gráficas y la interpretación de procesos de contaminación ambiental; y la clasificación litológica para el modelado de distribución de yacimientos.

Con la finalidad de que el alumnado se familiarice con los conceptos vistos en clase y el entorno geológico en el que se desempeñarán como profesionistas, se ha hecho el esfuerzo de presentar casos ocupando datos únicamente de México, procurando una distribución a lo largo del país.

Se ha documentado ampliamente en la literatura (Teach The Earth, s.f.) que la enseñanza-aprendizaje con datos y modelado en el ámbito de las geociencias tiene resultados positivos sobre el desarrollo de habilidades computacionales y en la visualización e interpretación de datos dentro de un entorno real.

El material didáctico propuesto promoverá el desarrollo de competencias clave para la profesión, como habilidades computacionales y de visualización, interpretación y comprensión de datos en contextos reales.

Finalmente, cada ejercicio requiere de material digital elaborado en los diversos programas el cual viene en el Anexo 1, en caso de no tener acceso a este, se agrega la liga a un Google Drive donde estos pueden ser descargados en formato ".zip": [https://drive.google.com/file/d/1SR4e8I5sp3i8\\_fk7wM3LXIFG5qvr3kU/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1SR4e8I5sp3i8_fk7wM3LXIFG5qvr3kU/view?usp=sharing)

## EJERCICIOS

## **1. Movilidad del arsénico en sistemas acuosos: análisis con diagramas Eh-pH**

En este ejercicio elaborarán y analizarán diagramas Eh-pH para evaluar la movilidad del arsénico en un sistema acuoso real. A partir de su interpretación, identificarán las especies predominantes y analizarán cómo las condiciones de pH y de potencial redox influyen en la movilidad o inmovilización del arsénico.

### **Contexto del problema**

Los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) incluyen metales y metaloides capaces de bioacumularse, representando riesgos para la salud humana incluso a bajas concentraciones. Entre ellos se encuentran el arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn). Estos elementos pueden incorporarse al agua destinada al consumo humano tanto por fuentes naturales como por actividades mineras, industriales o domésticas. En México, los límites máximos permisibles para agua destinada al consumo humano están establecidos en la NOM-127-SSA1-2021.

### **1. Investigación previa**

Antes de proceder con el análisis del caso, investiguen y respondan las siguientes preguntas, indicando las fuentes de información consultadas.

- a) ¿Cuál es el límite máximo permisible de arsénico en agua destinada al consumo humano según la normativa vigente en México?
- b) Mencionen algunos de los efectos más comunes del arsénico sobre la salud humana.
- c) Con base en sus conocimientos previos sobre la química de sistemas acuosos, mencionen algunos parámetros fisicoquímicos que pueden afectar la movilidad de los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) en el agua.

### **Caso de estudio: Matehuala, San Luis Potosí**

Matehuala, San Luis Potosí, es una ciudad con una larga tradición minera que se remonta a épocas prehispánicas. No obstante, fue durante el auge minero de Real del Catorce, hacia 1770, cuando comenzó a consolidarse como un centro productivo importante en la región (Martínez-Romero, 2025).

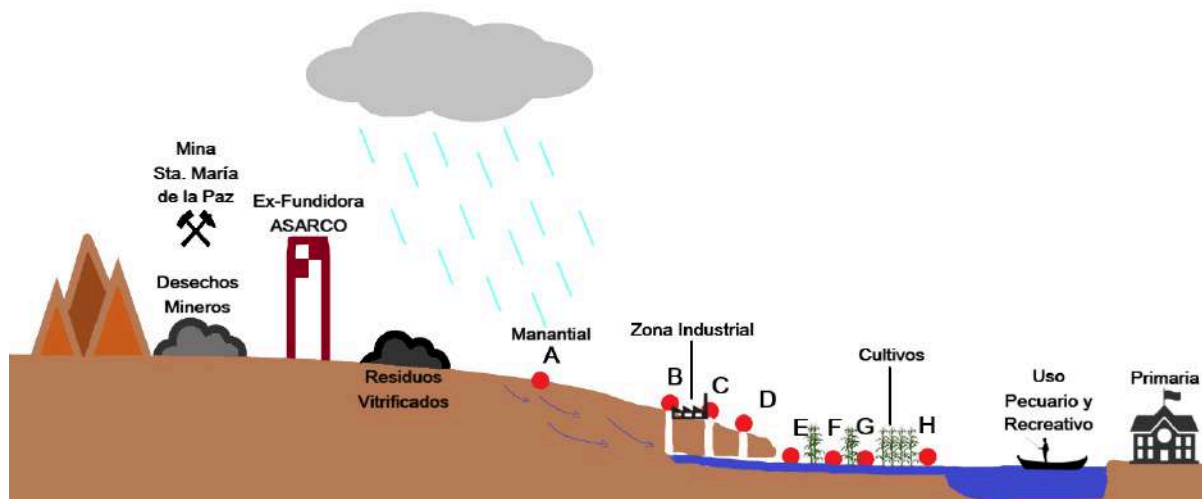
Durante el Porfiriato, el impulso a la actividad minera se fortaleció con la llegada de empresas como Guggenheim y ASARCO, que construyeron ferrocarriles para facilitar el transporte del mineral extraído. En este contexto de expansión industrial, en 1909 se estableció la fundidora de Matehuala, la cual operó hasta 1948 (H. Ayuntamiento de Matehuala, 2009).

Tras el cierre de la fundidora, los residuos ricos en arsénico y otros metales pesados generados durante décadas de operación fueron sometidos a un proceso de vitrificación y se depositaron en un lote baldío ubicado al noroeste de la ciudad, hoy conocido como "El Grasero".

Si bien la vitrificación es un método eficaz para inmovilizar metales pesados, su efectividad depende de que el arsénico forme fases estables asociadas al hierro. Sin embargo, debido a que los yacimientos de la región están alojados en calizas y evaporitas, se ha planteado que el arsénico pudo haber reaccionado preferentemente con calcio, formando arseniatos de calcio, compuestos potencialmente solubles en condiciones ambientales. Esta posibilidad abre un escenario de riesgo potencial para el entorno.

Ante esta preocupación, se realizó un muestreo y análisis químico del agua en un canal de abastecimiento que nace en el lote donde fueron depositados los residuos, atraviesa zonas industriales al sur de Matehuala y desemboca en un estanque de uso recreativo (Martínez-Villegas et al., 2013; McCauley-Whiteker, 2021).

La figura muestra el contexto del área de estudio y la ubicación de los sitios de muestreo de agua, mientras que en la tabla se presentan los valores de Eh (V), pH y las concentraciones (mg/l) de As, Ca, Fe,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  para los diferentes sitios de muestreo (A-H).



Sitio Muestreo	A	B	C	D	E	F	G	H
Ca	450.42	472.92	464.08	451.15	458.85	443.62	438.08	440.69
Fe	0.12	0.25	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08
$\text{HCO}_3^-$	250	240	246	242	237	210	156	98.8
$\text{SO}_4^{2-}$	1600	1590	1460	1570	1560	1290	1600	1690
As	91.51	11.27	11.69	11.42	11.26	11.18	10.52	10.69
pH	6.83	6.78	6.73	7.06	7.1	7.39	8.22	8.2
Eh	0.201	0.198	0.209	0.209	0.209	0.208	0.204	0.206

## 2. Análisis preliminar de los datos

- Comparen las concentraciones de arsénico reportadas en cada sitio de muestreo con el límite máximo permisible establecido en la normativa mexicana vigente para agua potable. ¿Todos los sitios cumplen con este criterio?
- En los casos en que las concentraciones excedan el límite normativo, propongan posibles fuentes del arsénico detectado, considerando tanto fuentes naturales como antrópicas.
- Analicen la distribución espacial de las concentraciones de arsénico a lo largo del canal. ¿Se observa un patrón definido? ¿Las concentraciones más elevadas se localizan en las proximidades de alguna fuente potencial previamente identificada?
- Considerando los valores de pH y Eh reportados en la tabla, describan de manera preliminar las condiciones geoquímicas del sistema (por ejemplo, si se trata de un

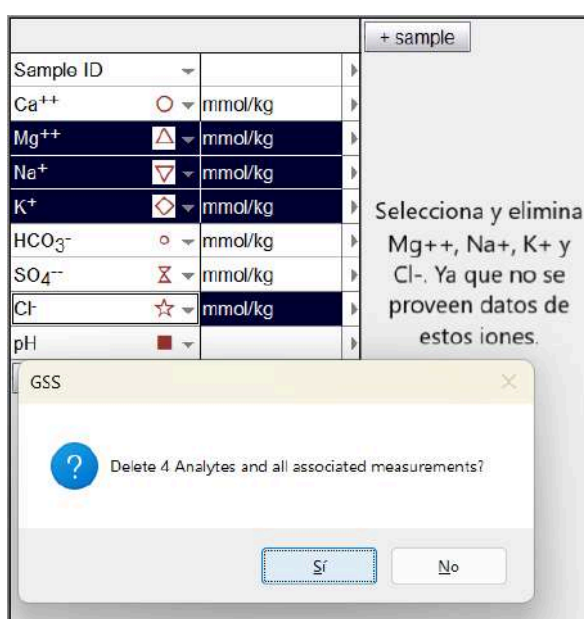
ambiente relativamente oxidante o reductor y si el agua presenta condiciones ácidas, neutras o alcalinas).

### 3. Modelado geoquímico con Geochemist's Workbench

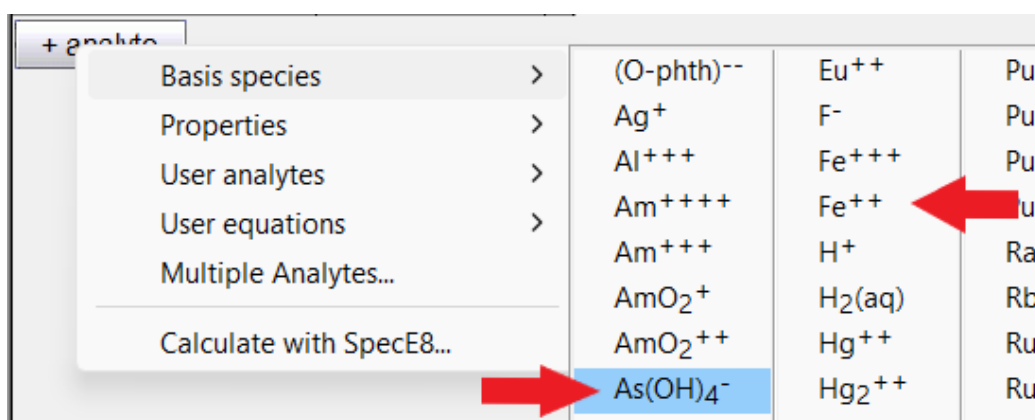
Con base en los datos de muestreo, seleccionen el sitio con la mayor concentración de arsénico y el sitio con la menor. Para ambas muestras elaborarán diagramas Eh-pH de As, Ca y Fe mediante el software Geochemist's Workbench, con el fin de evaluar el comportamiento geoquímico del arsénico en el sistema.

#### Preparación de los datos en Geochemist's Workbench

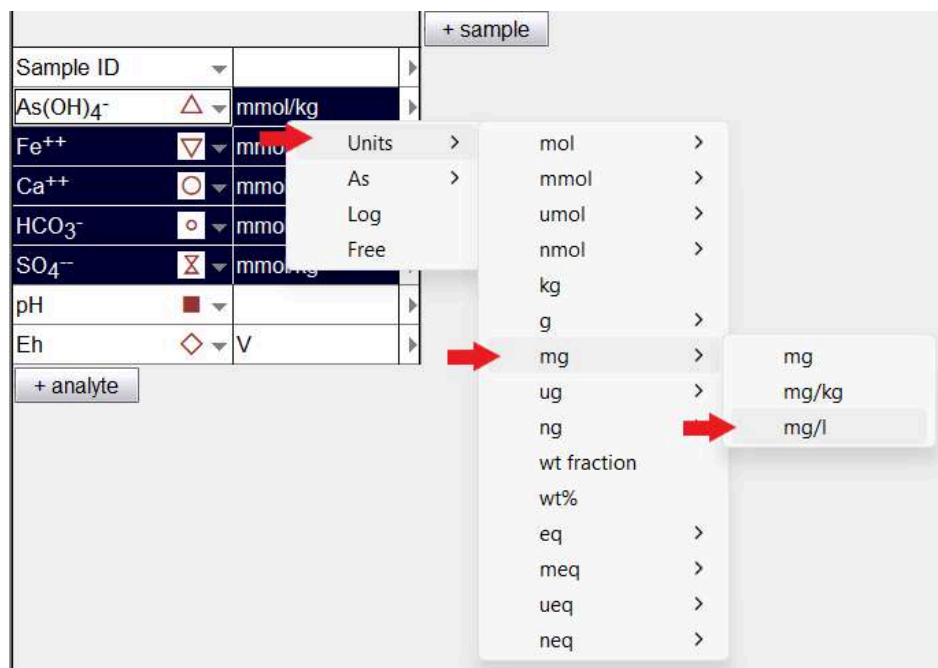
- Abran Geochemist's Workbench e inicien GSS.
- Eliminen las filas correspondientes a  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  y  $Cl^-$ . Debido a que el basamento está conformado por evaporitas de yeso y calizas, el sistema hidrogeoquímico corresponde a un agua sulfatada cálcica, por lo que se considerarán únicamente los iones mayoritarios  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$ .



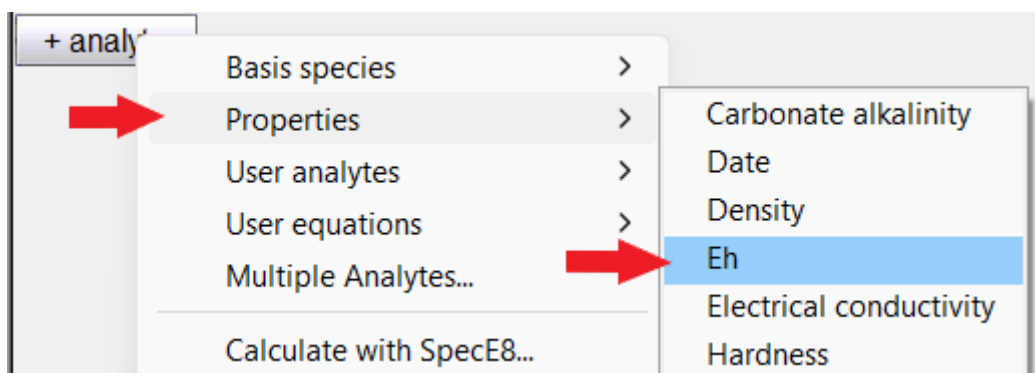
- Hagan clic en "+ analyte" y, en el apartado "Basic species", agreguen  $Fe^{2+}$  y  $As(OH)_4^-$ .



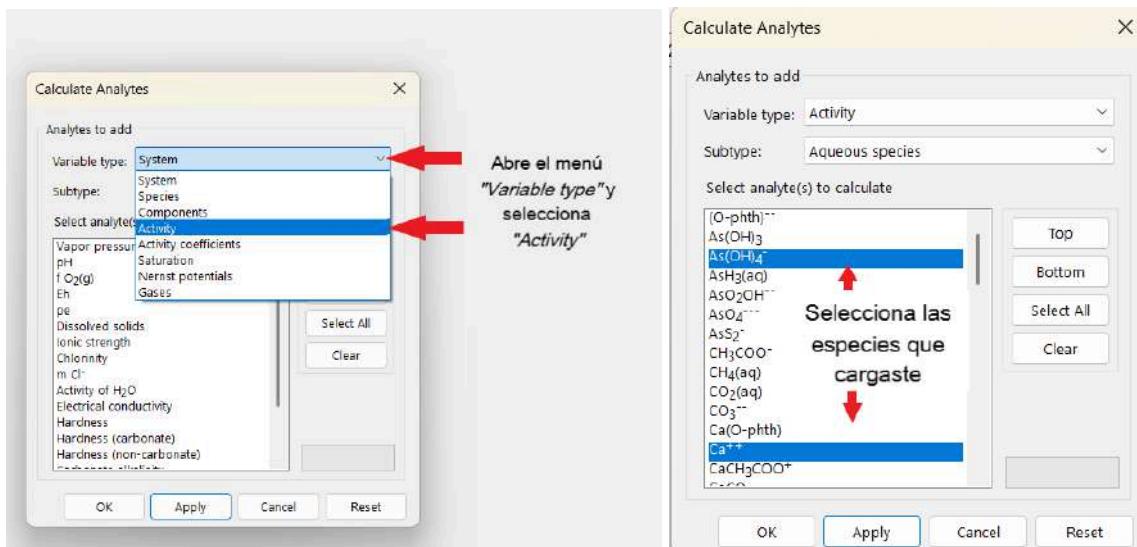
- Seleccionen unidades de mg/l.



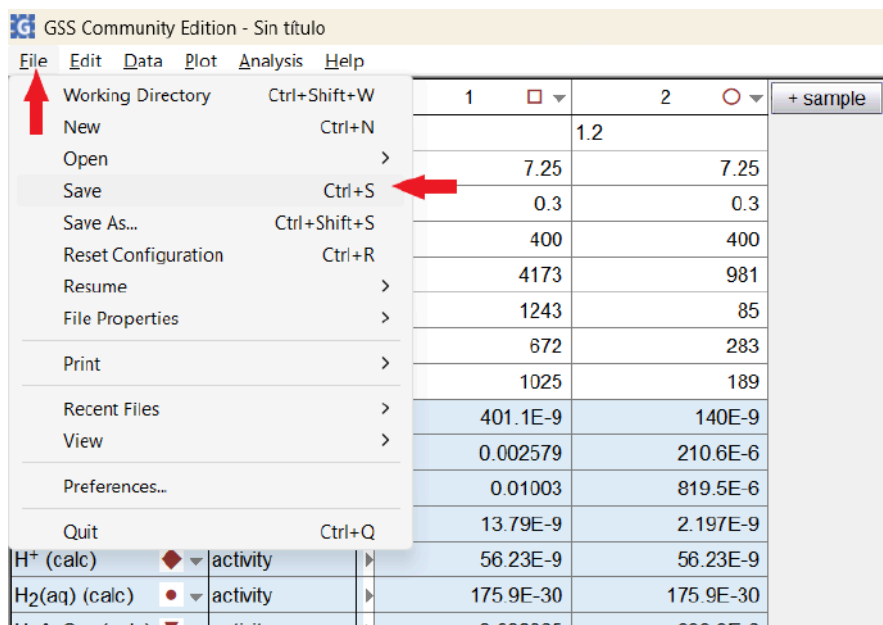
- Nuevamente, hagan clic en "+ analyte" y, en el apartado "Properties", seleccionen Eh con unidades en volts (V).



- Hagan clic en "+ sample" para agregar dos columnas. En cada una, ingresen el nombre de la muestra con mayor y menor concentración de As e introduzcan las concentraciones de los aniones y cationes correspondientes, así como los valores de pH y Eh.
- En la pestaña "Analysis", seleccionen "Calculate with Spec8...". En la ventana que se abre, cambien "Variable type" a "Activity". En el cuadro "Select analyte(s) to calculate", seleccionen  $\text{As(OH)}_4^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  y hagan clic en "OK" para calcular la actividad de esas especies.

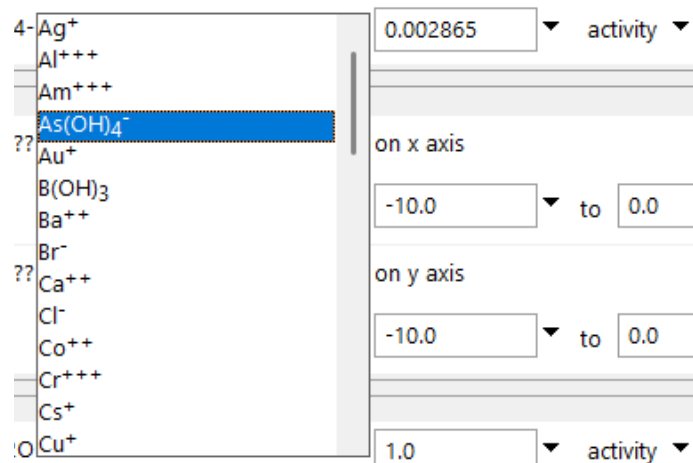


- En la pestaña "File" de la barra superior, seleccionen la opción "Save" para guardar el archivo en su computadora. Nombren el archivo como "1. Tabla de datos. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenlo en una carpeta llamada "Actividad 1. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2".

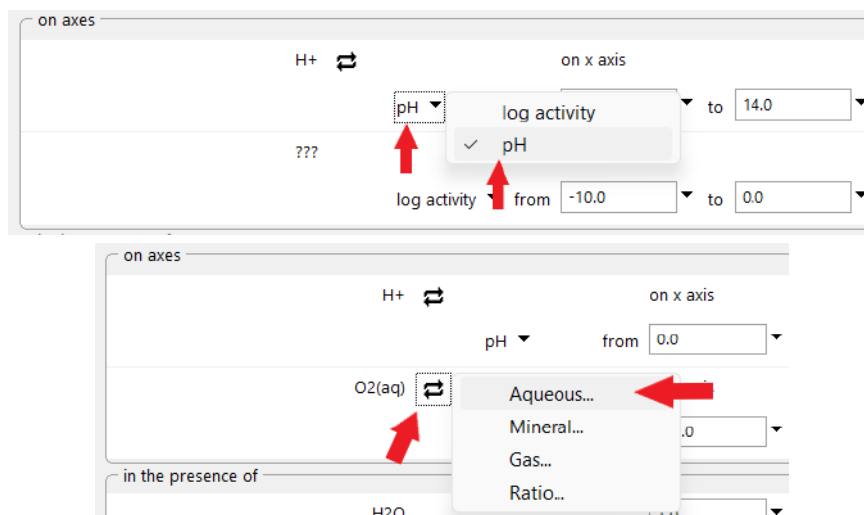


Construcción de los diagramas Eh-pH de As, Ca y Fe para la muestra con mayor concentración de As

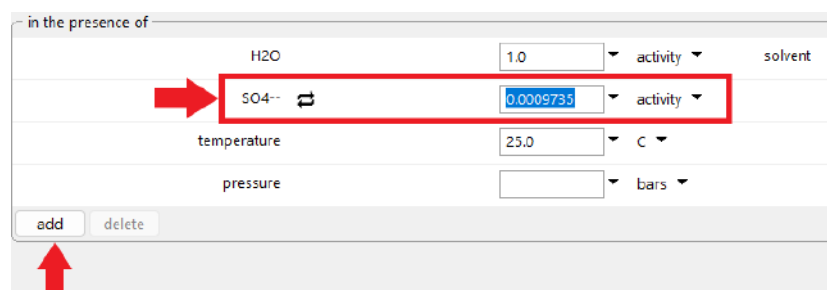
- En Geochemist's Workbench, abran Act2.
- En el recuadro "diagram species" de la pestaña "Basis", hagan clic en "???", seleccionen  $As(OH)_4^-$  e introduzcan la actividad calculada previamente para la muestra considerada.



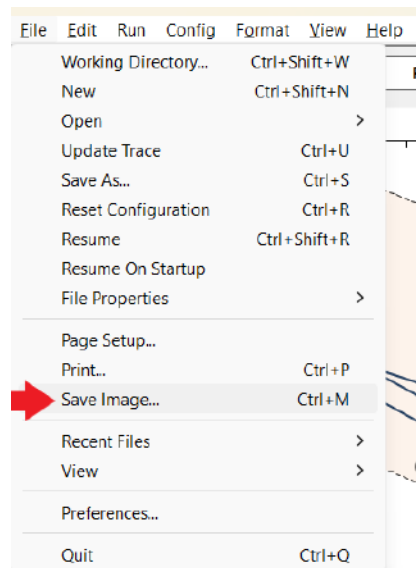
- En el recuadro "on axes", configuren el eje x dando clic en "???", seleccionen H<sup>+</sup> y cambien la variable a pH. Ajusten el incremento a 1 para mejorar la visualización. Para el eje y, hagan clic en "???", seleccionen O<sub>2</sub>(aq), den clic en las flechas de intercambio, seleccionen la opción "Aqueous...", elijan "e<sup>-</sup>" y configuren la variable como Eh.



- En el recuadro "in the presence of", hagan clic en "add", seleccionen SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e introduzcan la actividad calculada. Repitan el procedimiento para las otras especies de interés (Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).



- En la pestaña "Plot", visualicen el diagrama Eh-pH para As. En la pestaña "File" de la barra superior, seleccionen "Save image..." para guardar la imagen en su computadora. Nombren la imagen "1. Eh-pH As high. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenla en la carpeta generada.



- Regresen a la pestaña "Basis" y seleccionen ahora  $\text{Ca}^{2+}$  en el recuadro "diagram species".
- En la pestaña "Plot", visualicen el diagrama Eh-pH para Ca. Guarden la imagen como "1. Eh-pH Ca high. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenla en la carpeta.
- Regresen nuevamente a la pestaña "Basis" y seleccionen  $\text{Fe}^{2+}$  en el recuadro "diagram species".
- En la pestaña "Plot", visualicen el diagrama Eh-pH para Fe. Guarden la imagen como "1. Eh-pH Fe high. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenla en la carpeta.

Construcción de los diagramas Eh-pH de As, Ca y Fe para la muestra con menor concentración de As

- Repitan el procedimiento anterior utilizando los datos de esta segunda muestra. Guarden los archivos de la misma forma, sustituyendo la palabra "low" a "high".

**4. Interpretación de los diagramas Eh-pH**

- Inserten los diagramas Eh-pH generados para cada muestra en el espacio siguiente y utilícenlos como base para responder las siguientes preguntas.
- Al comparar los diagramas Eh-pH de arsénico de los dos sitios, ¿se observan diferencias en las fases minerales estables o en las especies disueltas predominantes? Descríbanlas.
- ¿Cómo pueden explicarse esas diferencias?
- ¿Cuál es la especie predominante de arsénico bajo las condiciones de pH y Eh de las dos aguas muestreadas y qué estado de oxidación tiene?
- Al comparar los diagramas Eh-pH de Ca y Fe con los de As, ¿aparecen fases minerales con arsénico que no se observen en el diagrama Eh-pH de As?
- ¿Qué indica la presencia de minerales de As en los diagramas Eh-pH de Ca y Fe acerca de los mecanismos que pueden controlar la movilidad del arsénico?
- Con base en los diagramas Eh-pH, indiquen qué cambios en las condiciones de pH y/o Eh podrían favorecer la inmovilización del arsénico. Justifiquen su respuesta señalando las fases minerales que se estabilizan bajo esas condiciones.

**Referencias**

- H. Ayuntamiento de Matehuala (2009). Plan de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Matehuala.

- Martínez Romero, D. (2025). Matehuala: poblamiento e incorporación de una frontera de la América septentrional a la Monarquía Hispánica, 1600-1750. El Colegio de San Luis / Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social.
- Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J., Avalos-Borja, M., Castañón-Sandoval, A., Razo-Flores, E., y Villalobos, M. (2013). Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem. *Environmental Pollution*, 176, 114-122.
- McCauley-Whiteker, J. (2021). Evaluación de diferentes materiales geológicos para la retención de arsénico acuoso de los cuerpos de agua contaminados de Matehuala, San Luis Potosí, México. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

## 2. Meteorización química, distribución de elementos y exploración mineral

Los procesos de meteorización química liberan y movilizan elementos, dando lugar a patrones de distribución en suelos y sedimentos. En esta actividad analizarán la distribución de elementos en sedimentos fluviales mediante la elaboración de mapas en QGIS, con el fin de interpretar patrones de enriquecimiento geoquímico, delimitar zonas con potencial mineral y discutir sus posibles implicaciones ambientales.

### Contexto de la exploración geoquímica

El flujo de trabajo en la exploración minera inicia con la revisión de la información geológica disponible para una región, como artículos científicos, reportes de campo, mapas e imágenes satelitales. Con base en esta información, se definen zonas de interés donde se realizan estudios litológicos, geofísicos y geoquímicos, con el fin de delimitar áreas con alto potencial para alojar los recursos buscados.

Debido a que los recursos minerales no suelen estar expuestos en la superficie, es común utilizar evidencia indirecta para su exploración. En este sentido, la geoquímica resulta fundamental, pues permite analizar distintos medios geológicos (suelos, sedimentos, agua, rocas e incluso plantas) para identificar indicios de estos recursos sin recurrir a maquinaria de gran escala, como la perforación a diamante, o a metodologías de alto costo, como la prospección sísmica.

### 1. Conceptos clave: elementos pathfinder y exploración geoquímica

Lean el archivo "Elementos pathfinder" de la carpeta "Ejercicio 2" y respondan las siguientes preguntas.

- ¿Qué son los elementos pathfinder y qué características los hacen útiles para la exploración de yacimientos?
- ¿Cuáles son los elementos pathfinder más relevantes para yacimientos hidrotermales de vetas de metales preciosos (Au y Ag) y de base (Cu, Zn y Pb)?

### Caso de Estudio: Sierra Gorda, Querétaro.

En la Sierra Gorda de Querétaro se han explotado yacimientos hidrotermales desde tiempos prehispánicos. Una compañía que busca un yacimiento hidrotermal de metales preciosos y de base en la región ha realizado una campaña de muestreo geoquímico de sedimentos fluviales. La tabla siguiente presenta la ubicación de los puntos de muestreo, así como la composición de elementos traza de los sedimentos recolectados (concentraciones en mg/kg o partes por millón, ppm, en el caso de metales base, sus cantidades se reportan en porcentaje por convención; Gray, 2005).

Muestra	X	Y	As (ppm)	Sb (ppm)	Li (ppm)	Sr (ppm)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)
C263474	-99.87114	21.04128	17	2.4	42.6	169	0.00214	0.00215	0.00898
C263473	-99.84133	21.04463	17	2.8	43.6	205	0.00732	0.00202	0.01
C263479	-99.84133	21.04463	19	2.7	48.2	197	0.00125	0.00205	0.00949
C263475	-99.64424	20.952208	33	10.6	23	421	0.00487	0.00217	0.0119
C263476	-99.64646	20.95683	42	18.5	25.1	549	0.00312	0.00449	0.0913
C263465	-99.61057	20.95697	86	24.4	16.9	346	0.00305	0.0143	0.0183

Muestra	X	Y	As (ppm)	Sb (ppm)	Li (ppm)	Sr (ppm)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)
C263474	-99.87114	21.04128	17	2.4	42.6	169	0.00214	0.00215	0.00898
C263473	-99.84133	21.04463	17	2.8	43.6	205	0.00732	0.00202	0.01
C263466	-99.61503	20.96799	60	27.6	19.2	300	0.00429	0.0109	0.0193
C263467	-99.61641	20.96937	74	31.4	18.2	313	0.00263	0.0164	0.0181
C263477	-99.61393	20.96854	57	12.6	19.5	415	0.00248	0.00178	0.0113
C263478	-99.61393	20.96854	53	11.7	20.2	424	0.00214	0.00177	0.0107
C263471	-99.60178	21.06551	29	4.8	8.1	166	0.00178	0.00099	0.00568
C263472	-99.61733	21.03669	21	5.8	24.2	290	0.00295	0.00116	0.00825
C263468	-99.60176	21.03169	21	5.9	34.9	391	0.00395	0.00148	0.0107
C263470	-99.58612	21.03418	17	8.4	26.8	372	0.00167	0.00124	0.00593

## 2. Análisis cuantitativo: factores de enriquecimiento

En esta sección calcularán el factor de enriquecimiento (FE) de los elementos en los sedimentos muestreados, con el fin de evaluar su enriquecimiento respecto a los valores promedio de la corteza superior.

- Abran el archivo Excel incluido en la carpeta "Ejercicio 2".
- Ya está calculado el FE de cada elemento por medio de la fórmula  $FE_{\text{elemento}} = C_{\text{muestra}} / C_{\text{corteza superior}}$ .
- Eliminen la fila 16, de modo que la hoja de cálculo contenga únicamente los FE para cada elemento y muestra. Guarden los cambios realizados.
- Guarden el archivo en formato ".csv" en la carpeta "Ejercicio 2".

## 3. Identificación de anomalías geoquímicas

- a) ¿Cuáles son los dos elementos que presentan FE más altos en los sedimentos analizados?

## 4. Interpretación geoquímica: movilidad y meteorización

- a) ¿Cuáles son los principales factores que controlan la tendencia de un elemento a movilizarse o a concentrarse en los sedimentos? Consideren tanto las propiedades del elemento (por ejemplo, su carga y radio iónico) como las condiciones fisicoquímicas del sistema (por ejemplo, pH y Eh) y los procesos de retención en sedimentos (como adsorción o precipitación). Expliquen brevemente cómo influyen estos factores.
- b) ¿Qué proceso de meteorización química podría explicar de la mejor manera la liberación de los elementos analizados en este sistema?

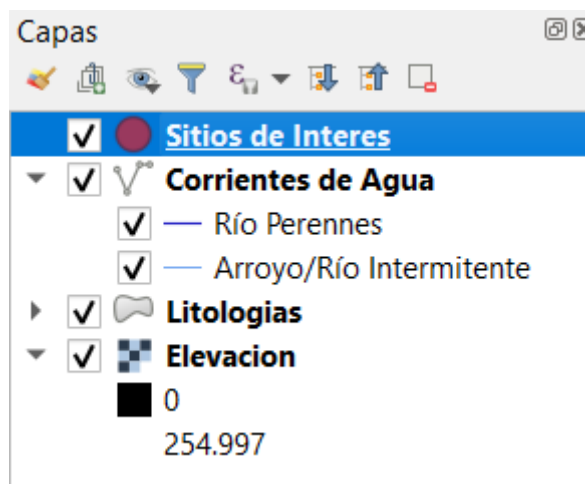
## 5. Selección de elementos pathfinder

- a) Con base en los FE obtenidos y en el contexto de yacimientos hidrotermales, seleccionen los dos elementos que consideren más adecuados como pathfinders. Argumenten su elección.

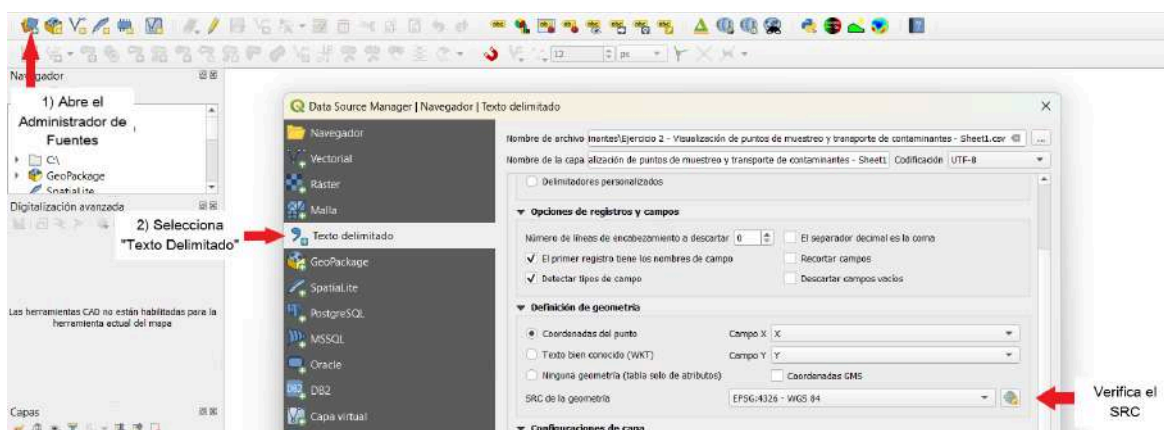
## 6. Análisis espacial de los patrones de enriquecimiento

A continuación, utilizarán el software QGIS 4.0 para visualizar la distribución espacial de los FE de los dos elementos pathfinder seleccionados.

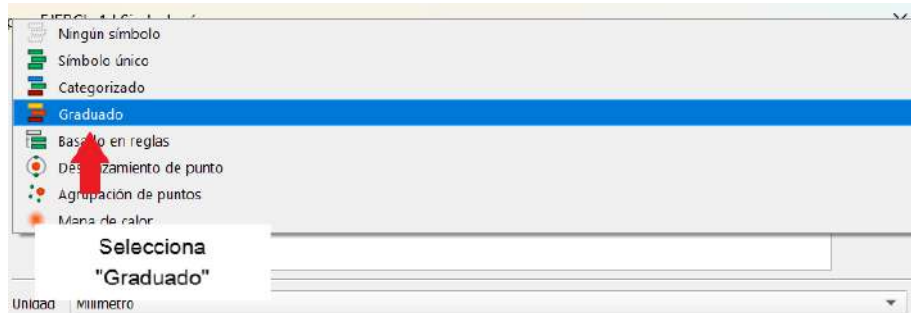
- En la carpeta "Ejercicio 2" encontrarán un archivo comprimido llamado "Ejercicio2". Extraigan su contenido en el Escritorio.
- En la carpeta extraída en el escritorio, localicen el archivo llamado "Ejercicio 2".
- En la barra superior, seleccionen "Ver", "Paneles" y activen la opción "Capas" para visualizar y manipular las capas del proyecto.
- Activen las capas "Litologías", "Elevación", "Corrientes de Agua" y "Sitios de Interés".



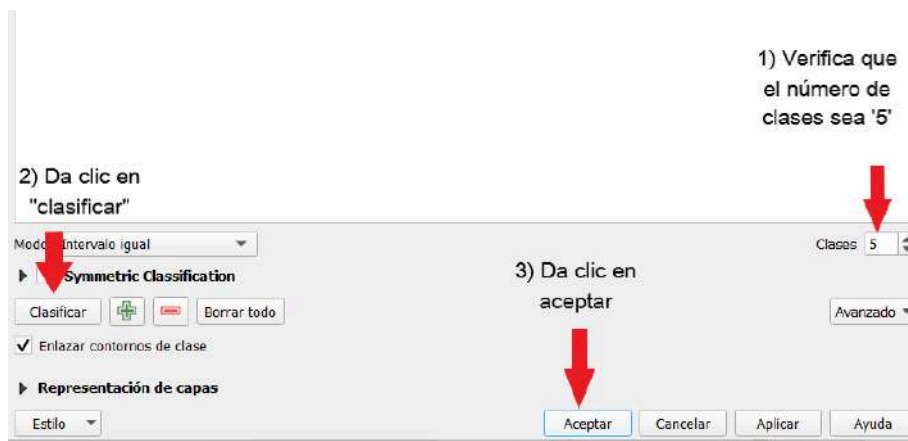
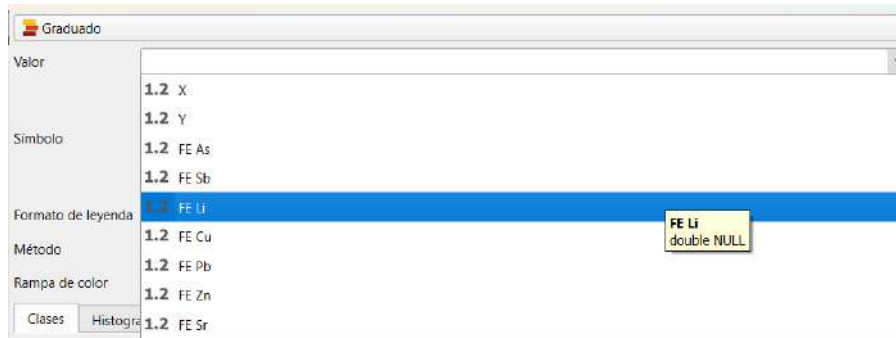
- Abran el administrador de fuentes de datos, que tiene el ícono de tres cuadros naranjas, amarillo y azul y seleccionen "Texto Delimitado".
- En "nombre de archivo", hagan clic en los tres puntos y seleccionen el archivo Excel "Ejercicio2.csv". Verifiquen que los campos X y Y correspondan correctamente y que el Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) sea el código EPSG 4326 (WGS 84). Den clic en "Añadir" para cargar los puntos de muestreo del proyecto.



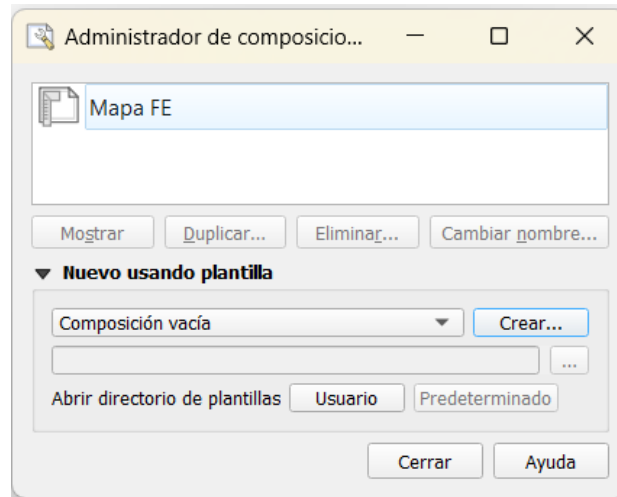
- Hagan doble clic en la capa "Ejercicio2" y entren a "Simbología". En la parte superior, cambien el tipo de simbología de "Símbolo Único" a "Graduado".



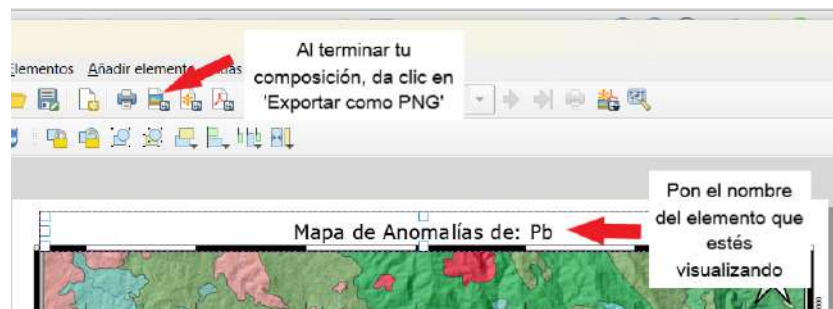
- En el campo "Valor", seleccionen el FE correspondiente a uno de los pathfinder. En el cuadrante inferior izquierdo, hagan clic en el botón "Clasificar" y generen 5 clases. Den clic en "Aceptar" y la ventana se cerrará automáticamente.



- Abran el administrador de composiciones (dos íconos a la derecha del ícono de guardado) y seleccionen la composición "Mapa FE". Den doble clic a la composición y den clic en el título para agregar el nombre del pathfinder seleccionado.



- Exporten la composición como imagen (den clic en el ícono inmediatamente a la derecha del ícono de impresora). Guarden la imagen como "Mapa FE elemento" en la carpeta "Ejercicio 2".



- Repitan el procedimiento para el segundo pathfinder.
- Peguen a continuación las dos imágenes generadas.

## 7. Interpretación del sistema natural

- Considerando que un  $FE > 2$  es de interés, identifiquen los sitios de muestreo con los valores más elevados para cada elemento pathfinder.
  - Pathfinder \_\_\_:
  - Pathfinder \_\_\_:
- b) Analicen la distribución espacial: ¿los valores elevados de los distintos pathfinders se concentran en los mismos sitios o se distribuyen de manera dispersa?
- c) Considerando que se trata de sedimentos de río y tomando en cuenta los procesos que los generan y transportan, ¿dónde es más probable que se localice un yacimiento: aguas arriba o aguas abajo de un sitio con valores elevados? Argumenten su respuesta.
- d) Indiquen en qué zona debería continuar la exploración (A, B, C o D) y argumenten su elección.
- e) Expliquen cómo el análisis geoquímico de sedimentos (FE y distribución espacial) permite identificar zonas con potencial mineral.

## 8. Implicaciones ambientales

Elemento	Límite Máximo Permisible
<b>As (ppm)</b>	22
<b>Sb (ppm)</b>	No establecido
<b>Li (ppm)</b>	No establecido
<b>Sr (ppm)</b>	No establecido
<b>Cu (%)</b>	0.0050
<b>Pb (%)</b>	0.0400
<b>Zn (%)</b>	No establecido

La NOM-021-RECNAT-2000 y la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 establecen valores máximos permisibles de metales en suelos en caso de que los contaminantes sean por aporte antropogénico, ocúpate como referencia. Metales base (Cu, Pb y Zn) en porcentaje por convención.

- ¿Existen sitios de muestreo con concentraciones que excedan los límites permisibles? En caso afirmativo, ¿qué implicaciones ambientales pueden tener concentraciones elevadas de estos elementos?
- ¿En qué medida estas concentraciones podrían ser resultado de procesos naturales de meteorización y no necesariamente de contaminación?

### Referencias:

- Gray, John E.(25/08/2005). NGDB sediment samples C263465 to C263474 (stream/river). USGS NGDB

### 3. Adsorción de Metales en Agua Contaminada: Modelación con Visual MINTEQ

En esta actividad analizarán un problema de contaminación del agua por elementos potencialmente tóxicos y evaluarán la capacidad de distintos minerales para adsorberlos. Para ello utilizarán el software de modelación geoquímica Visual MINTEQ, que permite simular interacciones entre especies disueltas y superficies minerales bajo diferentes condiciones fisicoquímicas. Con base en los resultados de las simulaciones, compararán la eficacia de distintos minerales para remover metales presentes en el agua y discutirán su posible aplicación en una estrategia de remediación ambiental.

#### **Caso de Estudio: Contaminación en el Río San Pedro, Aguascalientes.**

La cuenca del Río San Pedro cubre aproximadamente el 22% del territorio del estado de Aguascalientes. Este río atraviesa la capital estatal y constituye un elemento importante para la población y la actividad económica de la región. Posteriormente drena hacia el estado de Jalisco, donde recibe el nombre de Río Verde, y finalmente se integra al sistema del río Santiago.

El Río San Pedro también contribuye a la recarga del acuífero Valle de Aguascalientes, que es la principal fuente de abastecimiento de agua del estado. De este acuífero, el sector agrícola utiliza aproximadamente el 42.4% del agua disponible, mientras que el uso público urbano representa el 34.7%.

La calidad del agua del río se ha visto deteriorada por diversas actividades humanas. Entre las principales fuentes de contaminación se encuentran las descargas de agua para usos agrícolas, municipal e industrial, especialmente en los tramos cercanos a la capital estatal.

Diversos estudios han documentado la presencia de metales y metaloides potencialmente tóxicos en el río. Para analizar este problema se utilizarán datos reportados para arsénico (As), mercurio (Hg) y zinc (Zn), junto con algunos parámetros fisicoquímicos del agua. La tabla siguiente presenta las condiciones fisicoquímicas promedio del sistema, así como las concentraciones de los iones mayoritarios y los elementos de interés que se emplearán en las simulaciones con Visual MINTEQ.

<b>Propiedades Fisicoquímicas Promedio</b>	
<b>pH</b>	7.7
<b>Eh (mV)</b>	-158.6
<b>Iones mayores medidos en el Río San Pedro</b>	
<b>Ion</b>	<b>Concentración [mg/l]</b>
<b>Na<sup>+</sup></b>	137
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	88
<b>Cl<sup>-</sup></b>	103
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	115
<b>As</b>	0.51
<b>Hg</b>	0.02

<b>Zn</b>	0.72
-----------	------

### **Estrategia de Remediación Propuesta**

Aunque existen seis plantas de tratamiento de agua residual en la ciudad de Aguascalientes, estas no logran tratar todo el volumen de agua municipal generado. Como complemento, se ha propuesto evaluar el uso de barreras de arcilla construidas con sedimentos locales, con el objetivo de disminuir la concentración de metales presentes en el agua. Las barreras de arcilla son estructuras formadas por sedimentos muy finos que, debido a su pequeño tamaño de grano y a la gran superficie específica de los minerales que contienen, pueden adsorber iones disueltos en sus superficies, reduciendo así su concentración en el agua que las atraviesa. Para evaluar esta estrategia se han estudiado sedimentos provenientes de tres sitios cercanos a la ciudad (sitios A-C) y se han analizado las propiedades de adsorción de los minerales presentes.

<b>Sitio</b>	<b>Sedimento Disponible</b>
<b>A</b>	Ferrhidrita
<b>B</b>	Montmorilonita (CIC = 470 mmol/l)
<b>C</b>	Ferrhidrita+Montmorillonita (CIC = 470 mmol/l)

#### **1. Exploración Conceptual Inicial**

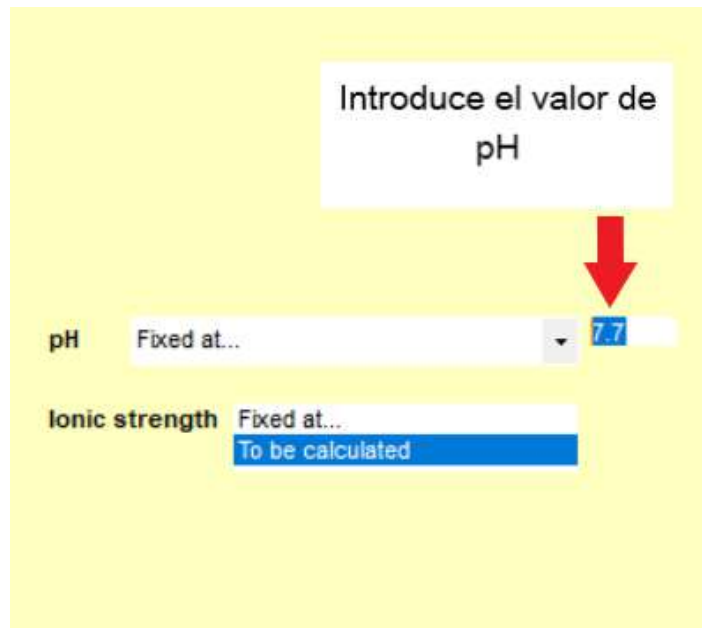
- a) Antes de realizar las simulaciones, mencionen y describan brevemente algunos factores fisicoquímicos del sistema acuoso o del mineral que pueden influir en la adsorción de especies disueltas. Consideren, por ejemplo, el pH o Eh del agua, el tipo de mineral y las propiedades de su superficie, la especiación química de los metales o la presencia de otros iones mayoritarios en solución.

#### **2. Simulación Geoquímica con Visual MINTEQ**

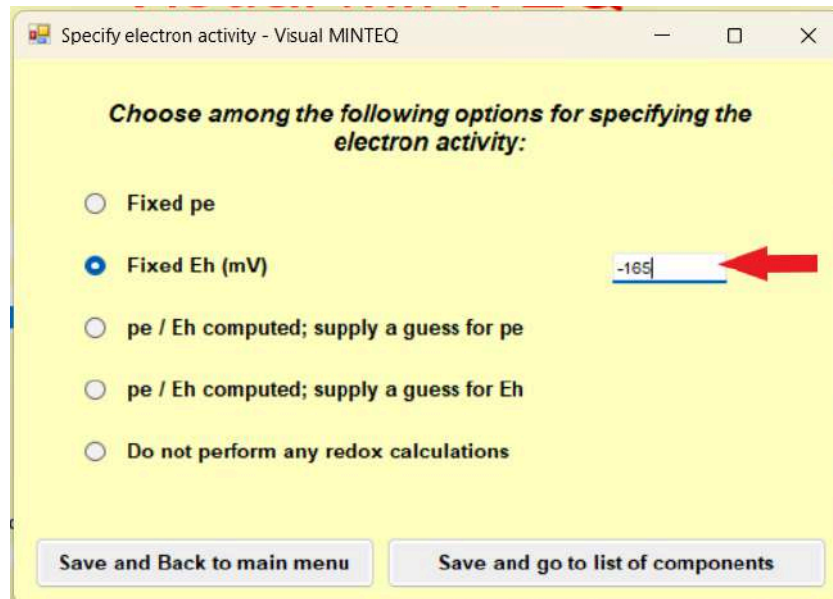
En las simulaciones con Visual MINTEQ evaluarán la adsorción de As, Hg y Zn en distintos minerales presentes en los sedimentos estudiados. En el caso de los minerales arcillosos, se considera su capacidad de intercambio catiónico (CIC), que representa la cantidad de cationes que un material puede retener mediante procesos de intercambio iónico. En Visual MINTEQ, este parámetro se utiliza para definir el número de sitios de carga fija disponibles para el intercambio catiónico, que representan los sitios de adsorción del mineral en el modelo. En el caso de los oxi-hidróxidos de hierro, la adsorción se describe mediante modelos de complejación de superficie ya implementados en el programa. Estos modelos permiten simular la formación de complejos entre las especies disueltas y los grupos reactivos presentes en la superficie del mineral, por lo que se utilizarán directamente en las simulaciones.

#### Procedimiento

- Abran Visual MINTEQ 3.1.
- En el rubro de pH abran el menú desplegable y seleccionen "*Fixed at...*" e introduzcan el valor de pH medido.



- Ocupen las teclas Ctrl+E o abran el menú "Parameters" y seleccionen "Specify pe and Eh", seleccionen "Fixed Eh (mV)" e introduzcan el valor de Eh de la muestra. Den clic en "Save and Back to main menu".



- En el recuadro "Concentration unit", bajen en el menú hasta llegar a mg/l y seleccionenlo.
- En "Add Components" seleccionen As(III), introduzcan su concentración y den clic en "Add to list".
- Repitan el procedimiento para Hg(II), Zn<sup>2+</sup> y los iones mayoritarios (Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

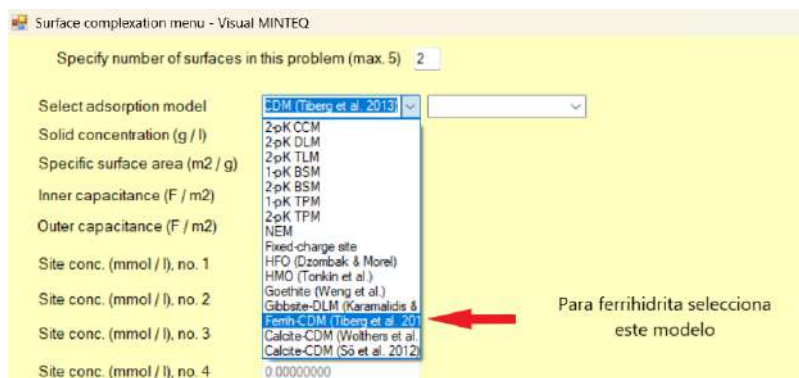
- Al finalizar, seleccionen "View/edit list" para verificar que todos los valores se hayan registrado correctamente. Es normal que H+ y e- aparezcan en la lista, ya que el programa los añade automáticamente al definir pH y Eh.



- En el menú "Adsorption" de la barra superior, seleccionen "Surface complexation reactions".
- En la nueva ventana, introduzcan el número de minerales que emplearán (1 para los sitios A y B; 2 para el sitio C). Empiecen con el sitio A (1).



- Seleccionen el modelo correspondiente para cada mineral. Para la ferrihidrita (sitios A y C) usen modelo Ferrih-CDM de Tiber et al. (2013). Utilicen una concentración de sólido de 0.05 g/l. Para las arcillas (sitios B y C), seleccionen "Fixed-charge Site" e introduzcan la CIC correspondiente en el recuadro "Fixed-charge site (mmol/l)".



Specify number of surfaces in this problem (max. 5)

Select adsorption model

Solid concentration (g / l)

Specific surface area (m2 / g)

Inner capacitance (F / m2)

Outer capacitance (F / m2)

Site conc. (mmol / l), no. 1

Site conc. (mmol / l), no. 2

Site conc. (mmol / l), no. 3

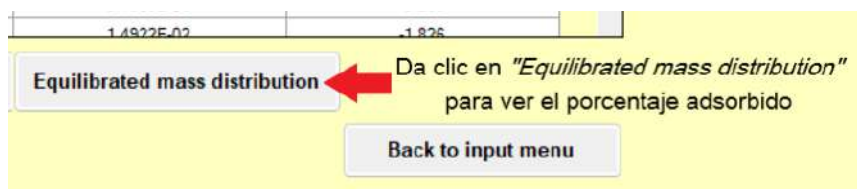
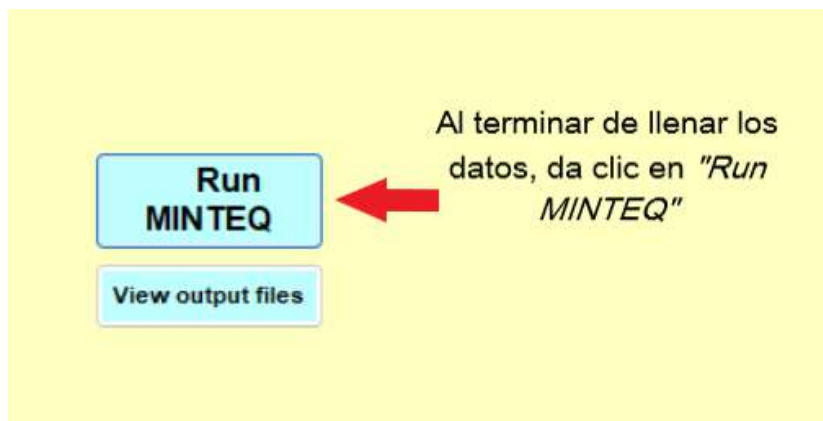
Site conc. (mmol / l), no. 4

Fixed-charge site (mmol / l)

**Para oxi-hidróxidos, en este ejercicio considera 0.05 [g/l]**

**Introduce la CIC de la arcilla que consideres**

- Después de ingresar la información del sitio correspondiente, seleccionen "Save and back to main menu".
- Ejecuten la simulación dando clic en "Run MINTEQ". Consulten los resultados en "Equilibrated mass distribution", den clic en "Print to Excel" y guarden el archivo como "3. Sitio X. Escenario 1. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2".



- Den clic en "Back to input menu" y repitan el procedimiento para cada material evaluado (sitios A-C).

## Resultados

En la tabla siguiente, anoten el porcentaje de As, Hg y Zn adsorbido en cada material evaluado.

Escenario 1 (pH = 7.7)				
Sitio	Material	%As Adsorbido	%Hg Adsorbido	%Zn Adsorbido
A	Ferrhidrita			
B	Montmorillonita			
C	Ferrhidrita+Montmorillonita			

En condiciones de sequía, cuando disminuye el caudal del río y se concentran las descargas industriales y urbanas, se han registrado valores de pH cercanos a 5 para el agua del río. Para evaluar cómo podría afectar este cambio a la eficacia de los materiales evaluados, modelen un segundo escenario con pH = 5. Reporten los nuevos resultados en la tabla siguiente.

Escenario 2 (pH = 5)				
Sitio	Material	%As Adsorbido	%Hg Adsorbido	%Zn Adsorbido
A	Ferrhidrita			
B	Montmorillonita			
C	Ferrhidrita+Montmorillonita			

### 3. Preguntas de análisis e interpretación de resultados

- Comparen el comportamiento del oxi-hidróxido de hierro (ferrihidrita) y del mineral arcillosos (montmorillonita). ¿Qué diferencias observan en la adsorción de As, Hg y Zn?
- Al comparar ambos escenarios de pH, identifiquen qué metal o metaloide muestra la mayor disminución de adsorción y en qué mineral se observa más claramente este cambio cuando el pH baja a 5. Expliquen por qué ocurre este cambio considerando la competencia con  $H^+$  y la carga superficial de los minerales.
- En el agua del río también están presentes iones mayoritarios como  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$ . Expliquen cómo la presencia de estos iones podría influir en la adsorción de los metales y metaloides potencialmente tóxicos en las superficies minerales.
- La caolinita es un mineral 1:1 y la montmorillonita es un mineral 2:1. Expliquen por qué no se consideró a la caolinita como material de adsorción. Tomen en cuenta cómo estas diferencias estructurales influyen en su CIC y en su capacidad de adsorber metales.
- Con base en los resultados obtenidos en ambos escenarios de pH, ¿qué material o combinación de materiales recomendarían para construir una barrera de remediación en el Río San Pedro? Justifiquen su respuesta comparando la adsorción de As, Hg y Zn y considerando la posible variabilidad de las condiciones del sistema.

### Referencias

- Guzmán-Colis, G, Ramírez-López, EM, Thalasso, F, Rodríguez-Narciso, S, Guerrero-Barrera, AL, & Avelar-González, FJ. (2011). Evaluación de contaminantes en agua y sedimentos del río San Pedro en el Estado de

Aguascalientes. Universidad y ciencia, 27(1), 17-32. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792011000100002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792011000100002&lng=es&tlng=es).

- García-Portillo, V. D. (06-2011). Estudio sobre la estabilidad de la inmovilización de metales pesados, en sedimentos del cauce del río San Pedro. Tesis de Maestría en Toxicología, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Recuperado de: <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/777>
- Secretaría General del Gobierno de Aguascalientes. (19/07/2022). Plan Hídrico Estatal 2021-2050 del Estado de Aguascalientes. Recuperado de: <https://eservicios2.aguascalientes.gob.mx/NormatecaAdministrador/archivos/ED0-23-180.pdf>
- Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas. (2024). ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VENADERO (0104), ESTADO DE AGUASCALIENTES. CONAGUA. Recuperado de: [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/Aguascalientes/DR\\_0104.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/Aguascalientes/DR_0104.pdf)

#### **4. Evolución magmática y enriquecimiento en tierras raras (REE): implicaciones para la exploración**

En esta actividad analizarán datos geoquímicos de elementos mayores y REE de rocas ígneas con el propósito de relacionar su composición con los procesos de evolución magmática. A partir de la construcción de diagramas TAS y multielementales de REE, clasificarán las rocas, identificarán patrones geoquímicos, interpretarán la diferenciación del sistema y evaluarán su implicación en la concentración de elementos de interés económico.

##### **Contexto del problema**

Las REE (Sc, Y y lantánidos) son un grupo de elementos de gran importancia estratégica debido a su uso en tecnologías avanzadas. Aunque sus concentraciones promedio en la corteza terrestre son relativamente bajas (0.32-33 ppm; Brown y Rushmer, 2006), pueden enriquecerse en ciertos sistemas magmáticos. Las REE se explotan comúnmente en minerales como bastnasita [(Ce,Nd,Y,REE)(CO<sub>3</sub>)F], monacita [REE(PO<sub>4</sub>)] y xenotima [Y(PO<sub>4</sub>)], los cuales suelen presentarse como fases accesorias en rocas graníticas muy evolucionadas o en rocas ígneas alcalinas derivadas de bajos grados de fusión del manto.

##### **Caso de estudio: Sierra La Vasca, Coahuila**

En México, se han explorado diversas regiones con el fin de identificar depósitos potenciales de REE. Una de ellas es la Sierra La Vasca, Coahuila, donde se han realizado campañas de muestreo para caracterizar las litologías ígneas y evaluar su potencial mineral (Martínez-Salinas, 2023; Monumental Gold Corp, 2021). Los datos geoquímicos obtenidos, que incluyen concentraciones de elementos mayores y REE, están disponibles en el archivo "Datos geoquímicos" ubicado dentro de la carpeta "Ejercicio 4".

##### **1. Exploración conceptual**

- a) Mencionen y describan brevemente dos procesos magmáticos que podrían producir un enriquecimiento de elementos incompatibles como las REE en una secuencia de rocas ígneas cogenéticas.

##### **2. Construcción de diagramas con Excel**

###### Diagrama TAS

- Abran el archivo "TAS" (Stosch, 2022) incluido en la carpeta "Ejercicio 4".
- En la hoja "Data Input", introduzcan los datos de elementos mayores de cada muestra.
- En la hoja "TAS-plutonic", visualicen los datos graficados, copien la imagen de la gráfica e insértenla en el presente documento, asegurándose de que se distingan correctamente los ejes, los campos y las etiquetas de las muestras.

###### Diagrama de REE

- Abran el archivo "Datos geoquímicos" y diríjense a la hoja "Diagrama de REE".
- En el área iluminada en azul claro, normalicen las concentraciones de REE de cada muestra respecto a los valores de la condrita que se proporcionan en la misma hoja (McDonough y Sun, 1995) por medio de la fórmula  $REE_N = REE_{muestra} / REE_{condrita}$ .
- Grafiquen las concentraciones normalizadas de cada muestra en un diagrama multielemental (seleccionen "Insertar", "Insertar gráfico de líneas o de áreas", "Líneas 2D" y la primera opción de gráfico). Coloquen las REE en el eje horizontal y utilicen una escala logarítmica para el eje vertical, con un rango de 1 a 10000.
- Copien el diagrama de REE en el presente documento, asegurándose de que se distingan correctamente los ejes y las etiquetas de las muestras.

##### **3. Descripción de los datos geoquímicos**

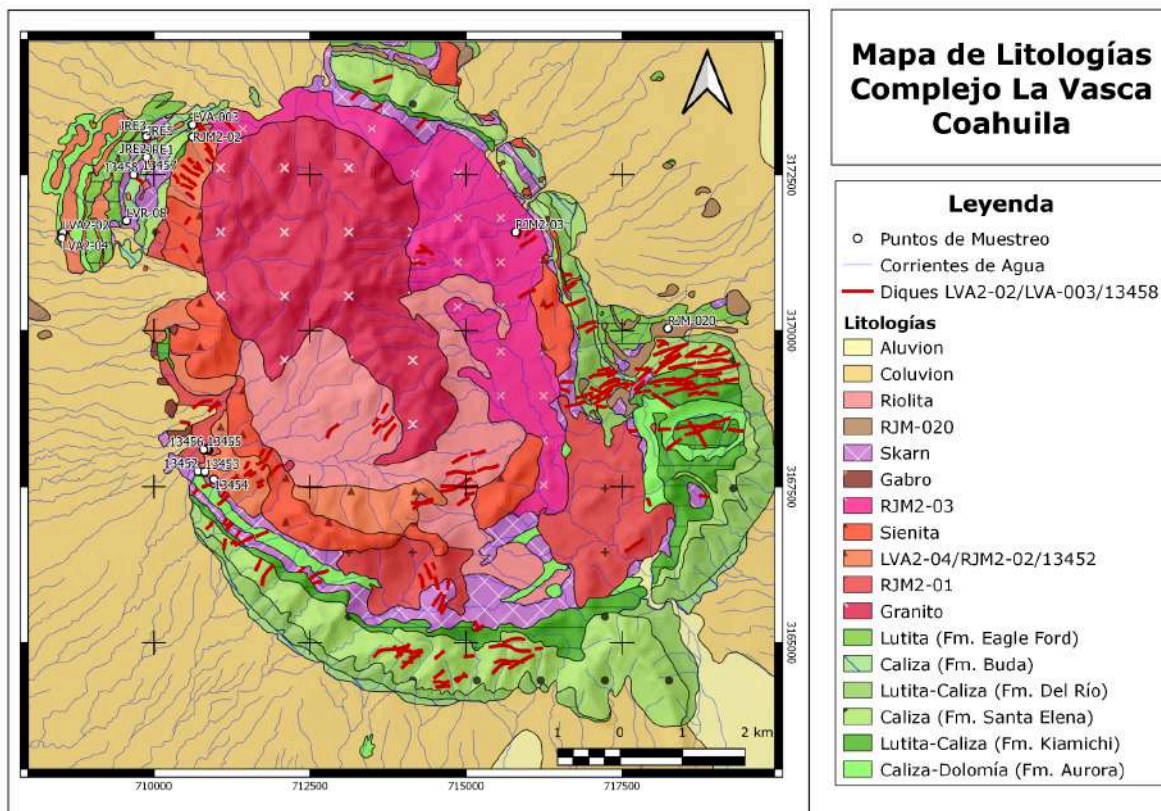
- ¿Cómo se clasifican las rocas ígneas con base en su ubicación en el diagrama TAS y qué afinidad geoquímica tienen?
- ¿En general, observan alguna relación entre el contenido de sílice y el contenido de álcalis de las rocas?
- Describan los patrones de REE observados en el diagrama multielemental.
- ¿Existe alguna relación entre el contenido de sílice, álcalis y el enriquecimiento REE?

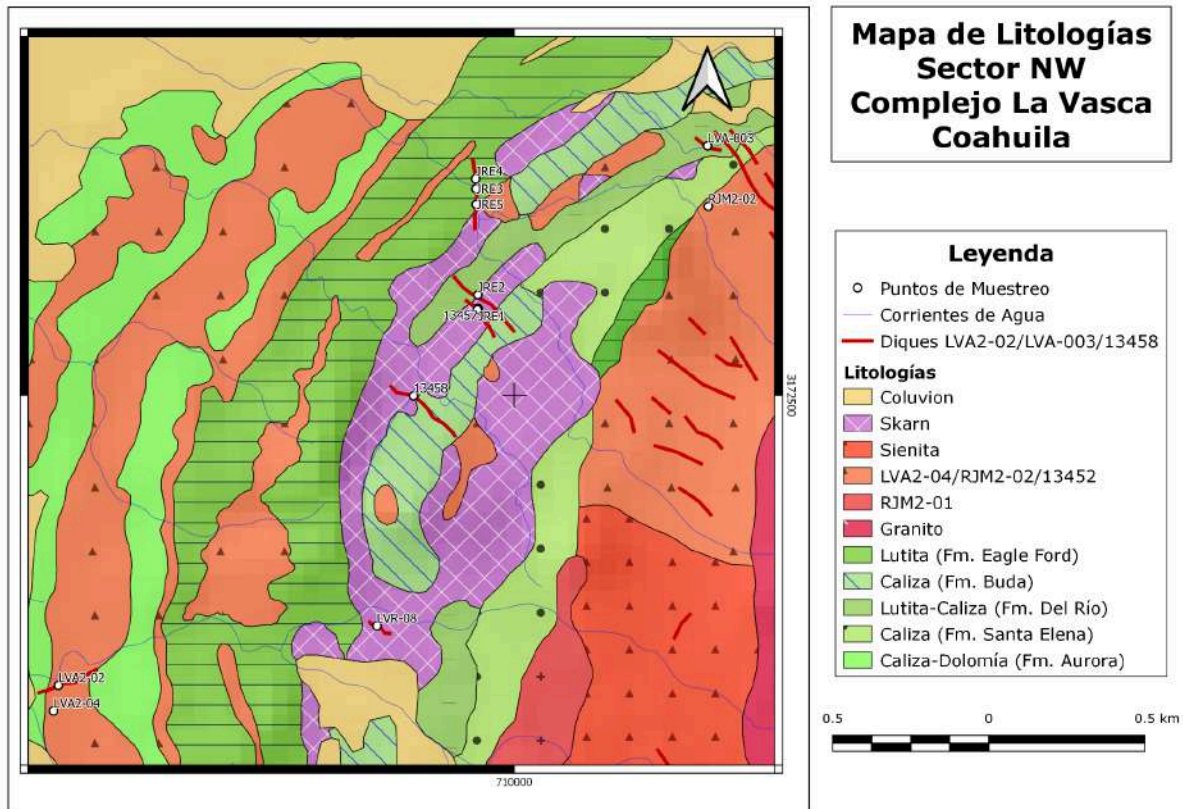
#### 4. Interpretación petrogenética de los datos geoquímicos

- Expliquen qué proceso magmático pudo haber generado las rocas más ricas en sílice y por qué estas presentan altas concentraciones de álcalis y REE.

#### 5. Integración espacial

En la leyenda de los mapas que se proporcionan enseguida (Martínez-Salinas, 2023), añadan información sobre las litologías faltantes (muestras no clasificadas).

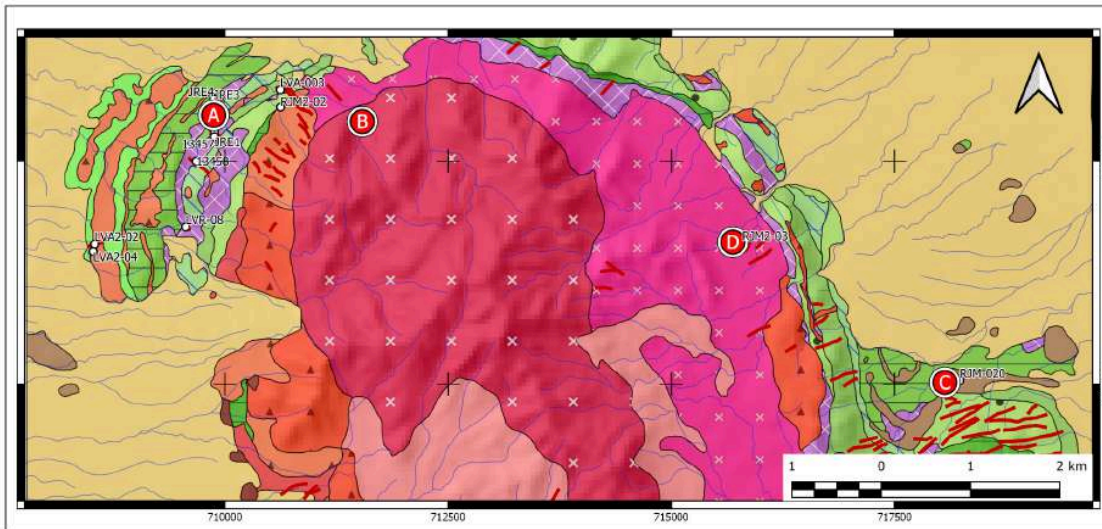




## 6. Aplicación a la exploración mineral

- a) Expliquen cómo puede utilizarse la relación entre diferenciación magmática y enriquecimiento en REE para identificar zonas favorables para la exploración.
- b) Se han identificado cuatro posibles zonas para la exploración (A-D). Seleccionen el sitio más favorable y justifiquen su elección con base en evidencias geoquímicas y espaciales.

## Mapa de Sitios de Exploración - Complejo La Vasca Coahuila



Leyenda		
○ Puntos de Muestreo	Coluvion	Sienita
— Corrientes de Agua	Riolita	LVA2-04/RJM2-02/13452
— Diques LVA2-02/LVA-003/13458	RJM-020	RJM2-01
<b>Litologías</b>	Skarn	Granito
Aluvion	Gabro	Lutita (Fm. Eagle Ford)
	RJM2-03	Caliza (Fm. Buda)
		Lutita-Caliza (Fm. Del Río)
		Caliza (Fm. Santa Elena)
		Lutita-Caliza (Fm. Kiamichi)
		Caliza-Dolomía (Fm. Aurora)

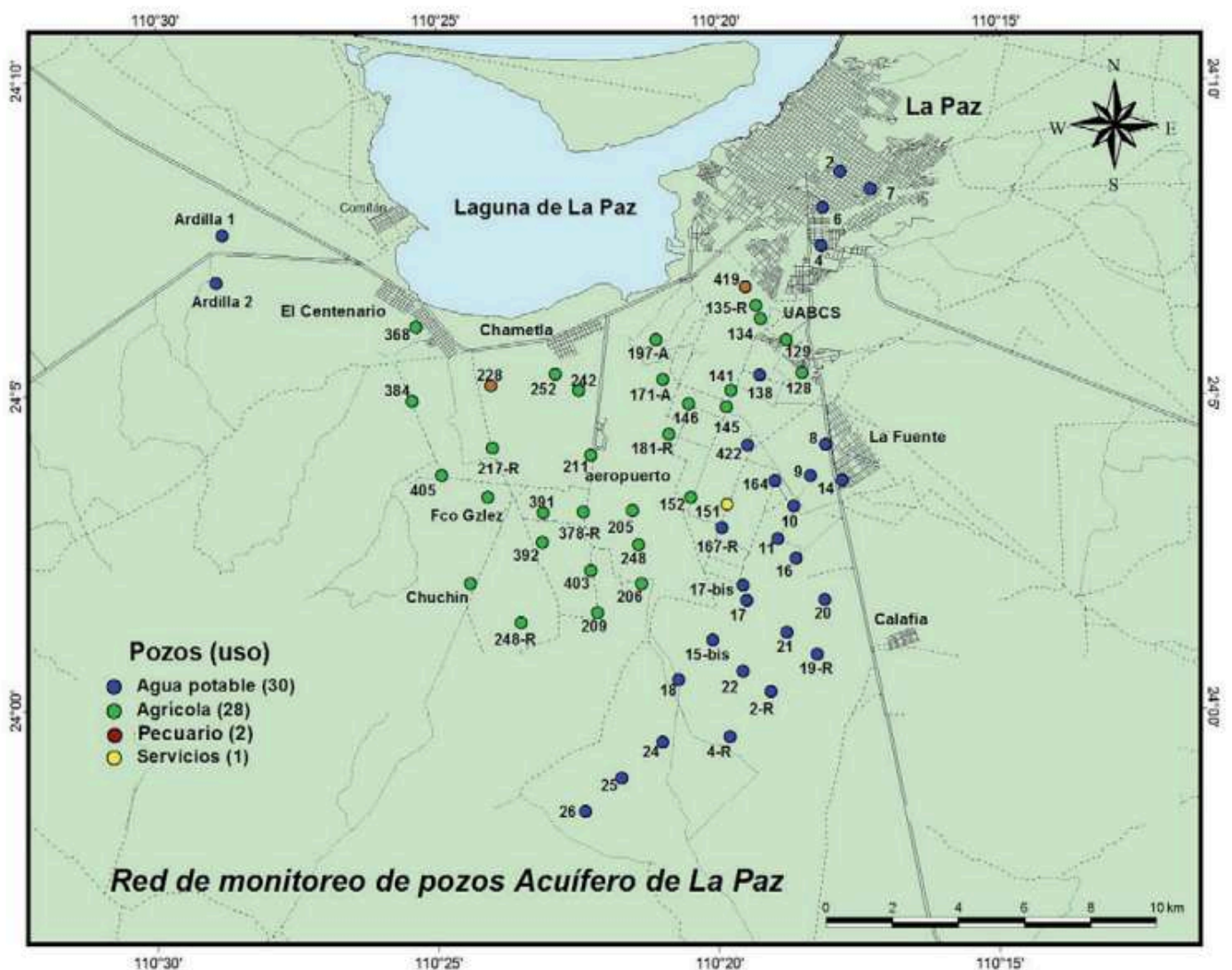
## Referencias

- Brown, M., y Rushmer, T. (2006). Evolution and differentiation of the continental crust. Cambridge University Press.
- Gibson, C. (2021). Geology of the JEMI Rare Earth Property Municipality of Ocampo Coahuila State, Mexico. Reporte elaborado por ProDeMin para Monumental Gold Corp.
- Martínez-Salinas, E. (2023). Petrología y geoquímica isotópica del complejo alcalino La Vasca, noroeste de Coahuila. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- McDonough, W., y Sun, S. (1995). The composition of the Earth. Chemical Geology, 120 (3-4), 223-253.
- Stosch, H. (2022). TAS diagram, K2O-SiO2 diagram and AFM diagram template for Excel (1.0). Zenodo, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5977826>.

## 5. Análisis hidrogeoquímico y balance hídrico en un acuífero costero: el caso del acuífero La Paz

Entre 2008 y 2013 se realizaron muestreos de agua en varios pozos del acuífero La Paz, en Baja California Sur. Se determinaron las concentraciones de iones mayoritarios y los sólidos disueltos totales (SDT) con el propósito de evaluar la calidad del agua, su origen hidrogeoquímico y los procesos que controlan su composición.

El mapa muestra la distribución espacial de los pozos, mientras que la tabla presenta la composición química del agua muestreada en los diferentes pozos (concentraciones en mg/l; Cruz-Falcón et al., 2017).



Pozo	Ardilla-2	6	10	134	138	145	151	197-A	217-R	242	368	378-R	252	422
Ca <sup>2+</sup>	109.00	127.55	211.99	153.31	368.90	296.70	104.93	34.30	490.35	545.09	326.00	197.50	674.55	275.11

<b>Mg<sup>2+</sup></b>	54.00	39.92	79.03	50.63	128.15	91.37	39.23	15.00	178.22	146.40	84.41	49.45	237.27	91.35
<b>Na<sup>+</sup></b>	272.00	125.25	64.18	452.31	259.93	186.40	99.23	68.02	685.47	317.42	472.76	132.50	573.42	209.81
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	235.00	107.00	159.00	244.65	207.00	160.06	144.00	197.16	200.00	166.95	218.00	164.30	180.00	144.00
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	89.00	10.48	93.38	142.50	303.76	154.99	31.00	30.99	204.00	170.00	242.50	65.19	174.00	143.36
<b>Cl<sup>-</sup></b>	479.00	82.97	524.84	799.75	1155.89	1043.51	221.21	101.08	1987.56	1659.49	907.52	1094.98	1642.51	914.72
<b>STD</b>	1037.00	1026.00	1403.00	1918.00	2885.00	2576.00	1077.00	484.00	6204.00	3398.00	2519.00	1778.00	5988.00	2144.00

### 1. Evaluación de la calidad del agua (SDT)

La concentración de SDT es un parámetro fundamental para evaluar la calidad del agua. Se ha reportado que el consumo de agua con valores elevados de SDT puede provocar irritación gastrointestinal; además, este tipo de agua puede favorecer la corrosión de tuberías y la formación de incrustaciones, lo que incrementa los costos de mantenimiento (Ohio State University, s.f.).

En México, la calidad del agua para uso y consumo humano está regulada por la NOM-127-SSA1-2021, la cual establece un valor máximo permisible de 1000 mg/l para los SDT.

- Analicen los valores de SDT medidos en los diferentes pozos e indiquen cuáles cumplen con la normativa vigente.
- Con el fin de visualizar los pozos que cumplen con la normativa, aquellos cercanos al límite permitido y los que presentan concentraciones significativamente superiores al valor normativo, agrupen los pozos en tres categorías: A (SDT < 1000 mg/l), B (SDT = 1000-1500 mg/l) y C (SDT > 1500 mg/l).
- En el mapa, señalen los pozos de las tres categorías con diferentes colores: usen verde para los pozos de la categoría A, amarillo para los pozos de la categoría B y rojo para los pozos de la categoría C. Describan la distribución de los pozos de las diferentes categorías.

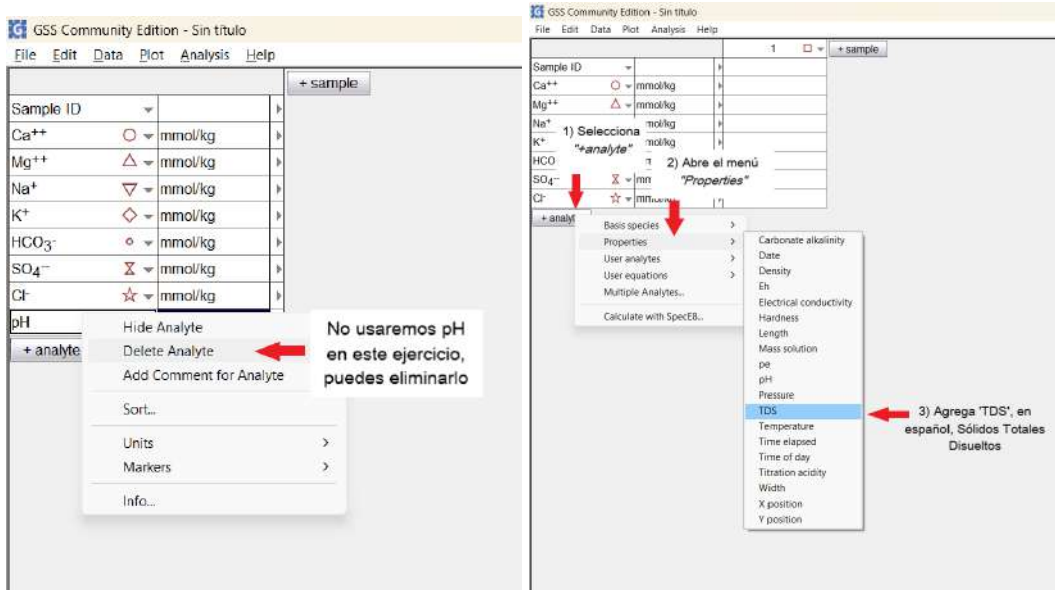
### 2. Clasificación hidrogeoquímica (diagramas de Piper y Stiff).

Los diagramas de Piper y Stiff permiten visualizar la composición química de las aguas naturales y agrupar muestras con características geoquímicas similares. Además, permiten reconocer posibles fuentes de contaminación o incorporación de solutos al acuífero.

Por medio del software Geochemist's Workbench, grafiquen la composición química de las aguas examinadas en diagramas de Piper y Stiff siguiendo estos pasos:

#### Actividades:

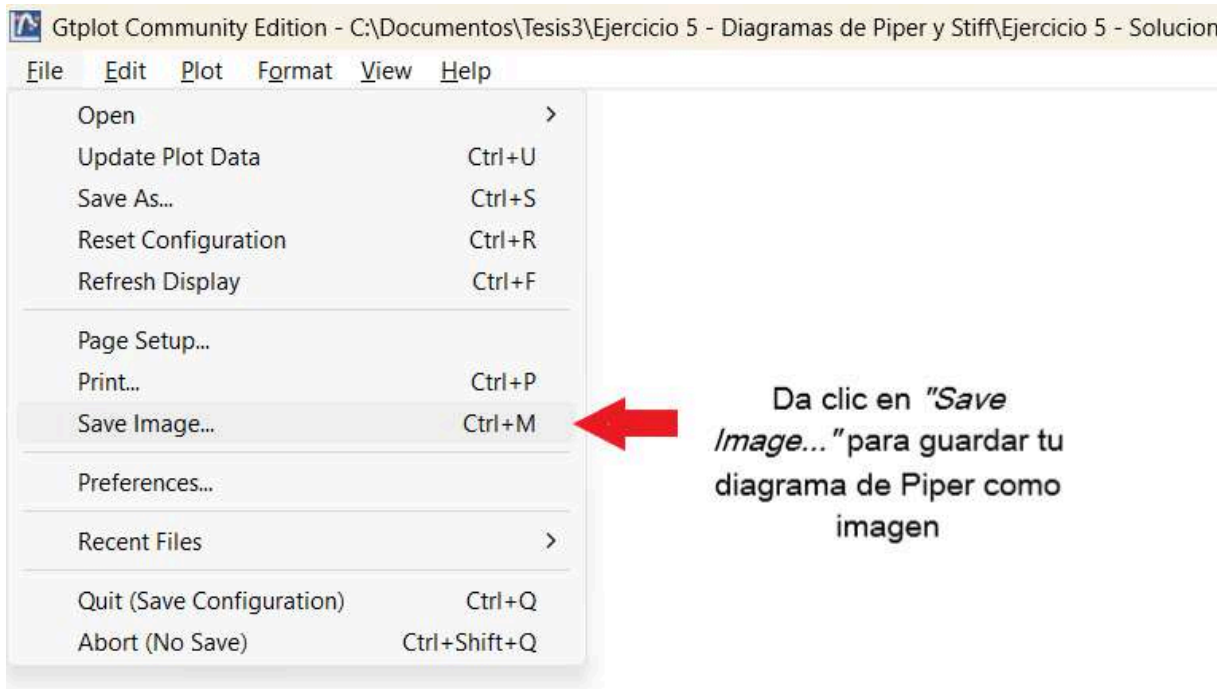
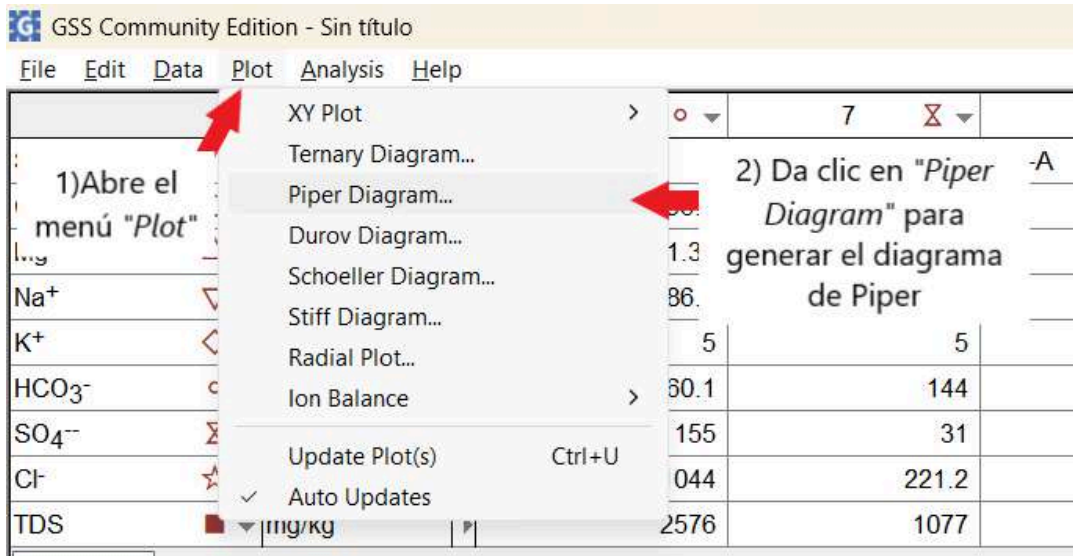
- Abran Geochemist's Workbench e inicien GSS.
- Eliminen las filas correspondientes a pH y K<sup>+</sup>, ya que no se proporcionan estos datos.
- Seleccionen unidades de mg/l.



- Hagan clic en "+ sample" para agregar nuevas columnas. En cada una, ingresen el nombre de la muestra correspondiente y las concentraciones de sus aniones y cationes. Pueden copiar los valores directamente de la tabla y pegarlos en la hoja de trabajo del software.

Sample ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ardilla-2	6	10	134	138	145	151	197-A	217-R	243	
Ca <sup>++</sup>	109									
Mg <sup>++</sup>	54									
Na <sup>+</sup>	272									
K <sup>+</sup>	20									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	235									
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	89									
Cl <sup>-</sup>	479									

- En la pestaña "File" de la barra superior, seleccionen la opción "Save" para guardar el archivo en su computadora. Nombren el archivo como "Ejercicio 5. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenlo en una carpeta nombrada "Ejercicio 5. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2".
- En la pestaña "Plot" de la barra superior, seleccionen la opción "Piper Diagram...". Se abrirá una ventana de Gtplot junto con una segunda ventana de parámetros de visualización. Hagan clic en "OK" en esta segunda ventana para visualizar el diagrama. En la ventana del diagrama, abran el menú "Format", seleccionen "Quick Toggle" y asegúrense de que solo estén seleccionados los cuadros "Axis Labels", "Numbers" y "Sample Legend". Posteriormente, abran el menú "File" y seleccionen la opción "Save Image..." para guardar la imagen en su computadora. Nombren la imagen como "5.Piper. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenla en la carpeta generada.



- En la pestaña "Plot" de la barra superior, seleccionen ahora "Stiff Diagram...". Se abrirá una ventana de Gtplot junto con una segunda ventana de parámetros de visualización. En esta, modifiquen el rubro "Max Samples" indicando el número de muestras que están examinando (14), deseleccionen el cuadro "Auto-size" para detener el escalado automático y, justo abajo, introduzcan un valor de tamaño del 100% para visualizar mejor las gráficas. Cuando hayan terminado, hagan clic en "Apply" y "OK" para visualizar el diagrama. En la ventana del diagrama, abran el menú "File" y seleccionen la opción "Save Image..." para guardar la imagen en su computadora. Nombren la imagen como "5. Stiff. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenla en la carpeta generada.

GSS Community Edition - Sin título

File Edit Data Plot Analysis Help

		7	X
Sample ID		151	197-A
Ca <sup>++</sup>	96.7		104.9
Mg <sup>++</sup>			
Na <sup>+</sup>			
K <sup>+</sup>			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	155		31
Cl <sup>-</sup>	044		221.2
TDS	2576		1077

+ analyte

Parameters for Stiff Diagram

Plot Samples

Available: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>

Chosen: Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>

1) Modifica la cantidad máxima de muestras a 14

2) Desactiva "Auto-size" y modifica el tamaño a 100%

3) Da clic en OK

Units: meq/kg

Max samples: 14

Size: 100%

OK Apply Cancel Reset

Gtplot Community Edition - C:\Documentos\Tesis3\Ejercicio 1 - Elaboracion y Analisis de Diagramas Eh-pH

File Edit Plot Format View Help

Open

Update Plot Data Ctrl+U

Save As... Ctrl+S

Reset Configuration Ctrl+R

Refresh Display Ctrl+F

Page Setup...

Print... Ctrl+P

Save Image... Ctrl+M

Preferences...

Recent Files

Quit (Save Configuration) Ctrl+Q

Abort (No Save) Ctrl+Shift+Q

40 0 40

meq/kg

Al finalizar, da clic en "Save Image..." para guardar las imágenes de tus diagramas de Stiff

Ardilla-2

- A continuación, incorporen las imágenes correspondientes a los diagramas generados, cuidando que el tamaño permita distinguir con claridad los ejes, etiquetas y símbolos.

### 3. Análisis e interpretación de los datos

- a) A partir del diagrama de Piper, identifiquen los aniones y cationes dominantes en las muestras y agrupen las aguas en familias y subfamilias hidrogeoquímicas (bicarbonatadas/sulfatadas/cloruradas cálcicas/sódicas/magnesianas).
- b) ¿Qué sugiere la dominancia regional de Cl<sup>-</sup> respecto al origen de este soluto en el acuífero?
- c) Corrobores la clasificación hidrogeoquímica obtenida a partir de los diagramas de Piper analizando los diagramas de Stiff y, posteriormente, señalen en el mapa las familias y subfamilias identificadas, empleando un símbolo de distinto color para cada una: dibujen una cruz negra para el agua clorurada sódica, una cruz púrpura para la clorurada cálcica y una cruz naranja para el agua mixta.
- d) Describan la distribución espacial de las diferentes familias de aguas.

### 4. Relación con la geología regional

- a) La región presenta un basamento granítico. ¿Qué iones podrían liberarse durante la meteorización de rocas graníticas? Justifiquen su respuesta mencionando de cuáles minerales podrían derivar esos iones.
- b) Comparen la composición observada en el agua con la que se esperaría a partir de la meteorización del basamento granítico. Identifiquen los iones que no podrían derivar de este proceso y propongan un fenómeno que podría explicar su presencia.

### 5. Balance hídrico y dinámica del acuífero

A nivel nacional, México enfrenta problemas crecientes de escasez hídrica, agravados por la contaminación y el deterioro de los acuíferos como consecuencia de su sobreexplotación y de una supervisión y regulación insuficientes para su preservación.

La ciudad de La Paz se localiza en una región desértica donde el acuífero constituye prácticamente la única fuente permanente de abastecimiento de agua. Sin embargo, la demanda hídrica asociada al crecimiento urbano, así como a las actividades industriales y agropecuarias en la zona, aumenta a una tasa anual promedio cercana al 5%, lo que ejerce una presión creciente sobre el acuífero (Cruz-Falcón et al., 2017 y referencias incluidas).

Estas consideraciones resaltan la importancia de evaluar no solo la calidad del agua subterránea, sino también el estado del acuífero y las implicaciones que un desbalance hídrico puede tener sobre su dinámica y su sostenibilidad a largo plazo.

Para el acuífero La Paz, se ha estimado una tasa de recarga de 20-23 Mm<sup>3</sup>/año, mientras que la tasa de descarga es de 29-32 Mm<sup>3</sup>/año.

- a) ¿Qué indica esta relación sobre el estado del sistema?
- b) Analicen las consecuencias de una extracción que supera la recarga durante varios años, considerando el comportamiento del nivel freático, la formación de conos de depresión y la modificación del flujo natural del agua subterránea.

- c) Expliquen cómo estos cambios podrían afectar el equilibrio dinámico entre el agua dulce y el agua salada en un acuífero costero y qué implicaciones tendría esto en la composición química del agua subterránea.

## **6. Integración Final**

- a) Basándose en la distribución espacial de los valores de SDT, la clasificación hidrogeoquímica del agua, la distribución de las diferentes familias y el estado del balance hídrico del acuífero, propongan una explicación fundamentada para el proceso que está deteriorando la calidad del agua en el acuífero La Paz, integrando al menos tres evidencias específicas derivadas de sus resultados.

### **Referencias:**

- Cruz-Falcón, A., Troyo-Diéguez, E., Murillo-Jiménez, J., García-Hernández, J., y Murillo-Amador, B. (2017). Familias de agua subterránea y distribución de sólidos totales disueltos en el acuífero de La Paz, Baja California Sur, México. *Terra Latinoamericana*, 36, 39-48.
- Ohio State University (s.f.). Total Dissolved Solids. Recuperado el 3/01/2026 de: <https://ohiowatersheds.osu.edu/node/1494>

## 6. Ejercicio Integrador 1 - Agua Superficial y Contaminantes

En este ejercicio utilizarán un conjunto de datos de agua muestreada a lo largo de un río para determinar posibles fuentes de contaminación y evaluar estrategias de remediación.

### **Caso de Estudio: Norte de México**

Los pobladores de una región que viven a lo largo de un río han reportado pérdidas de ganado y cultivos, malestar estomacal y pérdida de cabello. Su fuente principal de agua es el río y el acuífero alimentado por este.

Algunos pobladores sugieren que el agua está contaminada y afirman que el malestar es debido al derrame de una mina de cobre-hierro-zinc que está establecida aguas arriba en uno de los afluentes del río; mientras, la minera afirma que la posible contaminación debe provenir de una mina de plata abandonada a las afueras de uno de los pueblos.

Equipos del SGM, del Instituto de Geología de la UNAM, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CONAGUA y la SEMARNAT han realizado pruebas del agua de los ríos locales, los resultados se han cargado en los diversos archivos de Excel, QGIS, Visual MINTEQ y Geochemist's Workbench del folder "E11-Agua Superficial y Contaminantes".

### **1. Evaluación de la calidad del agua (Límites Máximos Permisibles)**

- Abran el Excel "E11-Datos" del folder "E11-Agua Superficial y Contaminantes".
- En la hoja de datos "Elementos Traza" se presentan los resultados de pruebas de agua por elementos potencialmente tóxicos (EPT) y a continuación se presentan los límites máximos permisibles (LMP) en agua para consumo humano de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 y NOM-127-SSA1-2021. Comparen los datos del agua recolectada con los LMP en Excel, utilizando la hoja "Elementos Traza LMP".

Completen la columna R de la hoja "Elementos Traza LMP", las celdas de esta hoja tienen una fórmula que calcula cuántas veces se ha rebasado el valor del LMP para cada EPT en cada muestra, esta fórmula se puede expresar de manera genérica como  $X = (\text{Concentración [mg/l]} / \text{LMP [mg/l]})$ .

Elementos	LMP (mg/l)
As	0.05
Al	0.2
Cu	2
Pb	0.01
Zn	5
Ba	0.7
Cr	0.05

Fe	0.3
Mn	0.15
Hg	0.001
Ni	0.07

- a) ¿Hay EPT por encima de los límites permisibles? ¿Cuáles?, identifiquen los dos EPT con la concentración por encima de los valores permisibles más elevados.

## 2. Caracterización del contaminante (Familias de Agua y Distribución)

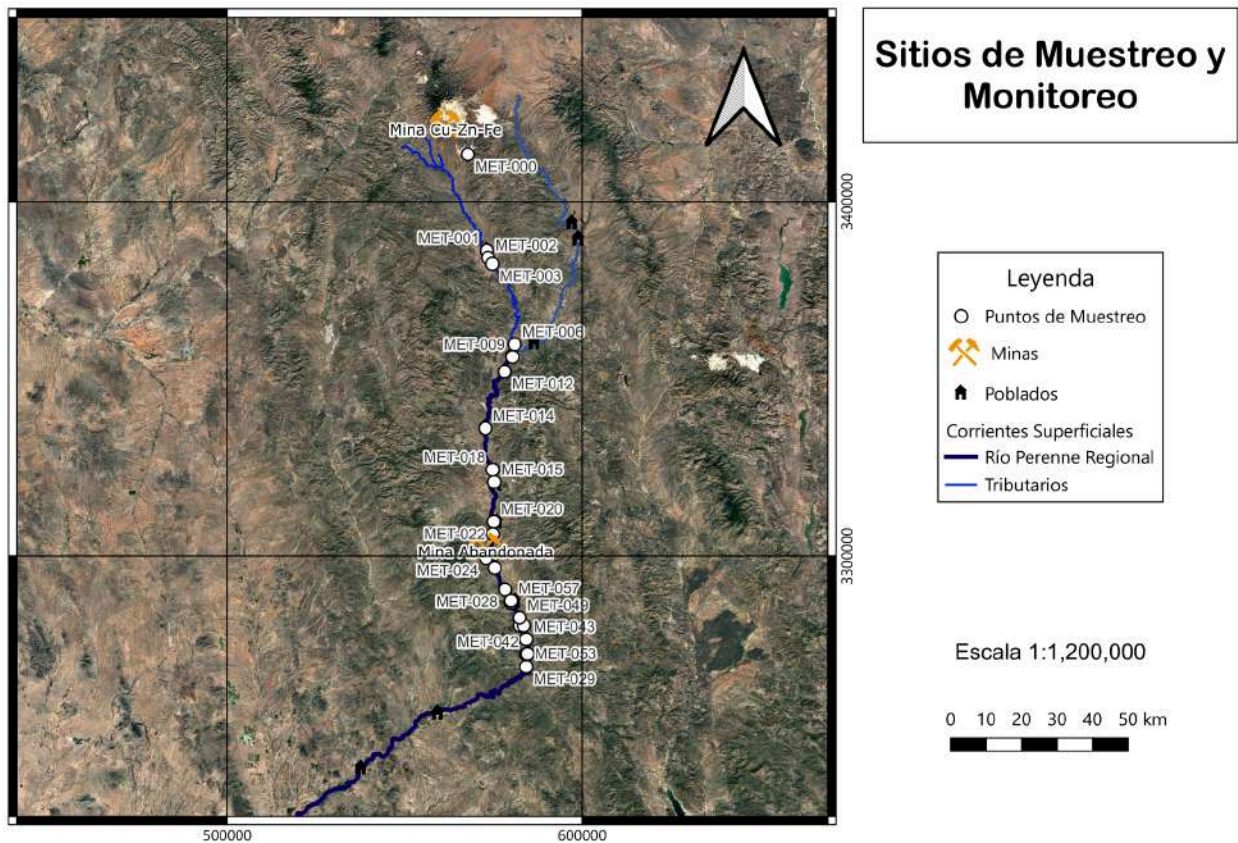
Dados los valores elevados por encima de la normativa, se deberá verificar si los contaminantes provienen de una o ambas posibles fuentes sugeridas, para ello se provee información acerca de las posibles soluciones contaminantes.

En la mina de cobre, hierro y zinc el procesado de los metales extraídos involucra ácido sulfúrico y peróxido de manganeso, por lo que los desechos presentan pH bajo (<5), altos contenidos de sulfatos y valores elevados de manganeso, aparte de valores elevados de los metales extraídos en la mina (Cu, Fe, Zn) y elementos potencialmente tóxicos asociados, como arsénico y plomo.

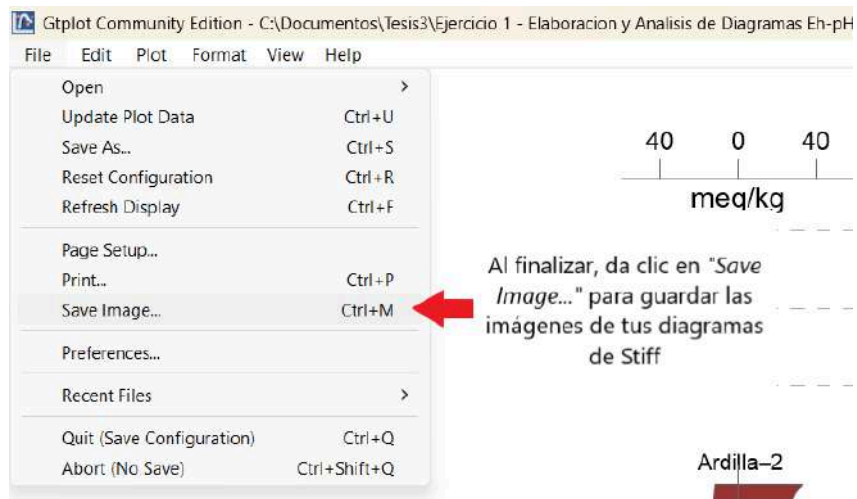
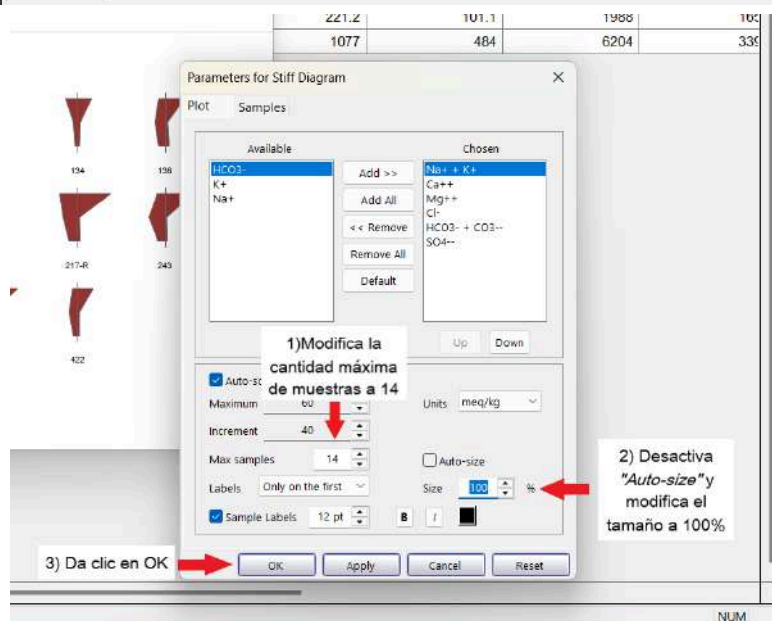
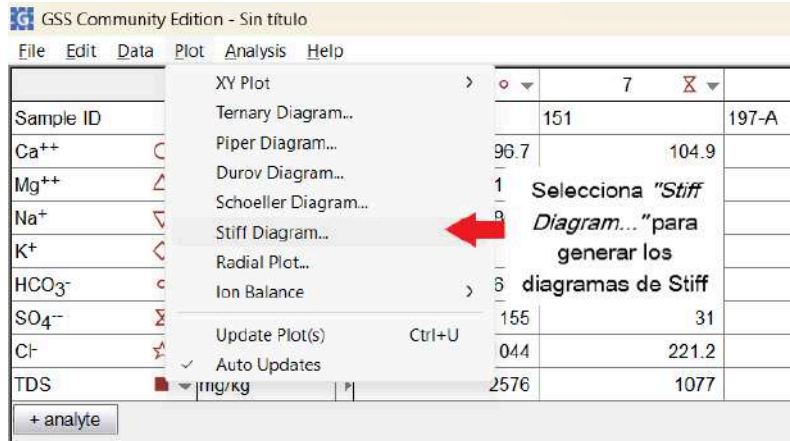
La mina de plata abandonada acumuló desechos que han sido evaluados por la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) que contienen y se determinó que tienen potencial de generar drenaje ácido, es decir, aguas de pH bajo (<5), enriquecidas en sulfatos y los EPT más móviles en estas condiciones son Zn y Cd.

### Diagramas Stiff

- Considerando que ambas fuentes de contaminación tienen el potencial de liberar agua sulfatada, un primer acercamiento a la distribución y pervasividad de la contaminación es clasificar el agua de la región según sus iones mayores con ayuda de Geochemist's Workbench. Las muestras de iones mayores se tomaron en los siguientes sitios:



- Abran Geochemist's Workbench e inicien GSS.
- Abran el proyecto "EI1 - Iones Mayores".
- En la pestaña "Plot" de la barra superior, seleccionen "Stiff Diagram...". Se abrirá una ventana de Gtplot junto con una segunda ventana de parámetros de visualización. En esta, modifiquen el rubro "Max Samples" indicando el número de muestras que están examinando (24), deseleccionen el cuadro "Auto-size" para detener el escalado automático y, justo abajo, introduzcan un valor de tamaño del 100% para visualizar mejor las gráficas. Cuando hayan terminado, hagan clic en "Apply" y "OK" para visualizar el diagrama. En la ventana del diagrama, abran el menú "File" y seleccionen la opción "Save Image..." para guardar la imagen en su computadora. Nombren la imagen como "EI1. Stiff. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenla en la carpeta generada.



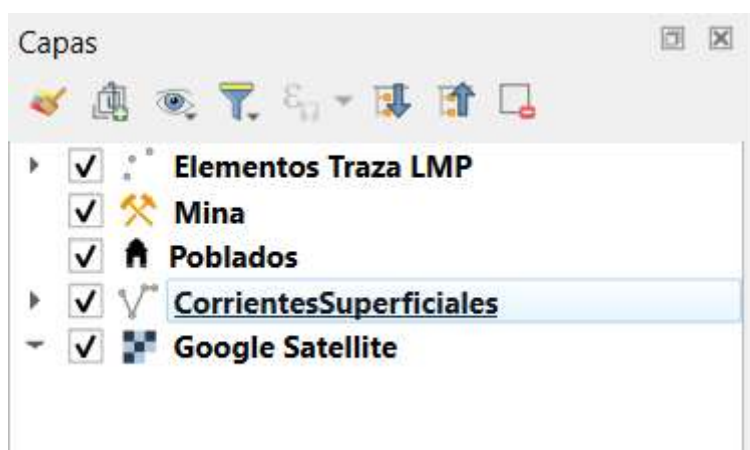
- A continuación, incorporen las imágenes correspondientes a los diagramas generados, cuidando que el tamaño permita distinguir con claridad los ejes, etiquetas y símbolos.
- A partir del diagrama de Stiff, identifiquen los aniones y cationes dominantes en las muestras y agrupen el agua en familias y subfamilias hidrogeoquímicas (bicarbonatadas/sulfatadas/cloruradas cálcicas/sódicas/magnesianas).

- c) Señalen en el mapa las familias y subfamilias identificadas, empleando un símbolo de distinto color para cada una: dibujen una cruz negra para el agua bicarbonatada, una cruz púrpura para la sulfatada y una cruz naranja para el agua mixta.
- d) Describan la distribución espacial de las diferentes familias de agua.
- e) ¿Qué sugiere la dominancia puntual de  $\text{SO}_4^-$  respecto al origen de este soluto en el acuífero? ¿Podría provenir de una fuente natural como evaporitas o depósitos de sulfuros no explotados?

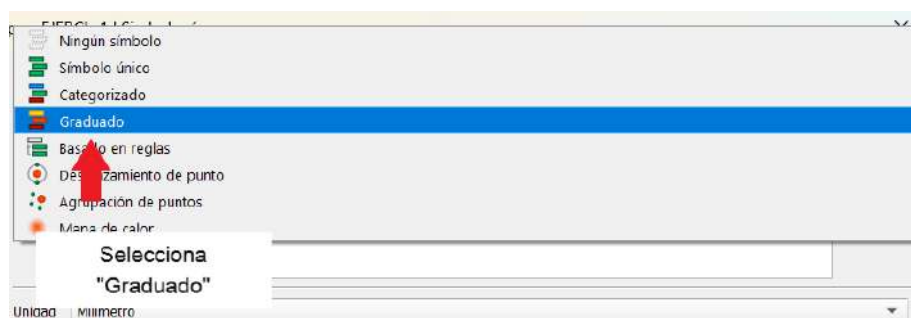
### Distribución de Contaminantes

Elaboren dos mapas, para visualizar la distribución de los dos EPT con concentraciones más elevadas por arriba del LMP.

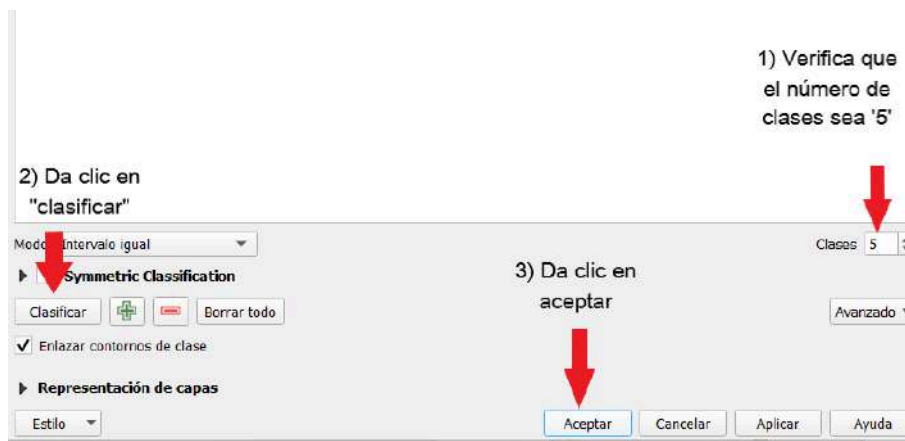
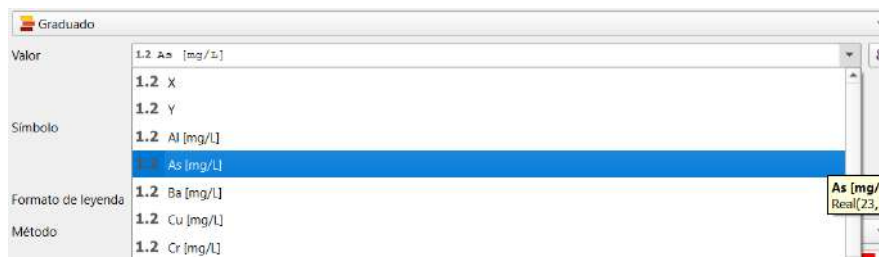
- En la carpeta "6. Ejercicio Integrador 1" encontrarán un archivo comprimido llamado "EI1-QGIS". Extraigan su contenido en el Escritorio.
- En la carpeta extraída en el escritorio, localicen el archivo llamado "EI1".
- En la barra superior, seleccionen "Ver", "Paneles" y activen la opción "Capas" para visualizar y manipular las capas del proyecto.
- Activen las capas "Corrientes de Agua", "Minas", "Corrientes de Agua" y "Elementos Traza LMP".



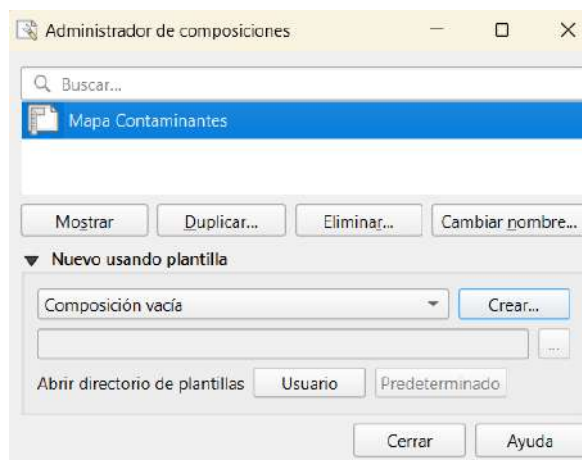
- Hagan doble clic en la capa "Elementos Traza LMP" y entren a "Simbología". En la parte superior, cambien el tipo de simbología de "Símbolo Único" a "Graduado".



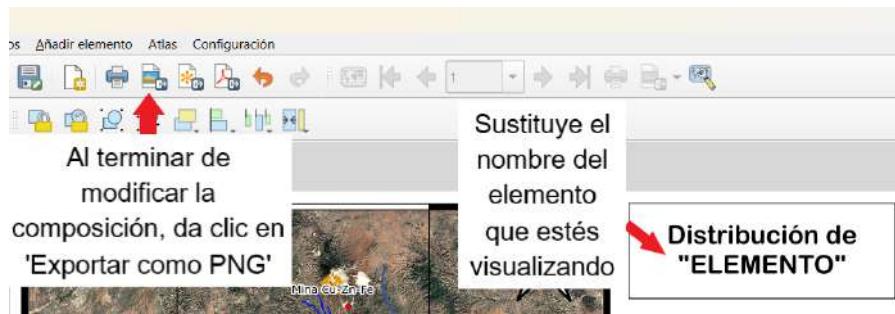
- En el campo "Valor", seleccionen el campo correspondiente a uno de los EPT. En el cuadrante inferior izquierdo, hagan clic en el botón "Clasificar" y generen 5 clases. Den clic en "Aceptar" y la ventana se cerrará automáticamente.



- Abran el administrador de composiciones (dos íconos a la derecha del ícono de guardado) y seleccionen la composición "Mapa EPT". Den doble clic a la composición y den clic en el título para agregar el nombre del pathfinder seleccionado.



- Exporten la composición como imagen (den clic en el ícono inmediatamente a la derecha del ícono de impresora). Guarden la imagen como "Mapa LMP elemento X" en la carpeta "Ejercicio 2".



- Repitan el procedimiento para el otro EPT con concentraciones más elevadas.
- a) Peguen a continuación las dos imágenes generadas.
- b) De acuerdo con la distribución de familias de agua y EPT, ¿Cuál es la fuente principal de los contaminantes?, argumenta.

### 3. Propuestas de Remediación

Tras determinar cuál fue la fuente principal de contaminantes se piensa establecer una planta de tratamiento de agua frente al sitio de muestreo MET-015. Se proponen las siguiente estrategias de remediación:

- A) Precipitación a través de la modificación de la condición Eh-pH del agua del río.
- B) Adsorción mediante materiales arcillosos.
- C) Una estrategia que combine precipitación por cambios de Eh-pH y adsorción con minerales arcillosos.

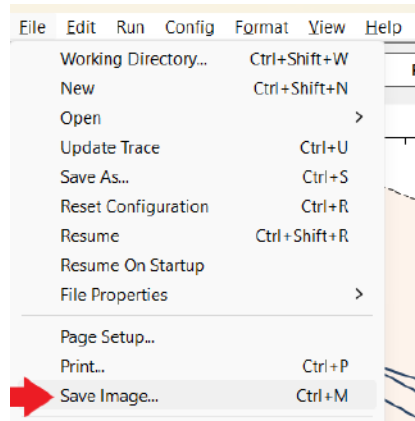
Evalúen las opciones de remediación, con este fin se han preparado unos documentos en Act2 y Visual MINTEQ que puedes encontrar en los folders del mismo nombre dentro del fólдер principal del proyecto.

#### Propuesta A - Precipitación del contaminante

- Con la finalidad de determinar el comportamiento de los contaminantes y cuáles cambios en Eh-pH serían necesarios para asegurar su inmovilización; elaboren diagramas Eh-pH con apoyo de Act2, perteneciente a la paquetería de Geochemist's Workbench.

#### Construcción de los diagramas Eh-pH para el EPT más concentrado

- En Geochemist's Workbench, abran Act2.
- Abren el archivo "EI1.Eh-pH".
- En el recuadro "diagram species" seleccionen el EPT más concentrado.
- En la pestaña "Plot", visualicen el diagrama Eh-pH para el primer EPT. En la pestaña "File" de la barra superior, seleccionen "Save image..." para guardar la imagen en su computadora. Nombren la imagen "EI1. Eh-pH EPT1. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenla en la carpeta generada.



### Construcción de los diagramas Eh-pH para el segundo EPT más concentrado

- Regresen a la pestaña "Basis" y seleccionen el segundo EPT más concentrado en el recuadro "diagram species".
- En la pestaña "Plot", visualicen el segundo diagrama Eh-pH. Guarden la imagen como "EI1. Eh-pH EPT2. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2" y guárdenla en la carpeta.

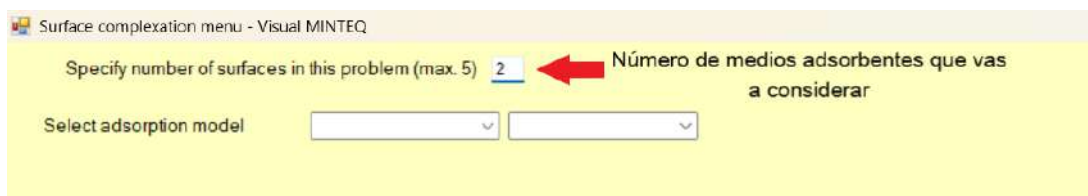
Peguen ambos diagramas Eh-pH a continuación:

- a) ¿Cómo se comportan los contaminantes en las condiciones Eh-pH (Eh: 0.65 [V], pH: 2.8) del río? (Solubles/Insolubles)
- b) ¿Cuáles iones ejercen el mayor control sobre la solubilidad de los contaminantes en las condiciones cercanas a las evaluadas en el agua del río?
- c) Determinen un valor de Eh y pH en el cuál ambos contaminantes evaluados precipitan.

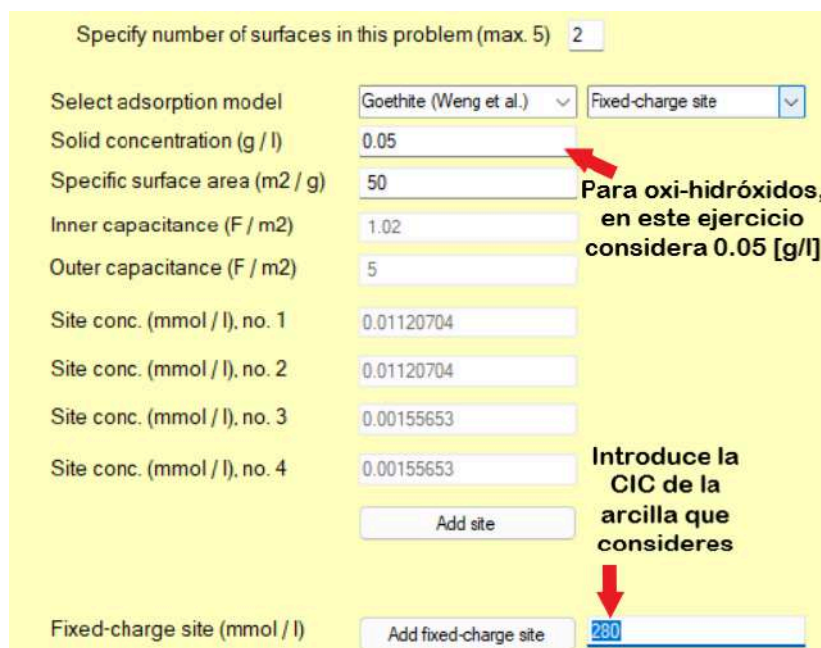
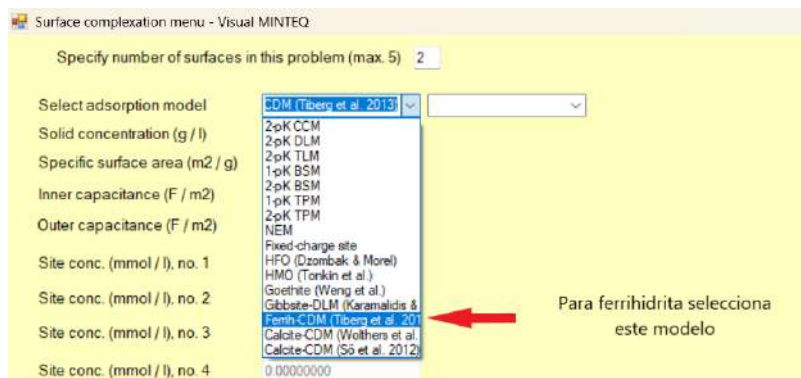
### Propuesta B - Adsorción con arcillas

Para la adsorción de los EPT con materiales arcillosos se piensa ocupar una mezcla de Ferrhidrita e Illita (CIC = 220 mmol/l) o Montmorillonita (CIC = 470 mmol/l) y Caolinita (CEC = 160 mmol/l). Ocupando Visual MINTEQ evalúen cuál de las dos mezclas será mejor para la remediación considerando las condiciones Eh-pH existentes en el río.

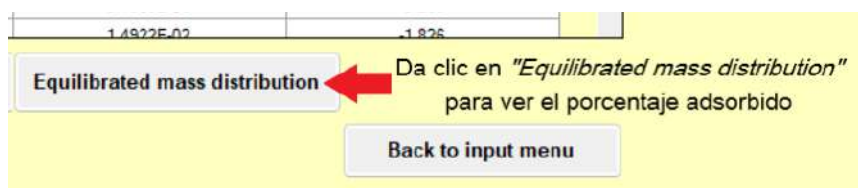
- Abran Visual MINTEQ 3.1.
- Abran la pestaña "File" y den clic en "Open input file", luego seleccionen el archivo "EI1.Arcillas.VDA"
- En el menú "Adsorption" de la barra superior, seleccionen "Surface complexation reactions".
- En la nueva ventana, introduzcan el número de minerales que emplearán, para ambas mezclas se consideran dos minerales.



- Seleccionen el modelo correspondiente para cada mineral. Para la ferrihidrita usen el modelo Ferrih-CDM de Tiber et al. (2013). Utilicen una concentración de sólido de 0.05 g/l. Para las arcillas, seleccionen "Fixed-charge Site" e introduzcan la CIC correspondiente en el recuadro "Fixed-charge site (mmol/l)".



- Después de ingresar la información del sitio correspondiente, seleccionen "Save and back to main menu".
- Ejecuten la simulación dando clic en "Run MINTEQ". Consulten los resultados en "Equilibrated mass distribution", den clic en "Print to Excel" y guarden el archivo como "EI1. Mezcla1. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2".



- Den clic en "Back to input menu" y repitan el procedimiento para la segunda mezcla de arcillas.

## Resultados

En la tabla siguiente, anoten el porcentaje de Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn adsorbido en cada material evaluado.

Escenario 1 (pH = 2.8 , Eh = 0.65 [V])						
Material	%Al Adsorbido	%As Adsorbido	%Cu Adsorbido	%Fe Adsorbido	%Mn Adsorbido	%Zn Adsorbido
Ferrhidrita + Illita						
Montmorillonita + Caolinita						

- Comparen el comportamiento de las mezclas de arcilla. ¿Qué diferencias observan en la adsorción de los EPT?
- En el agua del río también están presentes iones mayoritarios como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Expliquen cómo la presencia de estos iones podría influir en la adsorción de los metales y metaloides potencialmente tóxicos en las superficies minerales.
- Con base en los resultados obtenidos, ¿qué material o combinación de materiales recomendarían para la remediación en el río? Justifiquen su respuesta comparando la adsorción de los EPT.

### Propuesta C - Métodos Combinados

Usando Visual MINTEQ y probando con la mezcla de material arcilloso que seleccionaron, introduzcan el valor de Eh-pH que propusieron para la precipitación de los contaminantes.

- Para modificar el pH, den clic en "Back to input menu" y en el recuadro "pH", seleccionen "Fixed at...", en el recuadro inmediatamente a la derecha, introduzcan el pH propuesto.
- Luego, para modificar el Eh, den clic en "Parameters", luego den clic en "Specify pe and Eh", seleccionen "Fixed Eh", en el recuadro inmediatamente a la derecha, introduzcan un Eh de 650 [mV].
- En el menú "Adsorption" de la barra superior, seleccionen "Surface complexation reactions".
- En la nueva ventana, introduzcan el número de minerales que emplearán, para ambas mezclas se consideran dos minerales.
- Seleccionen el modelo correspondiente para cada mineral. Para la ferrihidrita usen el modelo Ferrih-CDM de Tiber et al. (2013). Utilicen una concentración de sólido de 0.05 g/l. Para las arcillas, seleccionen "Fixed-charge Site" e introduzcan la CIC correspondiente en el recuadro "Fixed-charge site (mmol/l)".
- Después de ingresar la información del sitio correspondiente, seleccionen "Save and back to main menu".
- Ejecuten la simulación dando clic en "Run MINTEQ". Consulten los resultados en "Equilibrated mass distribution", den clic en "Print to Excel" y guarden el archivo como "EI1. Escenario2. Primer apellido estudiante 1-Primer apellido estudiante 2".
- Completen la siguiente tabla:

Escenario 2 (pH = , Eh = [V])
-------------------------------

Material	%Al Adsorbido	%As Adsorbido	%Cu Adsorbido	%Fe Adsorbido	%Mn Adsorbido	%Zn Adsorbido

- ¿Cambia la capacidad de adsorción de los materiales?
- Considerando tus respuestas, ¿propondrías que se ocupen las dos estrategias de remediación simultáneamente?, ¿O sería mejor que se ocupe solo una? ¿Cuál será más eficaz?

## Referencias

- Kennedy, V.C. (1965). Mineralogy and Cation-Exchange Capacity of Sediments from Selected Streams. USGS. Recuperado de: <https://pubs.usgs.gov/pp/0433d/report.pdf>
- CONAGUA. (20/04/2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Sonora (2624), Estado de Sonora. Publicada en el Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104317/DR\\_2624.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104317/DR_2624.pdf)
- Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis S.A. de C.V. (18/09/2014). Informe de Resultados del Muestreo y Análisis de Agua, Sedimentos y Biota de los Ríos Bacanuchi y Sonora Contaminados por la Fuga Proveniente de la Mina Buenavista del Cobre en Cananea, hasta el 18 de septiembre de 2014. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/338827/13DPAAA INFORME DE RESULTADOS HASTA EL 18092014 v1.pdf>
- SEMARNAT. (05/2023). Dictamen Diagnóstico Ambiental - Río Sonora. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/859786/Ri\\_o\\_Sonora\\_28\\_07\\_23\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/859786/Ri_o_Sonora_28_07_23_.pdf)
- DOF. (6/12/2019). NOM-127-SSA1-2021. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5650705](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705)
- Grupo del Agua. (15/04/2016). ANEXO 1.8. Diagnóstico Ambiental y Propuesta de Remediación-Reparación-Compensación en la Cuenca del Río Sonora Afectada por el Derrame del Represo "Tinajas 1" de la Mina Buenavista Del Cobre, Cananea, Sonora. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/341773/ANEXO\\_1.8.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/341773/ANEXO_1.8.pdf)

## SOLUCIONARIO

## 1. Solución - Movilidad del arsénico en sistemas acuosos: análisis con diagramas Eh-pH

### 1. Investigación previa

- a) ¿Cuál es el límite máximo permisible de arsénico en agua destinada al consumo humano según la normativa vigente en México?

**R =** De acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, el límite para arsénico es de 0.025 mg/l y se deberá buscar reducirlo hasta 0.01 mg/l conforme a la tabla de cumplimiento gradual de la norma.

- b) Mencionen algunos de los efectos más comunes del arsénico sobre la salud humana.

**R =** Entre los más comunes se encuentran lesiones cutáneas como cambios de pigmentación y queratosis, así como trastornos cardiovasculares, diabetes y problemas en el desarrollo. La exposición crónica también se ha asociado con un mayor riesgo de cáncer, especialmente de piel, pulmón y vejiga. Además, puede provocar efectos neurológicos y afectar al sistema inmunológico. Fuente: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>.

- c) Con base en sus conocimientos previos sobre la química de sistemas acuosos, mencionen algunos parámetros fisicoquímicos que pueden afectar la movilidad de los EPT en el agua.

**R =** Entre los más importantes se encuentran el pH, el Eh, la presencia de ligandos como carbonatos, sulfatos o sulfuros, que pueden formar complejos y modificar su solubilidad; y la presencia de otros elementos que podrían promover la precipitación de minerales con EPT.

### Caso de estudio: Matehuala, San Luis Potosí

#### 2. Análisis preliminar de los datos

- a) Comparen las concentraciones de arsénico reportadas en cada sitio de muestreo con el límite máximo permisible establecido en la normativa mexicana vigente para agua potable. ¿Todos los sitios cumplen con este criterio?

**R =** No. Todos los sitios exceden el límite de la NOM-127-SSA1-2021.

- b) En los casos en que las concentraciones excedan el límite normativo, propongan posibles fuentes del arsénico detectado, considerando tanto fuentes naturales como antrópicas.

**R =** Las concentraciones elevadas de arsénico pueden explicarse por una combinación de fuentes antrópicas y naturales. Entre las fuentes antrópicas más probables se encuentra la lixiviación de residuos metalúrgicos vitrificados depositados en el sitio conocido como "El Graseo", asociados con la antigua fundidora de Matehuala. Estos materiales pueden liberar arsénico por meteorización, el cual posteriormente es transportado hacia el canal de abastecimiento. Por otro lado, también pueden existir fuentes naturales de arsénico, como la interacción agua-roca con minerales presentes en el distrito minero.

- c) Analicen la distribución espacial de las concentraciones de arsénico a lo largo del canal. ¿Se observa un patrón definido? ¿Las concentraciones más elevadas se localizan en las proximidades de alguna fuente potencial previamente identificada?

**R =** Se observa un patrón espacial claro en la distribución de las concentraciones de arsénico a lo largo del canal. El sitio A presenta una concentración muy elevada (91.51 mg/l), significativamente mayor que la registrada en los demás puntos de muestreo. En contraste, desde B hasta H las concentraciones son mucho menores y relativamente uniformes, con valores cercanos a 10-11 mg/l. Al considerar el esquema del área de estudio, este patrón es consistente con la presencia de una fuente principal de arsénico cercana al origen del canal, en las proximidades del manantial y del sitio donde se depositaron los residuos metalúrgicos.

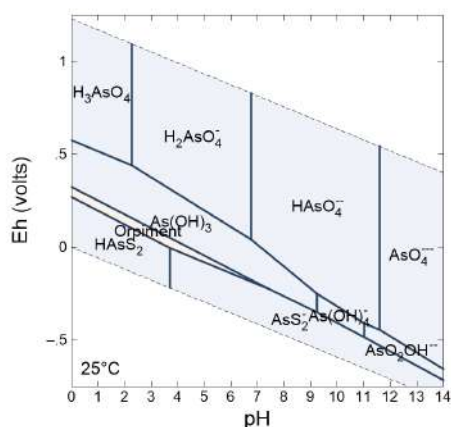
**Considerando los valores de pH y Eh reportados en la tabla, describan de manera preliminar las condiciones geoquímicas del sistema (por ejemplo, si se trata de un ambiente relativamente oxidante o reductor y si el agua presenta condiciones ácidas, neutras o alcalinas).**

**R =** Los valores de Eh cercanos a 0.20 V indican que el sistema se encuentra en condiciones oxidantes a moderadamente oxidantes, mientras que los valores de pH entre 6.7 y 8.2 corresponden a un ambiente cercano a neutro a ligeramente alcalino.

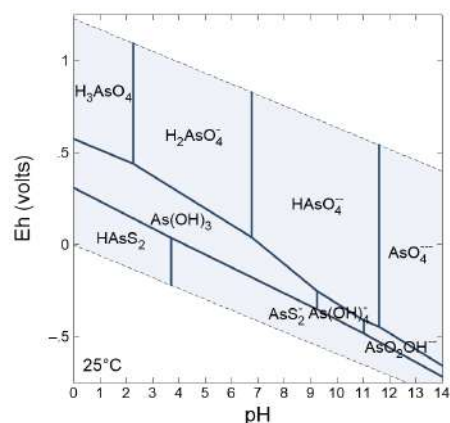
### 3. Modelado geoquímico con Geochemist's Workbench

#### 4. Interpretación de los diagramas Eh-pH

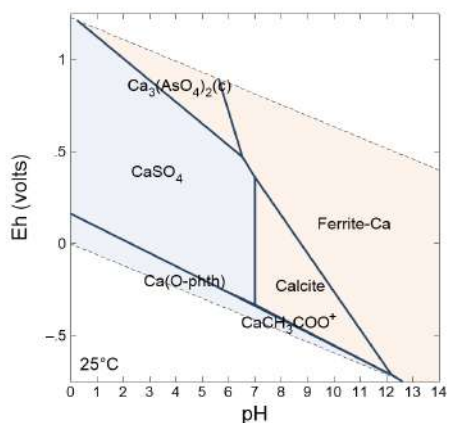
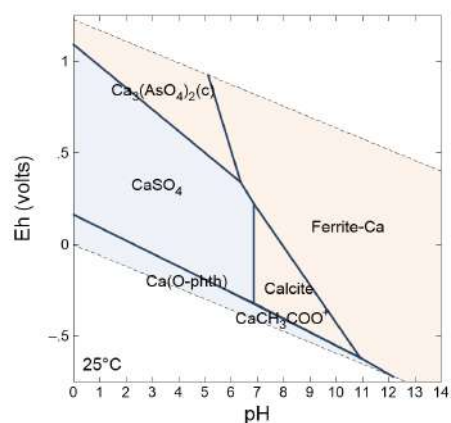
- a) Inserten los diagramas Eh-pH generados para cada muestra en el espacio siguiente y utilícenlos como base para responder las siguientes preguntas.

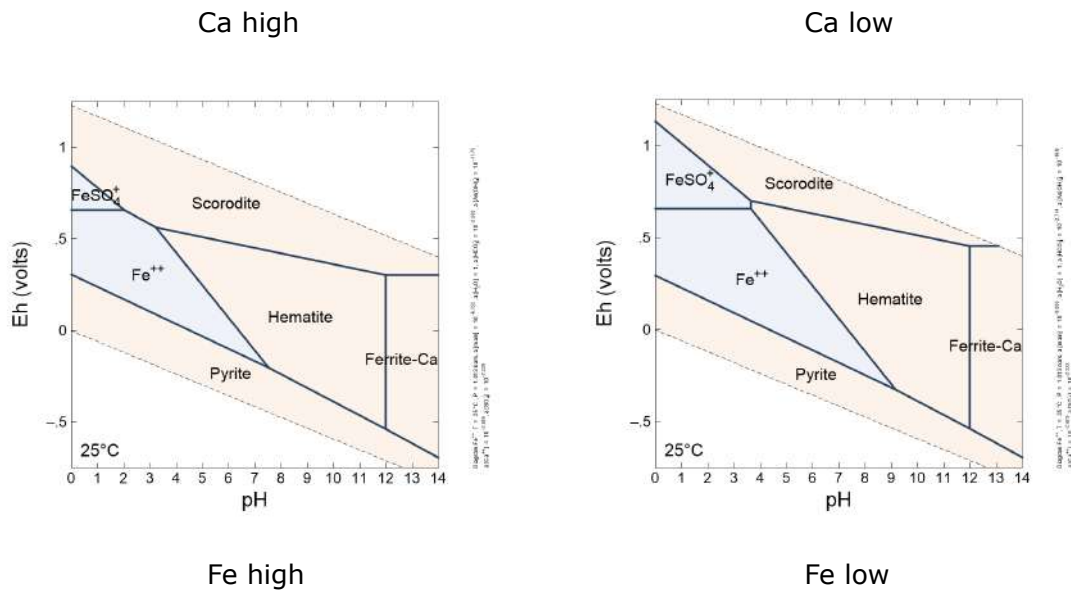


As high



As low





b) Al comparar los diagramas Eh-pH de arsénico de los dos sitios, ¿se observan diferencias en las fases minerales estables o en las especies disueltas predominantes? Describanlas.

**R =** Al comparar los diagramas Eh-pH de As de los dos sitios, la diferencia más notable es que en el diagrama "As high" aparece un campo asociado al mineral oropimente ( $As_2S_3$ ) en condiciones reductoras, mientras que en el diagrama "As low" ese campo no se observa.

c) ¿Cómo pueden explicarse esas diferencias?

**R =** Estas diferencias pueden explicarse por las variaciones en la actividad del arsénico entre las muestras "high" y "low". Al aumentar la actividad del arsénico en el sistema, se favorece la estabilización de una fase sólida que lo contiene, como oropimente.

d) ¿Cuál es la especie predominante de arsénico bajo las condiciones de pH y Eh de las dos aguas muestreadas y qué estado de oxidación tiene?

**R =** Bajo las condiciones de las dos muestras analizadas (Eh cercanos a 0.2 V y pH entre aproximadamente 7 y 8), el arsénico se encuentra en forma de especie disuelta  $HAsO_4^{2-}$ . En esta forma química, el arsénico presenta estado de oxidación 5+, que es el estado más estable en ambientes acuosos oxidantes.

e) Al comparar los diagramas Eh-pH de Ca y Fe con los de As, ¿aparecen fases minerales con arsénico que no se observen en el diagrama Eh-pH de As?

**R =** Sí. En los diagramas Eh-pH de Ca se observa la presencia de la fase sólida  $Ca_3(AsO_4)_2$ , mientras que en los diagramas Eh-pH de Fe aparece la fase escorodita  $[FeAsO_4 \cdot 2H_2O]$ .

f) ¿Qué indica la presencia de minerales de As en los diagramas Eh-pH de Ca y Fe acerca de los mecanismos que pueden controlar la movilidad del arsénico?

**R =** La presencia de minerales que contienen arsénico en los diagramas Eh-pH de Ca y Fe indica que la movilidad del arsénico en el sistema acuoso depende también de las interacciones con otros elementos presentes en el agua que pueden favorecer su precipitación. En un sistema con abundante calcio, el arsénico puede inmovilizarse

mediante la formación de minerales como los arseniatos de calcio. De manera similar, en presencia de hierro y bajo condiciones oxidantes, el arsénico puede inmovilizarse mediante la precipitación de minerales como la scorodita. En conjunto, esto indica que la presencia de Ca y Fe en el sistema puede generar mecanismos adicionales de retención sólida del arsénico, lo que contribuye a reducir su movilidad en el agua.

- g) Con base en los diagramas Eh-pH, indiquen qué cambios en las condiciones de pH y/o Eh podrían favorecer la inmovilización del arsénico. Justifiquen su respuesta señalando las fases minerales que se estabilizan bajo esas condiciones.

**R =** La inmovilización del arsénico podría favorecerse si el sistema evoluciona hacia condiciones en las que se establezcan fases minerales sólidas que contienen arsénico. Un aumento del Eh (condiciones más oxidantes) favorecería la estabilidad de minerales de As asociados al hierro, como la scorodita  $[\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ , lo que contribuiría a la precipitación y retención del arsénico. Bajo estas condiciones oxidantes, un ajuste del pH hacia valores ligeramente más ácidos también podría favorecer la estabilidad de arseniatos de calcio  $[\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2]$ , promoviendo así la inmovilización del arsénico. Por otra parte, si el sistema evolucionara hacia condiciones más reductoras (Eh más bajo), podría estabilizarse el mineral oropimente ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), lo que igualmente implicaría la precipitación del arsénico en forma sólida.

## **2. Solución - Meteorización química, distribución de elementos y exploración mineral**

### **1. Conceptos clave: elementos pathfinder y exploración geoquímica**

Lean el archivo "Elementos pathfinder" de la carpeta "Ejercicio 2" y respondan las siguientes preguntas.

- a) ¿Qué son los elementos pathfinder y qué características los hacen útiles para la exploración de yacimientos?

**R =** Los elementos pathfinder son aquellos que se encuentran asociados de manera sistemática con los minerales o elementos de interés económico en un tipo de yacimiento. Aunque no siempre tienen valor económico por sí mismos, su presencia permite inferir la existencia de una mineralización cercana, ya que forman parte del mismo sistema geológico y geoquímico. Estos elementos son útiles en la exploración porque suelen ser más móviles bajo ciertas condiciones fisicoquímicas, lo que les permite dispersarse desde el yacimiento y generar anomalías detectables en suelos, sedimentos, agua o incluso en la vegetación. Además, pueden analizarse de forma relativamente sencilla y económica, y tienden a presentarse en halos de dispersión más amplios que los del elemento objetivo, lo que facilita la localización de depósitos ocultos.

- b) ¿Cuáles son los elementos pathfinder más relevantes para yacimientos hidrotermales de vetas de metales preciosos (Au y Ag) y de base (Cu, Zn y Pb)?

**R =** En yacimientos hidrotermales de metales preciosos como oro y plata, los pathfinders más comunes incluyen arsénico (As), antimonio (Sb), mercurio (Hg), telurio (Te), selenio (Se), azufre (S) y uranio (U). En el caso de yacimientos de metales base como cobre, zinc y plomo, los pathfinders incluyen plata (Ag), oro (Au), arsénico (As), antimonio (Sb) y manganeso (Mn).

### **2. Análisis cuantitativo: factores de enriquecimiento**

#### **3. Identificación de anomalías geoquímicas**

- a) ¿Cuáles son los dos elementos que presentan FE más altos en los sedimentos analizados?

**R =** Los dos elementos que presentan los FE más altos son As y Sb.

#### **4. Interpretación geoquímica: movilidad y meteorización**

- a) ¿Cuáles son los principales factores que controlan la tendencia de un elemento a movilizarse o a concentrarse en los sedimentos? Consideren tanto las propiedades del elemento (por ejemplo, su carga y radio iónico) como las condiciones fisicoquímicas del sistema (por ejemplo, pH y Eh) y los procesos de retención en sedimentos (como adsorción o precipitación). Expliquen brevemente cómo influyen estos factores.

**R =** Elementos con alta carga y radio iónico pequeño tienden a formar especies poco solubles, lo que favorece su acumulación. Las condiciones fisicoquímicas, como el pH y el Eh, controlan la solubilidad y especiación de los elementos. Por ejemplo, en ambientes oxidantes se forman óxidos que pueden retener metales, mientras que cambios en pH pueden favorecer su disolución. Además, procesos como la adsorción en arcillas y óxidos, así como la precipitación, permiten que los elementos se fijen en los sedimentos, explicando su concentración en estos materiales.

b) ¿Qué proceso de meteorización química podría explicar de la mejor manera la liberación de los elementos analizados en este sistema?

**R =** La liberación de los elementos en este sistema podría relacionarse con la oxidación de los sulfuros, proceso que conduce a la precipitación de hidróxidos de Fe y a la movilización de metales como Pb, Zn y Cu.

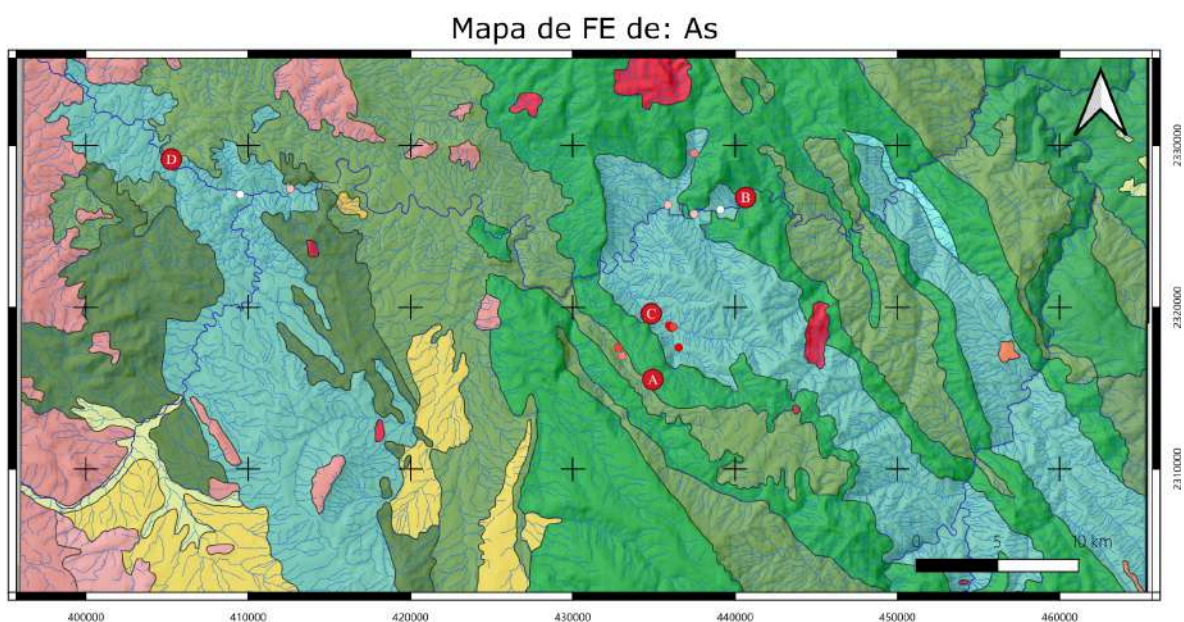
### 5. Selección de elementos pathfinder

a) Con base en los FE obtenidos y en el contexto de yacimientos hidrotermales, seleccionen los dos elementos que consideren más adecuados como pathfinders. Argumenten su elección.

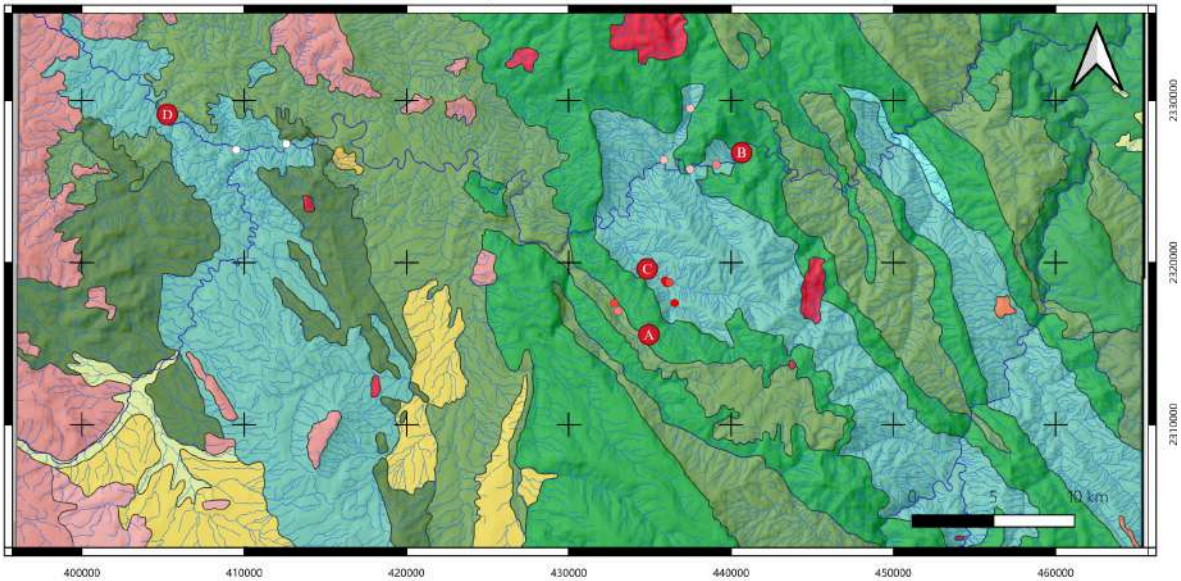
**R =** Los elementos que seleccionaremos como pathfinders son As y Sb. Estos elementos presentan FE muy altos en los sedimentos, lo que indica un enriquecimiento notable respecto a los valores promedio de la corteza continental superior. Además, estos elementos están comúnmente asociados a yacimientos hidrotermales de metales preciosos y de base.

### 6. Análisis espacial de los patrones de enriquecimiento

- Peguen a continuación las dos imágenes generadas.



Mapa de FE de: Sb



## 7. Interpretación del sistema natural

- a) Considerando que un FE > 2 es de interés, identifiquen los sitios de muestreo con los valores más elevados para cada elemento pathfinder.
  - Pathfinder Sb: Los FE más altos se observan en los sitios C263467, C263466, C263465, C263476 y C263477. Concentrados entre los sitios A y C.
  - Pathfinder As: Los FE más altos se observan en los sitios C263467, C263466, C263465, C263476 y C263477. Concentrados entre los sitios A y C.
- b) Analicen la distribución espacial: ¿los valores elevados de los distintos pathfinders se concentran en los mismos sitios o se distribuyen de manera dispersa?

**R =** Los FE elevados de ambos pathfinders muestran una distribución espacial coherente y concentrada, con un claro agrupamiento en la zona central del área de estudio, en lugar de una dispersión aleatoria.

- c) Considerando que se trata de sedimentos de río y tomando en cuenta los procesos que los generan y transportan, ¿dónde es más probable que se localice un yacimiento: aguas arriba o aguas abajo de un sitio con valores elevados? Argumenten su respuesta.

**R =** Es más probable que el yacimiento se localice aguas arriba de los sitios con FE elevados, ya que los sedimentos fluviales actúan como vectores de transporte de material erosionado desde la zona fuente.

- d) Indiquen en qué zona debería continuar la exploración (A, B, C o D) y argumenten su elección.

**R =** La exploración debería concentrarse en la zona A, ya que en esta área se observa la mayor coincidencia espacial y magnitud de las anomalías de As y Sb. Esta zona representa el punto más cercano aguas arriba a la posible fuente de mineralización, antes de que los sedimentos sean transportados aguas abajo. Además, se encuentra en el parteguas entre dos escorrentías separadas que tienen muestras enriquecidas.

- e) Expliquen cómo el análisis geoquímico de sedimentos (FE y distribución espacial) permite identificar zonas con potencial mineral.

**R =** El análisis geoquímico de sedimentos permite identificar zonas con potencial mineral mediante la detección de anomalías en los FE. Estos patrones permiten delimitar zonas prioritarias para la exploración, ya que reflejan la dispersión de elementos desde un cuerpo mineralizado oculto.

## **8. Implicaciones ambientales**

- a) ¿Existen sitios de muestreo con concentraciones que excedan los límites permisibles? En caso afirmativo, ¿qué implicaciones ambientales pueden tener concentraciones elevadas de estos elementos?

**R =** Sí, varios sitios presentan concentraciones que exceden los límites permisibles establecidos, especialmente para As, cuyo límite es 22 ppm, y que alcanza valores considerablemente mayores en diversas muestras.

La presencia de concentraciones elevadas de As puede representar riesgos significativos para los ecosistemas y la salud humana.

- b) ¿En qué medida estas concentraciones podrían ser resultado de procesos naturales de meteorización y no necesariamente de contaminación?

**R =** Pueden explicarse en gran medida por procesos naturales de meteorización, especialmente la oxidación de sulfuros, que libera metales al ambiente. La asociación espacial de elementos pathfinder y la coherencia de las anomalías sugieren un origen natural, más que una fuente de contaminación antrópica.

### 3. Solución - Adsorción de Metales en Agua Contaminada: Modelación con Visual MINTEQ

#### 1. Exploración Conceptual Inicial

- a) Antes de realizar las simulaciones, mencionen y describan brevemente algunos factores fisicoquímicos del sistema acuoso o del mineral que pueden influir en la adsorción de especies disueltas. Consideren, por ejemplo, el pH o Eh del agua, el tipo de mineral y las propiedades de su superficie, la especiación química de los metales o la presencia de otros iones mayoritarios en solución.

**R =** La adsorción de especies disueltas en minerales puede verse afectada por diversos factores fisicoquímicos del sistema acuoso y del mineral. El pH del agua controla tanto la carga superficial de los minerales como la forma química en que se encuentran los metales en solución, lo que puede favorecer o limitar su adsorción. El Eh del sistema determina el estado de oxidación de algunos elementos y, por lo tanto, su especiación química. El tipo de mineral también es importante, ya que distintos minerales presentan propiedades superficiales diferentes; por ejemplo, los minerales arcillosos pueden retener cationes mediante intercambio catiónico, mientras que otros minerales pueden adsorber especies en sus superficies reactivas. Finalmente, la presencia de otros iones en solución puede influir en la adsorción al competir por los sitios disponibles o modificar las condiciones químicas del sistema.

#### 2. Simulación Geoquímica con Visual MINTEQ

##### Resultados

En la tabla siguiente, anoten el porcentaje de As, Hg y Zn adsorbido en cada material evaluado.

Escenario 1 (pH = 7.7)				
Sitio	Material	%As Adsorbido	%Hg Adsorbido	%Zn Adsorbido
A	Ferrhidrita	98.145	0	95.157
B	Montmorillonita	0	99.999	100
C	Ferrhidrita+Montmorillonita	97.841	99.999	100

En condiciones de sequía, cuando disminuye el caudal del río y se concentran las descargas industriales y urbanas, se han registrado valores de pH cercanos a 5 para el agua del río. Para evaluar cómo podría afectar este cambio a la eficacia de los materiales evaluados, modelen un segundo escenario con pH = 5. Reporten los nuevos resultados en la tabla siguiente.

Escenario 2 (pH = 5)				
Sitio	Material	%As Adsorbido	%Hg Adsorbido	%Zn Adsorbido
A	Ferrhidrita	63.012	0	0.743
B	Montmorillonita	0	73.505	100

C	Ferrhidrita+Montmorillonita	63.463	73.483	100
---	-----------------------------	--------	--------	-----

### 3. Preguntas de análisis e interpretación de resultados

- a) Comparen el comportamiento del oxi-hidróxido de hierro (ferrihidrita) y del mineral arcillosos (montmorillonita). ¿Qué diferencias observan en la adsorción de As, Hg y Zn?

**R =** La ferrihidrita presenta una adsorción importante de arsénico, mientras que la adsorción de Hg es nula y la de Zn es baja en estas condiciones. En cambio, los minerales arcillosos muestran una adsorción muy alta de Hg y Zn, mientras que la adsorción de As es nula.

Estas diferencias pueden explicarse considerando los mecanismos de adsorción dominantes en cada tipo de mineral. En los minerales arcillosos, la adsorción ocurre principalmente mediante intercambio catiónico, por lo que cationes como  $\text{Hg}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$  pueden ser retenidos en los sitios de intercambio asociados a la CIC del mineral. En el modelo utilizado, la montmorillonita presenta sitios de intercambio definidos por su CIC, lo que favorece la adsorción de estos cationes.

En cambio, el arsénico suele encontrarse en solución como especies neutras o aniónicas, por lo que no se adsorbe fácilmente mediante intercambio catiónico en los minerales arcillosos. Por esta razón, su adsorción es prácticamente nula en la montmorillonita en las simulaciones.

- b) Al comparar ambos escenarios de pH, identifiquen qué metal o metaloide muestra la mayor disminución de adsorción y en qué mineral se observa más claramente este cambio cuando el pH baja a 5. Expliquen por qué ocurre este cambio considerando la competencia con  $\text{H}^+$  y la carga superficial de los minerales.

**R =** Al comparar ambos escenarios se observa que el Zn es el elemento cuya adsorción disminuye más al bajar el pH, especialmente en los oxi-hidróxidos de hierro. Por ejemplo, en la ferrihidrita la adsorción de Zn disminuye de valores muy altos a valores cercanos a cero. Este cambio ocurre porque al disminuir el pH aumenta la concentración de  $\text{H}^+$  en la solución, los cuales compiten con los cationes metálicos por los sitios de adsorción en la superficie de los minerales. Además, a pH más bajo muchas superficies minerales tienden a adquirir carga más positiva, lo que reduce la atracción electrostática hacia cationes como  $\text{Zn}^{2+}$ . Como resultado, una mayor proporción del metal permanece disuelta en el agua y disminuye su adsorción en los minerales.

- c) En el agua del río también están presentes iones mayoritarios como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Expliquen cómo la presencia de estos iones podría influir en la adsorción de los metales y metaloides potencialmente tóxicos en las superficies minerales.

**R =** Los iones mayoritarios pueden influir en la adsorción de metales de varias maneras. Algunos cationes, como  $\text{Na}^+$  o  $\text{Ca}^{2+}$ , pueden competir con otros cationes metálicos por los sitios de adsorción en los minerales arcillosos, lo que puede disminuir la cantidad de metales retenidos. Además, algunos aniones pueden formar complejos en solución con ciertos metales, lo que reduce su disponibilidad para adsorberse en las superficies minerales. Finalmente, la presencia de estos iones aumenta la fuerza iónica del sistema, lo que puede modificar las interacciones electrostáticas entre las especies disueltas y las superficies minerales.

- d) La caolinita es un mineral 1:1 y la montmorillonita es un mineral 2:1. Expliquen por qué no se consideró a la caolinita como material de adsorción. Tomen en cuenta cómo estas diferencias estructurales influyen en su CIC y en su capacidad de adsorber metales.

**R =** La caolinita es un mineral de tipo 1:1, formado por una capa tetraédrica y una capa octaédrica. Esta estructura presenta poca sustitución, por lo que genera poca carga negativa permanente y su capacidad de intercambio catiónico es baja. En cambio, la montmorillonita es un mineral 2:1, compuesto por dos capas tetraédricas que rodean una capa octaédrica. En esta estructura ocurren sustituciones que generan carga negativa permanente en las láminas minerales. Esta carga negativa permite retener cationes intercambiables, lo que da lugar a una CIC mucho mayor. Como resultado, la montmorillonita puede adsorber mayores cantidades de cationes metálicos como  $Hg^{2+}$  y  $Zn^{2+}$ .

- e) Con base en los resultados obtenidos en ambos escenarios de pH, ¿qué material o combinación de materiales recomendarían para construir una barrera de remediación en el Río San Pedro? Justifiquen su respuesta comparando la adsorción de As, Hg y Zn y considerando la posible variabilidad de las condiciones del sistema.

**R =** Con base en los resultados obtenidos, la opción más adecuada sería utilizar una combinación de ferrihidrita y montmorillonita. La ferrihidrita presenta una alta capacidad para adsorber arsénico y también muestra una adsorción significativa de zinc, mientras que la montmorillonita adsorbe eficientemente cationes como  $Hg^{2+}$  y  $Zn^{2+}$  debido a su elevada capacidad de intercambio catiónico. La combinación de ambos minerales permite remover distintos tipos de contaminantes mediante mecanismos de adsorción diferentes. Además, esta combinación mantiene una capacidad relativamente alta de adsorción incluso cuando el pH del sistema disminuye, lo cual es importante considerando que las condiciones químicas del río pueden variar durante periodos de sequía.

#### 4. Solución - Evolución magmática y enriquecimiento en tierras raras (REE): implicaciones para la exploración

##### 1. Exploración conceptual

- a) Mencionen y describan brevemente dos procesos magmáticos que podrían producir un enriquecimiento de elementos incompatibles como las REE en una secuencia de rocas ígneas cogenéticas.

**R =** El enriquecimiento de elementos incompatibles como las REE en sistemas magmáticos puede relacionarse con procesos de cristalización fraccionada o procesos de fusión parcial. Durante la cristalización fraccionada, los minerales que se forman primero incorporan preferentemente elementos compatibles, mientras que los elementos incompatibles, como las REE, permanecen en el líquido residual y se concentran progresivamente a medida que el magma evoluciona. Por otro lado, cuando ocurre un bajo grado de fusión parcial del manto, los elementos incompatibles se concentran de inmediato en el fundido, lo que genera magmas enriquecidos.

##### Caso de Estudio: Sierra La Vasca, Coahuila.

##### 2. Construcción de diagramas con Excel

Diagrama TAS.

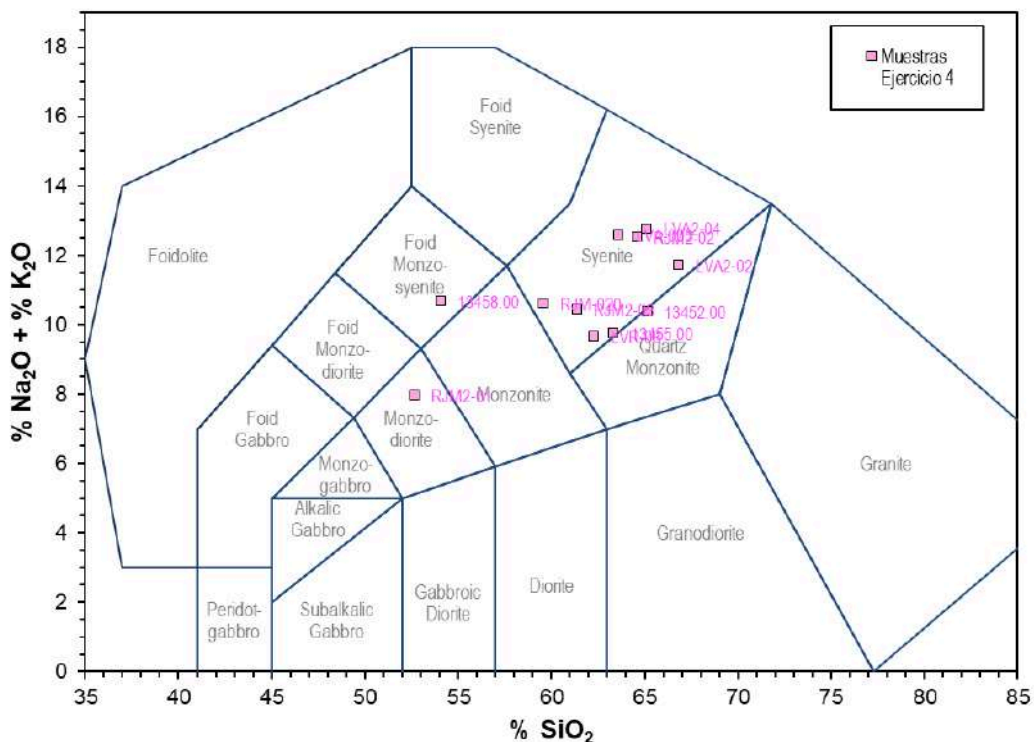
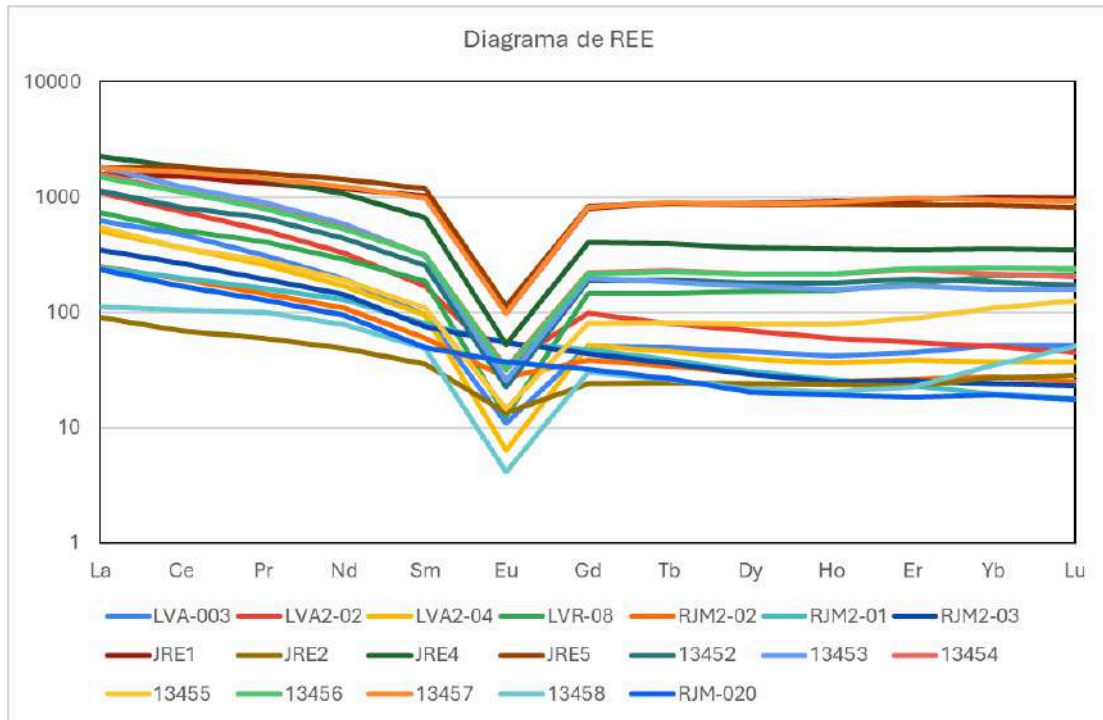


Diagrama de REE



### 3. Descripción de los datos geoquímicos

- a) ¿Cómo se clasifican las rocas ígneas con base en su ubicación en el diagrama TAS y qué afinidad geoquímica tienen?  
**R =** Todas las rocas presentan una afinidad claramente alcalina. La mayoría se clasifican como sienitas, mientras que dos muestras se encuentran en el límite entre sienitas y cuarzo-monzonitas, otra se clasifica como monzodiorita y otra es una monzosienita de feldespatoideas.
- b) ¿En general, observan alguna relación entre el contenido de sílice y el contenido de álcalis de las rocas?  
**R =** Sí. Por lo general, al aumentar el contenido de sílice de las rocas se aprecia un incremento en el contenido de álcalis.
- c) Describan los patrones de REE observados en el diagrama multielemental.  
**R =** En general, los patrones de REE muestran un notable enriquecimiento de REE ligeras (LREE) respecto a las pesadas (HREE), evidenciado por pendientes negativas de las LREE y patrones planos o ligeramente cóncavos de las HREE. La mayoría de las muestras, sobre todo las que presentan las concentraciones más altas de REE, se caracterizan por una marcada anomalía negativa de europio, lo cual sugiere que durante la evolución del magma ocurrió cristalización fraccionada de plagioclasa.
- d) ¿Existe alguna relación entre el contenido de sílice, álcalis y el enriquecimiento REE?  
**R =** Existe una relación clara entre el contenido de sílice, los álcalis y el enriquecimiento en REE, ya que las rocas más diferenciadas, con mayores contenidos de sílice y álcalis, son también aquellas que presentan los mayores niveles de enriquecimiento en tierras raras.

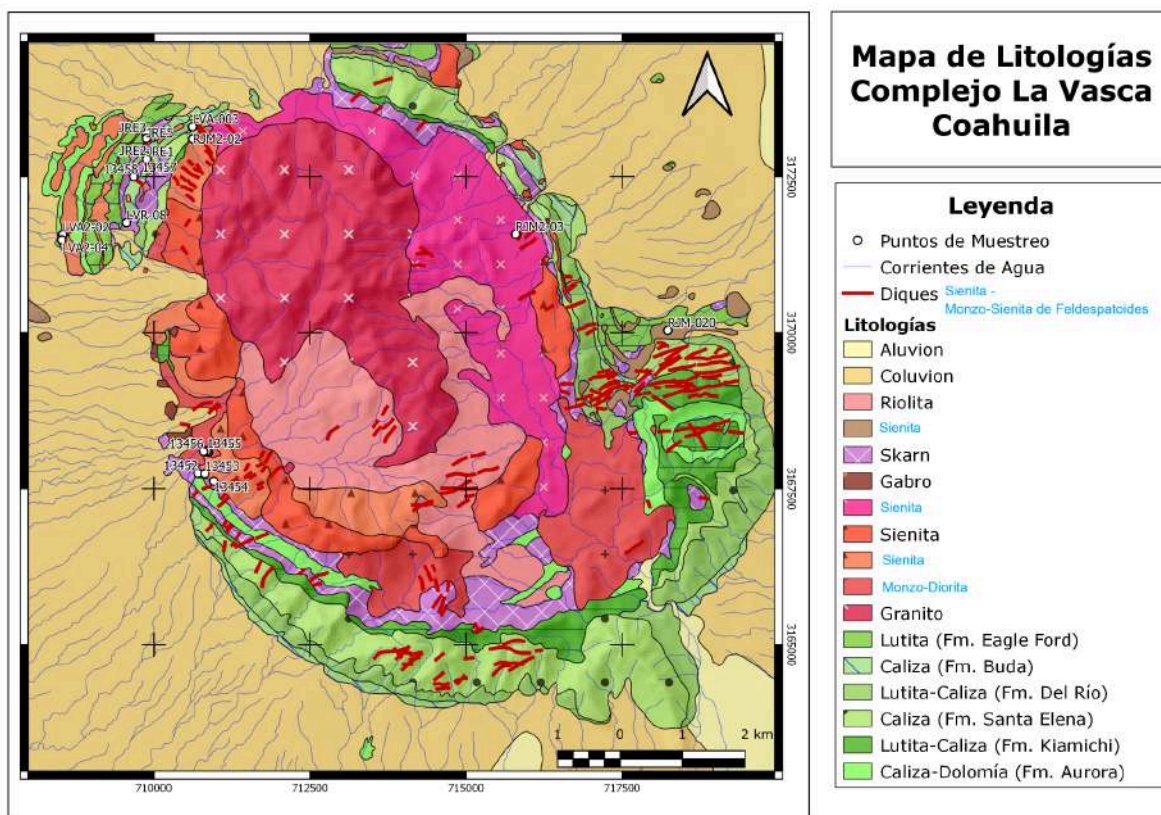
### 4. Interpretación petrogenética de los datos geoquímicos

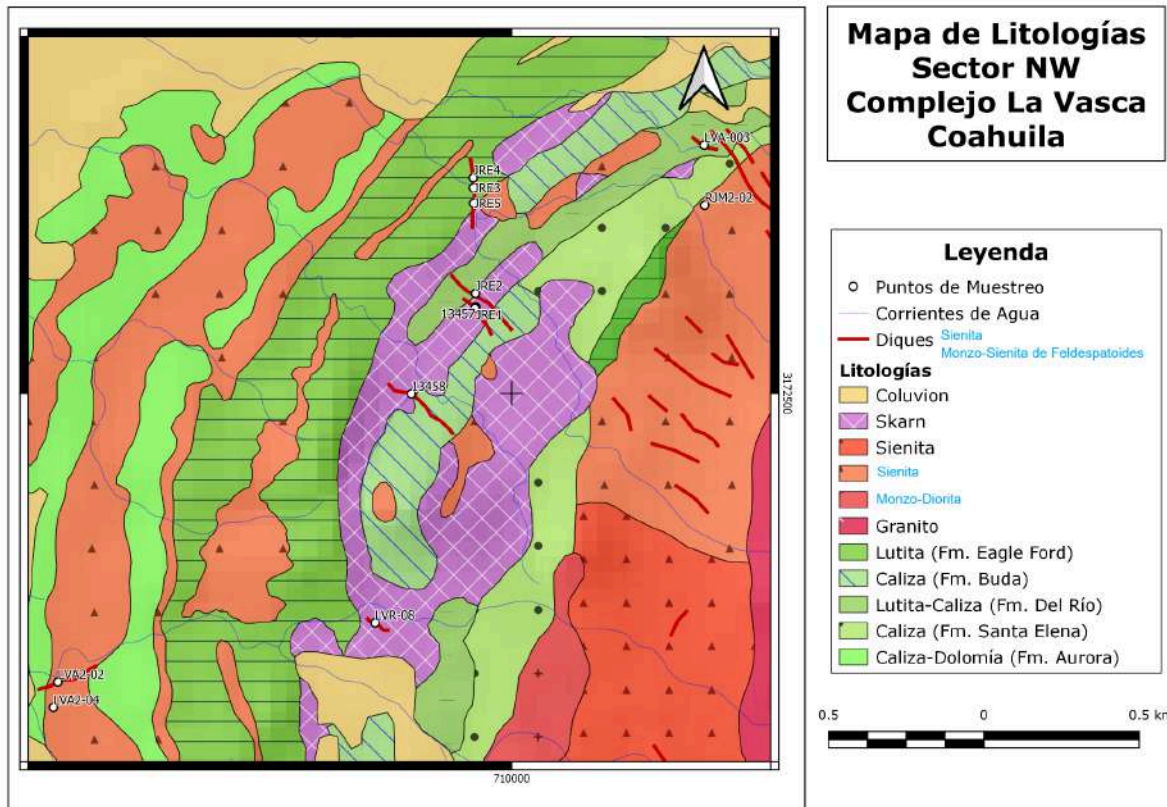
- a) Expliquen qué proceso magmático pudo haber generado las rocas más ricas en sílice y por qué estas presentan altas concentraciones de álcalis y REE.

**R** = El proceso magmático que mejor explica la formación de las rocas más ricas en sílice es la cristalización fraccionada. A medida que el magma evoluciona, los minerales que cristalizan tempranamente, como plagioclasa, piroxenos y olivino, se separan del fundido, lo que provoca que el magma residual se enriquezca progresivamente en sílice, álcalis y elementos incompatibles como las REE. La presencia de una anomalía negativa de europio refuerza esta interpretación, ya que indica la remoción de plagioclasa durante la evolución del sistema. En consecuencia, las rocas más evolucionadas presentan mayores concentraciones de álcalis y REE debido a la acumulación de estos elementos en el líquido residual.

### 5. Integración espacial

En la leyenda de los mapas que se proporcionan enseguida (Martínez-Salinas, 2023), añadan información sobre las litologías faltantes (muestras no clasificadas).





- a) Analicen los mapas y describan la distribución espacial de las litologías ígneas en el Complejo La Vasca.

**R =** Las rocas alcalinas más enriquecidas en REE se concentran en la periferia del complejo ígneo como cuerpos plutónicos y diques, mientras que las rocas graníticas, más enriquecidas en  $\text{SiO}_2$  y con menor contenido de álcalis respecto a las sienitas, se encuentran en el centro.

## 6. Aplicación a la exploración mineral

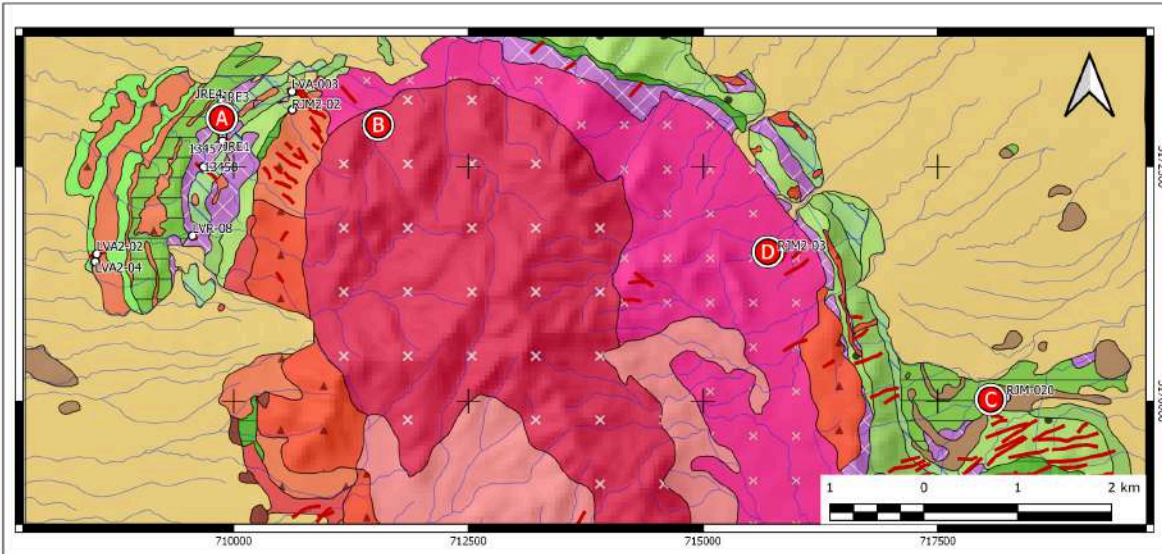
- a) Expliquen cómo puede utilizarse la relación entre diferenciación magmática y enriquecimiento en REE para identificar zonas favorables para la exploración.

**R =** La relación entre diferenciación magmática y enriquecimiento en REE permite identificar zonas favorables para la exploración al reconocer que los elementos incompatibles se concentran en los magmas residuales durante las etapas avanzadas de la evolución. Por ello, las zonas donde predominan rocas altamente evolucionadas, con altos contenidos de sílice y álcalis, representan los ambientes más propicios para la concentración de REE.

- b) Se han identificado cuatro posibles zonas para la exploración (A-D). Seleccionen el sitio más favorable y justifiquen su elección con base en evidencias geoquímicas y espaciales.

**R =** El sitio más favorable para la exploración es el sitio A, ya que se localiza en la parte NW del complejo, donde se concentran litologías altamente evolucionadas como diques de sienitas, las cuales están más enriquecidas en REE. Estas rocas presentan características geoquímicas que indican un alto grado de diferenciación magmática, como su enriquecimiento en elementos incompatibles, especialmente álcalis y LREE, o la presencia de una anomalía negativa de europio muy marcada.

## Mapa de Sitios de Exploración - Complejo La Vasca Coahuila

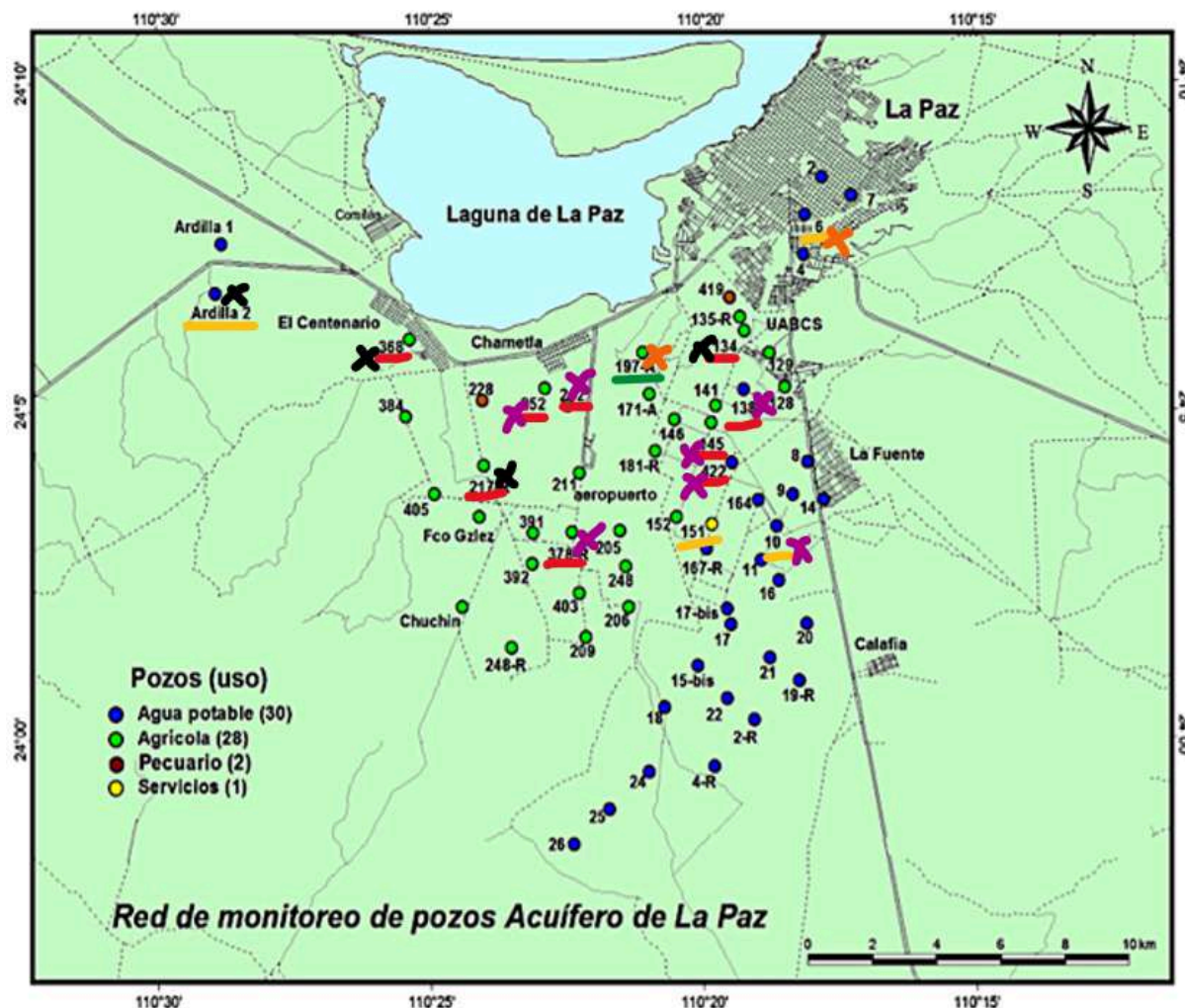


### Legenda

○ Puntos de Muestreo	Coluvion	Sienita	Lutita-Caliza (Fm. Del Río)
— Corrientes de Agua	Riolita	LVA2-04/RJM2-02/13452	Caliza (Fm. Santa Elena)
— Diques LVA2-02/LVA-003/13458	RJM-020	RJM2-01	Lutita-Caliza (Fm. Kiamichi)
<b>Litologías</b>	Skarn	Granito	Caliza-Dolomia (Fm. Aurora)
Aluvion	Gabro	Lutita (Fm. Eagle Ford)	
	RJM2-03	Caliza (Fm. Buda)	

## 5. Solución - Análisis hidrogeoquímico y balance hídrico en un acuífero costero: el caso del acuífero La Paz

Se muestra el mapa con las modificaciones solicitadas en los puntos posteriores:



### 1. Evaluación de la calidad del agua (SDT)

- a) Analicen los valores de SDT medidos en los diferentes pozos e indiquen cuáles cumplen con la normativa vigente.

**R =** El único pozo que cumple con la normativa es el 197-A (SDT = 484 mg/l).

- b) Con el fin de visualizar los pozos que cumplen con la normativa, aquellos cercanos al límite permitido y los que presentan concentraciones significativamente superiores al valor normativo, agrupen los pozos en tres categorías: A (SDT < 1000 mg/l), B (SDT = 1000-1500 mg/l) y C (SDT > 1500 mg/l).

**R =**

Categoría A: 197-A.

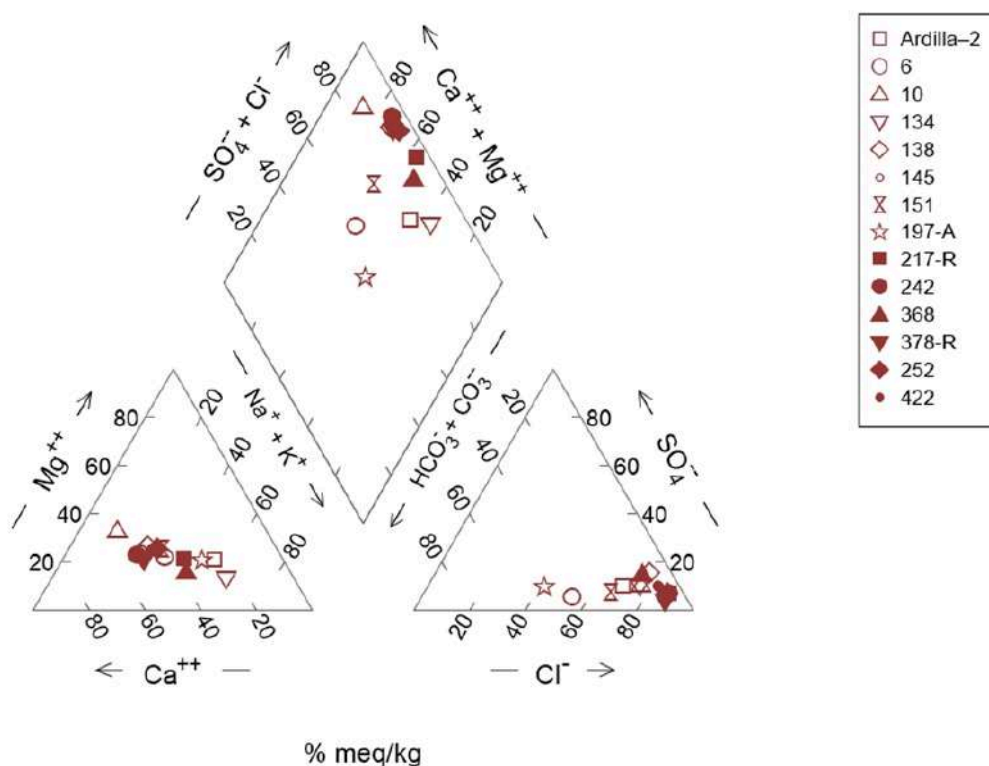
Categoría B: Ardilla-2, 6, 10 y 151.

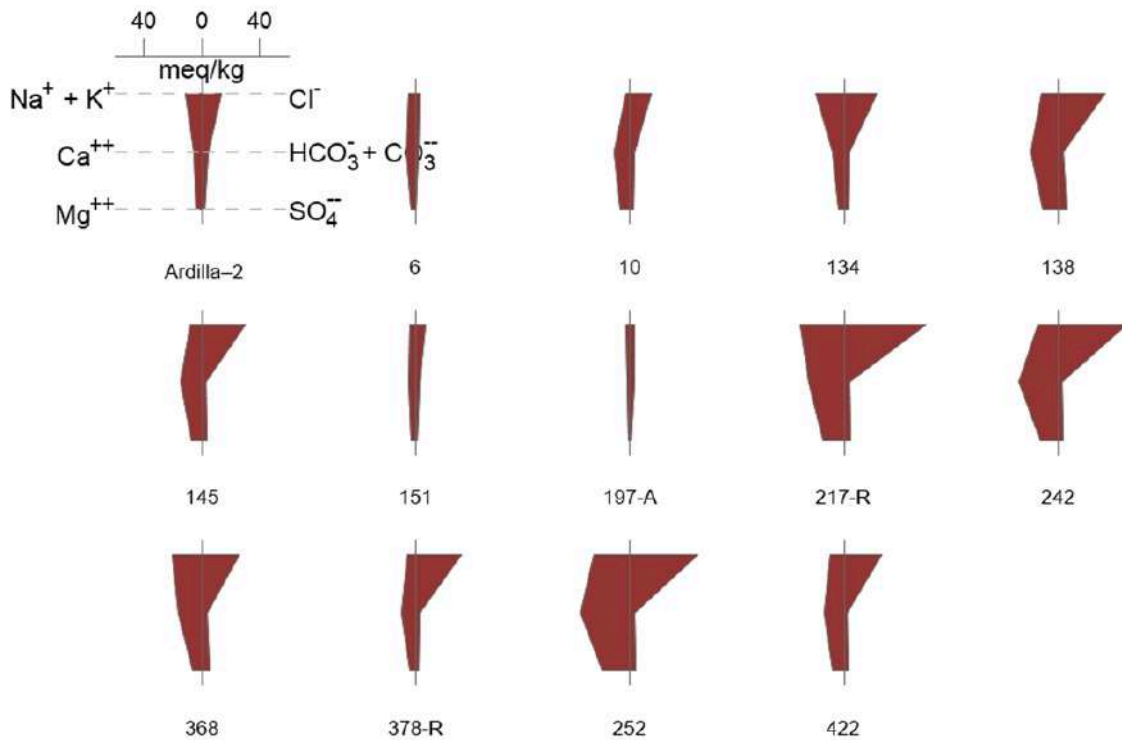
Categoría C: 134, 138, 145, 217-R, 242, 368, 378-R, 252 y 422.

- c) En el mapa, señalen los pozos de las tres categorías con diferentes colores: usen verde para los pozos de la categoría A, amarillo para los pozos de la categoría B y rojo para los pozos de la categoría C. Describan la distribución de los pozos de las diferentes categorías.

**R =** Se muestra el mapa editado al inicio de la solución. Solo hay un pozo de la categoría A, por lo que no es posible identificar un patrón de distribución espacial para esta categoría. Los pozos de la categoría C se concentran principalmente en la zona central y centro-norte del acuífero, coincidiendo con el sector donde se observa una mayor densidad de pozos. En contraste, los pozos de la categoría B se distribuyen de manera más dispersa y tienden a ubicarse en sectores periféricos respecto al área donde se concentran los pozos de categoría C.

## 2. Clasificación hidrogeoquímica (diagramas de Piper y Stiff).





### 3. Análisis e interpretación de los datos

- a) A partir del diagrama de Piper, identifiquen los aniones y cationes dominantes en las muestras y agrupen el agua en familias y subfamilias hidrogeoquímicas (bicarbonatadas/sulfatadas/cloruradas cálcicas/sódicas/magnesianas).

**R =** En el triángulo de aniones de Piper, se observa que Cl<sup>-</sup> es el anión dominante en la mayoría de las muestras, por lo que el agua se clasifica principalmente dentro de la familia clorurada. Las muestras 197-A y 6 presentan una misma proporción de Cl<sup>-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, por lo que se clasifican como mixtas (bicarbonatadas-cloruradas). En el triángulo de cationes, predominan Ca<sup>2+</sup> y Na<sup>+</sup>: las muestras 217-R, 368, Ardilla-2 y 134 pertenecen a la subfamilia sódica, mientras que 10, 138, 145, 151, 242, 378-R, 252 y 422 pertenecen a la subfamilia cálcica.

- b) ¿Qué sugiere la dominancia regional de Cl<sup>-</sup> respecto al origen de este soluto en el acuífero?

**R =** La dominancia regional de Cl<sup>-</sup> sugiere la incorporación de solutos típicamente asociados a ambientes marinos, ya que este ion es abundante en el agua de mar.

- c) Corroboen la clasificación hidrogeoquímica obtenida a partir de los diagramas de Piper analizando los diagramas de Stiff y, posteriormente, señalen en el mapa las familias y subfamilias identificadas, empleando un símbolo de distinto color para cada una: dibujen una cruz negra para el agua clorurada sódica, una cruz púrpura para la clorurada cálcica y una cruz naranja para el agua mixta. Describan la distribución espacial de las diferentes familias de agua.

**R =** Las modificaciones al mapa se muestran anteriormente.

El agua clorurada cálcica tiene una amplia distribución en la porción centro-norte del acuífero, donde también hay la mayor densidad de pozos. La mayoría del agua clorurada sódica y mixta se distribuye alrededor de la Laguna de La Paz.

#### 4. Relación con la geología regional

- a) La región presenta un basamento granítico. ¿Qué iones podrían liberarse durante la meteorización de rocas graníticas? Justifiquen su respuesta mencionando de cuáles minerales podrían derivar esos iones.

**R =** En un basamento granítico, la meteorización produciría iones  $K^+$  (meteorización de ortoclasa y biotita) y menores cantidades de  $Na^+$  y  $Ca^{2+}$  (meteorización de plagioclasa y anfíbol).

- b) Comparen la composición observada en el agua con la que se esperaría a partir de la meteorización del basamento granítico. Identifiquen los iones que no podrían derivar de este proceso y propongan un fenómeno que podría explicar su presencia.

**R =** La meteorización del granito no podría provocar el enriquecimiento en  $Cl^-$  y  $Ca^{2+}$  medido en la mayoría de los pozos. El aporte de dichos cationes y aniones al agua subterránea podría provenir de la intrusión de agua marina en el acuífero.

#### 5. Balance hídrico y dinámica del acuífero

A nivel nacional, México enfrenta problemas crecientes de escasez hídrica, agravados por la contaminación y el deterioro de los acuíferos como consecuencia de su sobreexplotación y de una supervisión y regulación insuficientes para su preservación.

La ciudad de La Paz se localiza en una región desértica donde el acuífero constituye prácticamente la única fuente permanente de abastecimiento de agua. Sin embargo, la demanda hídrica asociada al crecimiento urbano, así como a las actividades industriales y agropecuarias en la zona, aumenta a una tasa anual promedio cercana al 5%, lo que ejerce una presión creciente sobre el acuífero (Cruz-Falcón et al., 2017 y referencias incluidas).

Estas consideraciones resaltan la importancia de evaluar no solo la calidad del agua subterránea, sino también el estado del acuífero y las implicaciones que un desbalance hídrico puede tener sobre su dinámica y su sostenibilidad a largo plazo.

Para el acuífero La Paz, se ha estimado una tasa de recarga de 20-23  $Mm^3/año$ , mientras que la tasa de descarga es de 29-32  $Mm^3/año$ .

- a) ¿Qué indica esta relación sobre el estado del sistema?

**R =** El hecho de que la tasa de descarga supera a la tasa de recarga indica que el acuífero presenta un desbalance hídrico negativo provocado por una sobreexplotación.

- b) Analicen las consecuencias de una extracción que supera la recarga durante varios años, considerando el comportamiento del nivel freático, la formación de conos de depresión y la modificación del flujo natural del agua subterránea.

**R =** La sobreexplotación de un acuífero lleva a un descenso del nivel freático. Aunado a esto, la extracción de agua a una tasa mayor que la tasa de recarga produce conos de abatimiento alrededor de los pozos, los cuales modifican la morfología del nivel freático e inducen un cambio en el gradiente hidráulico, redirigiendo el flujo del agua subterránea hacia los pozos.

- c) Expliquen cómo estos cambios podrían afectar el equilibrio dinámico entre el agua dulce y el agua salada en un acuífero costero y qué implicaciones tendría esto en la composición química del agua subterránea.

**R =** Los cambios en la dirección del flujo de agua subterránea inducidos por los conos de abatimiento alterarían el equilibrio entre el agua dulce y el agua salada, favoreciendo el ingreso de agua marina al acuífero. Este proceso llevaría a un aumento en la concentración de SDT, particularmente de cloruros, deteriorando la calidad del agua subterránea.

## **6. Integración Final**

- a) Basándose en la distribución espacial de los valores de SDT, la clasificación hidrogeoquímica del agua, la distribución de las diferentes familias y el estado del balance hídrico del acuífero, propongan una explicación fundamentada para el proceso que está deteriorando la calidad del agua en el acuífero La Paz, integrando al menos tres evidencias específicas derivadas de sus resultados.

**R =** El deterioro de la calidad del agua en el acuífero La Paz se explica principalmente por intrusión marina favorecida por la sobreexplotación. Esta interpretación se sustenta en al menos tres evidencias derivadas de los resultados: (1) los SDT elevados, frecuentemente por encima del límite normativo, muestran un incremento regional de salinidad, con concentraciones más marcadas en la zona centro y centro-norte del acuífero; (2) la clasificación hidrogeoquímica indica una dominancia de agua clorurada (Cl<sup>-</sup>), característica consistente con una influencia marina; y (3) el balance hídrico es negativo, ya que la descarga supera a la recarga, lo que evidencia un estado de sobreexplotación. En conjunto, estos elementos sugieren que la extracción excesiva ha provocado un descenso del nivel freático y la formación de conos de abatimiento, modificando el gradiente hidráulico natural y favoreciendo el ingreso de agua salada al acuífero.

## 6. Solución - Ejercicio Integrador 1 - Agua Superficial y Contaminantes

En este ejercicio utilizarán un conjunto de datos de agua muestreada a lo largo de un río para determinar posibles fuentes de contaminación y evaluar estrategias de remediación.

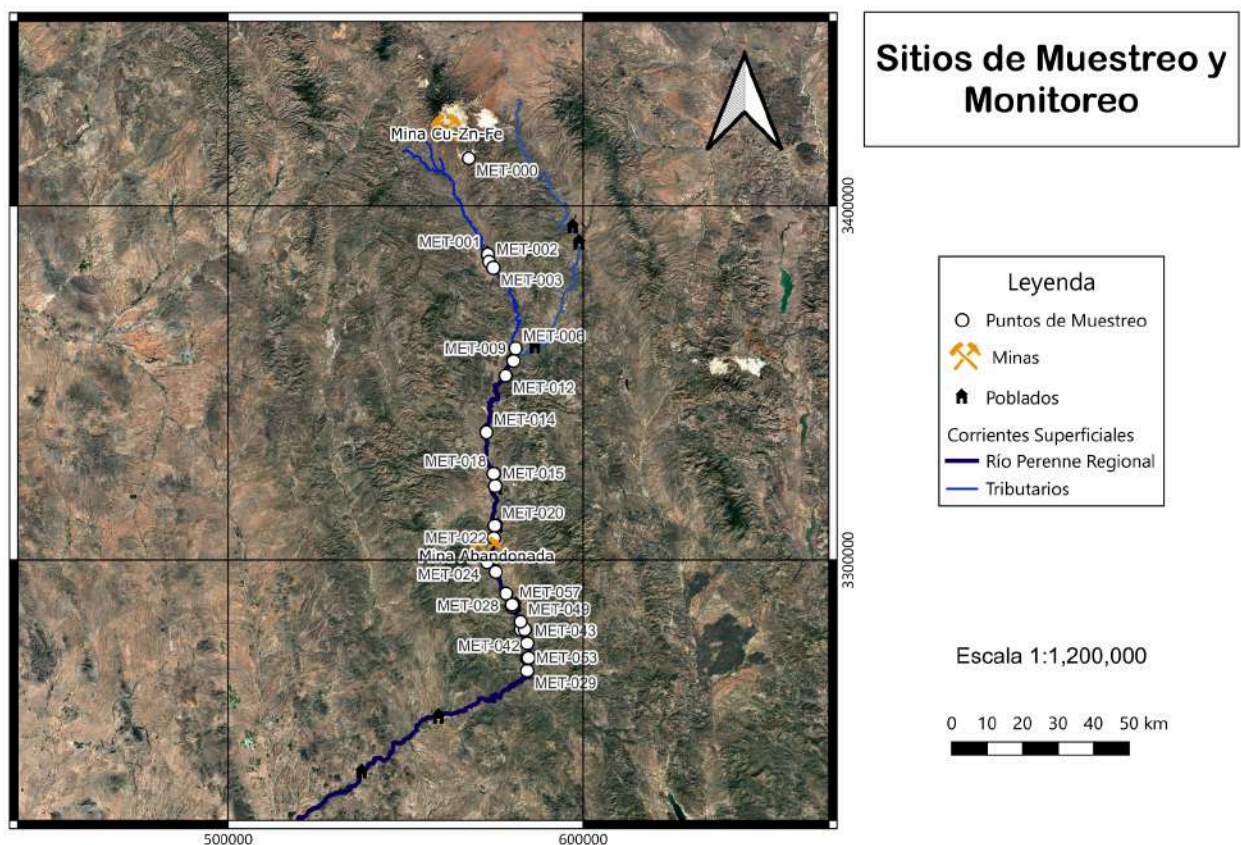
### Caso de Estudio: Norte de México

#### 1. Evaluación de la calidad del agua (Límites Máximos Permisibles)

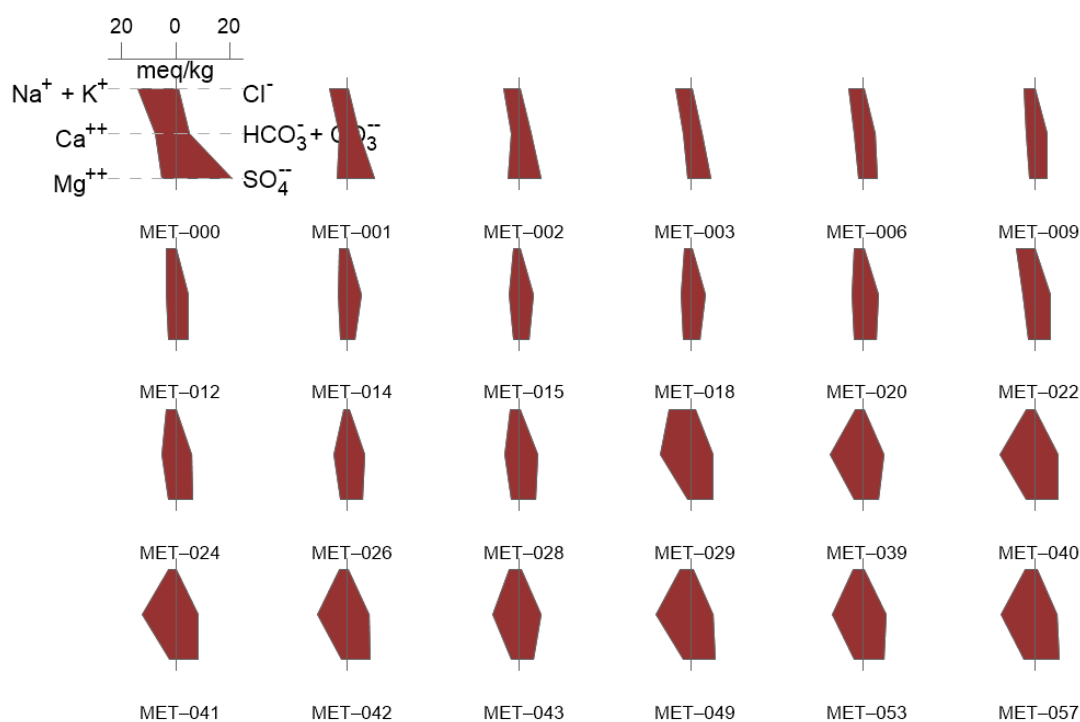
- a) ¿Hay EPT por encima de los límites permisibles? ¿Cuáles?, identifiquen los dos EPT con la concentración por encima de los valores permisibles más elevados.

**R =** Si, todos a excepción del Bario y el Mercurio rebasan el LMP por más del doble. El Aluminio y el Hierro son los EPT con las concentraciones por encima de los LMP más elevadas, rebasando estas por más de 1000 veces.

#### 2. Caracterización del contaminante (Familias de Agua y Distribución)



- a) A continuación, incorporen las imágenes correspondientes a los diagramas generados, cuidando que el tamaño permita distinguir con claridad los ejes, etiquetas y símbolos.



b) A partir del diagrama de Stiff, identifiquen los aniones y cationes dominantes en las muestras y agrupen el agua en familias y subfamilias hidrogeoquímicas (bicarbonatadas/sulfatadas/cloruradas cálcicas/sódicas/magnesianas o mixtas).

**R =**

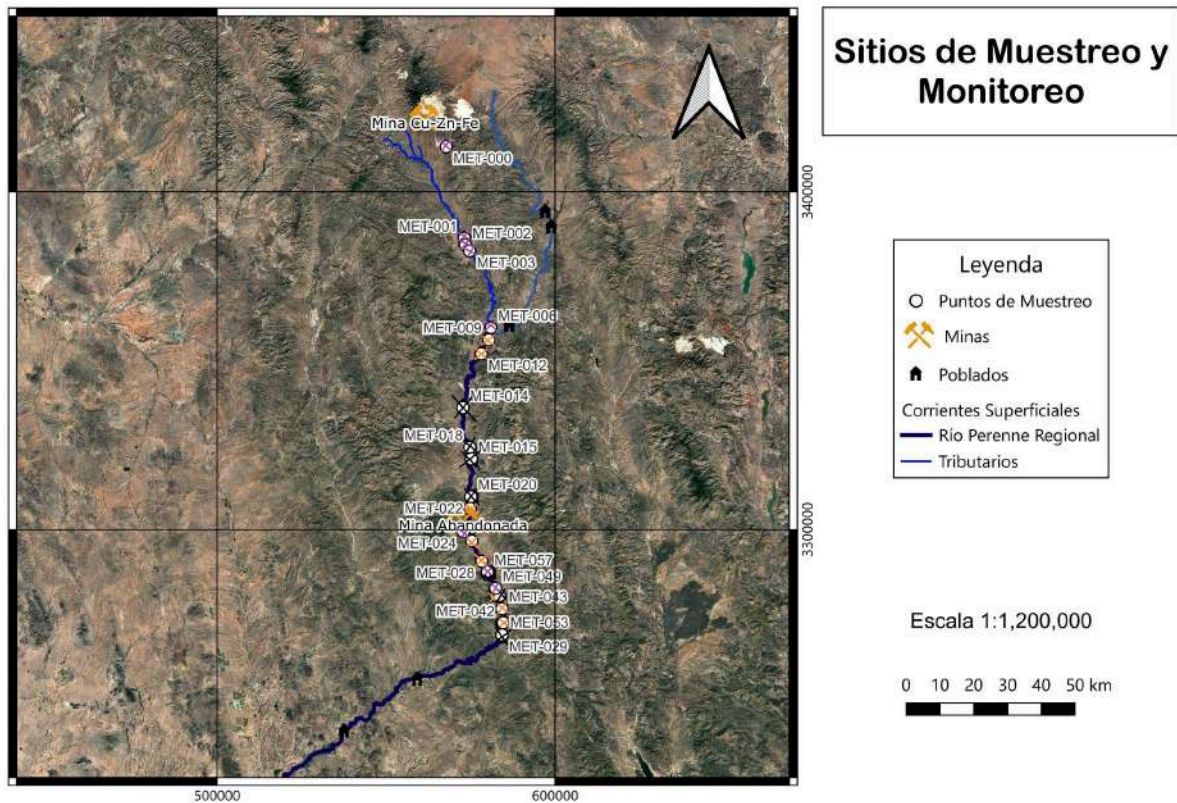
Sulfatadas Sódicas : MET-000, MET-001, MET-002, MET-003, MET-006

Sulfatadas Cálcicas: MET-024, MET-049, MET-057

Bicarbonatadas Cálcicas: MET-014, MET-015, MET-018, MET-020, MET-039, MET-043,

Mixtas: MET-009, MET-012, MET-022, MET-026, MET-028, MET-029, MET-040, MET-041, MET-042, MET-053.

c) Señalen en el mapa las familias y subfamilias identificadas, empleando un símbolo de distinto color para cada una: dibujen una cruz negra para el agua bicarbonatada, una cruz púrpura para la sulfatada y una cruz naranja para el agua mixta.



d) Describan la distribución espacial de las diferentes familias de agua.

**R =** Cerca de ambas minas mapeadas el agua es marcadamente sulfatada, el agua de cabecera es de carácter sódico y cerca de la mina abandonada es sulfatada cálcica. Conforme se avanza río abajo de las minas el agua se torna mixta, luego bicarbonatada cálcica.

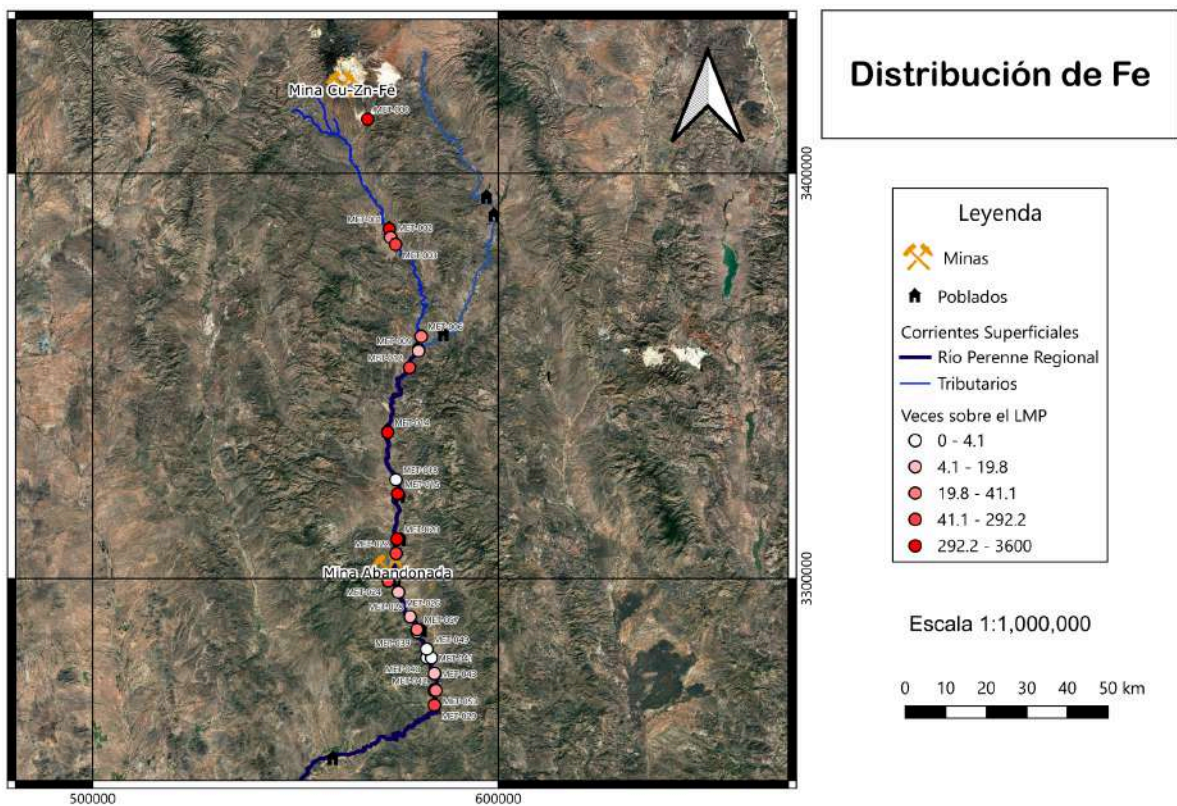
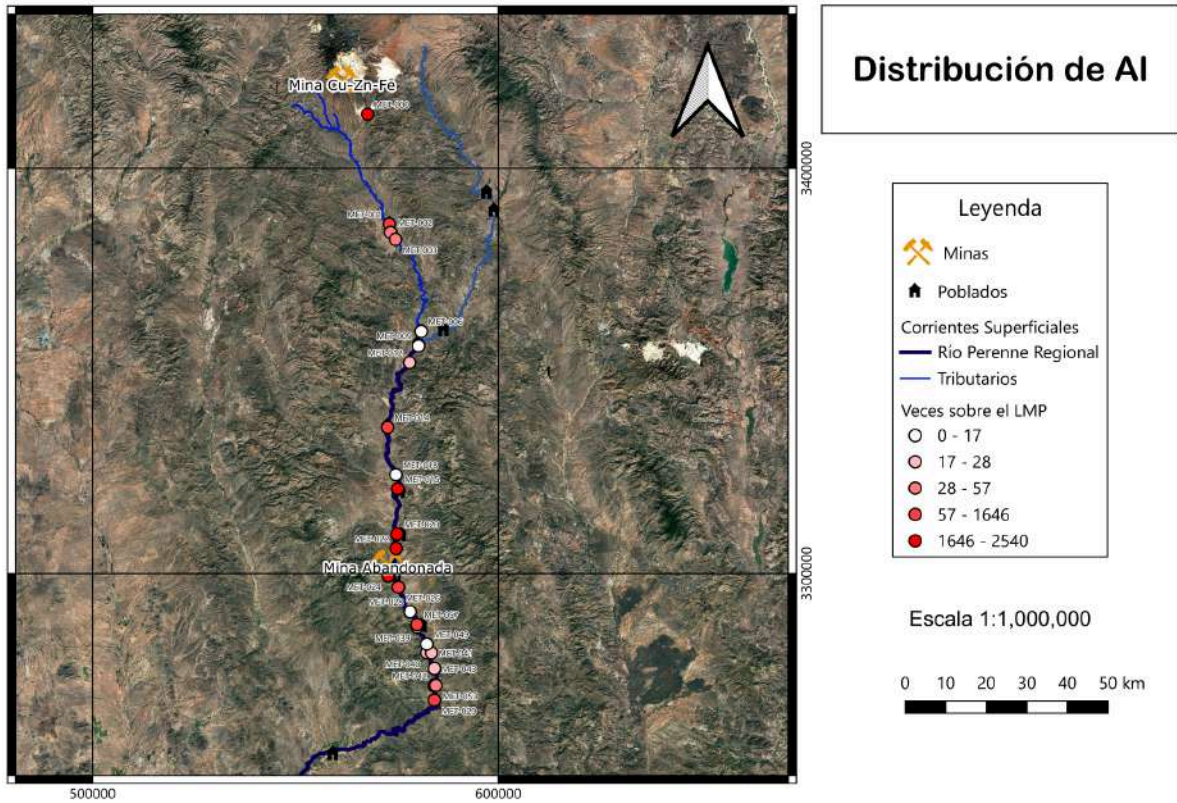
e) ¿Qué sugiere la dominancia puntual de  $\text{SO}_4^-$  respecto al origen de este soluto en el acuífero? ¿Podría provenir de una fuente natural como evaporitas o depósitos de sulfuros no explotados?

**R =** Se puede deber a iones sulfatos liberados de minas o la oxidación de sulfuros en depósitos no descubiertos. Donde las escorrentías arrastran el ion sulfato al río.

### Distribución de Contaminantes

#### **Resultados**

a) Peguen a continuación las dos imágenes generadas.



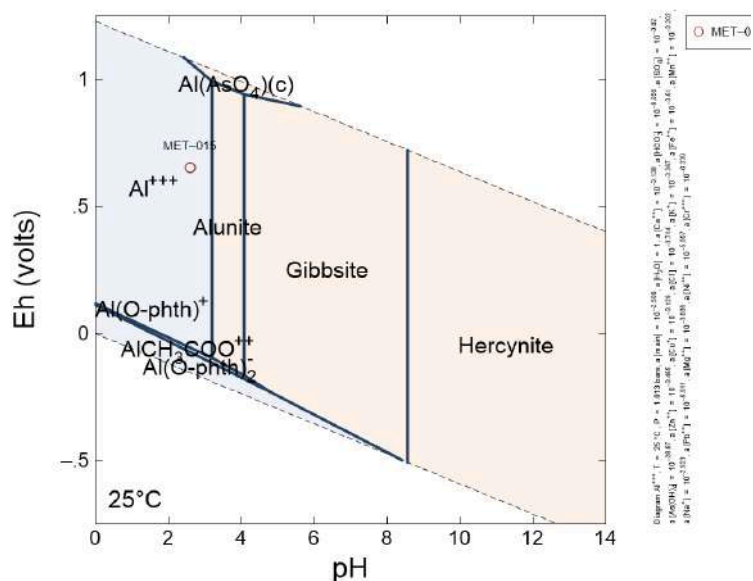
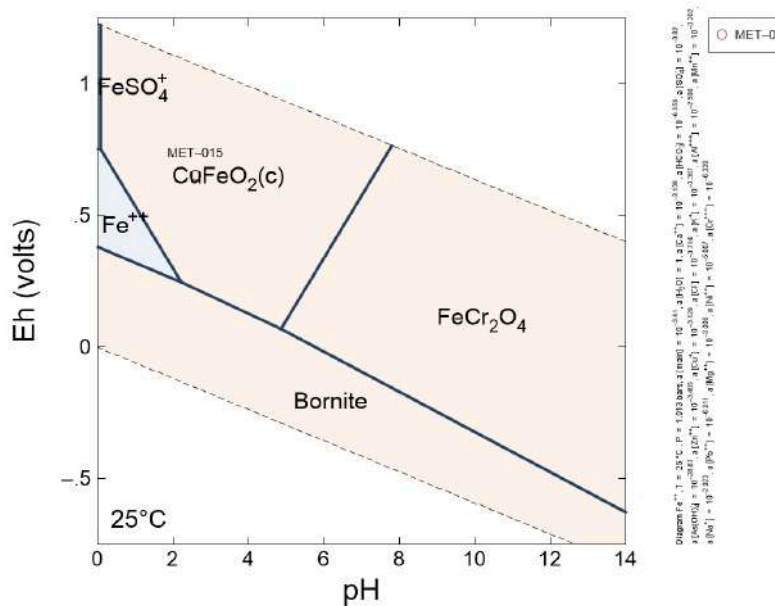
b) De acuerdo con la distribución de familias de agua y EPT, ¿Cuál es la fuente principal de los contaminantes?, argumenta.

**R** = El Fe tiene un patrón marcado de valores elevados cerca de la mina de Cu-Zn-Fe que disminuyen conforme se toman muestras más lejanas de esta y tiene una disminución marcada inmediatamente aguas abajo de la mina abandonada; mientras que el Al a pesar de no tener las concentraciones máximas inmediatamente aguas abajo de la mina de Cu-Zn-Fe, registra los valores máximos aguas arriba de la mina abandonada, por lo que esta no está aportando cantidades significativas de Fe ni Al al río. La fuente principal de contaminantes es la mina de Cu-Zn-Fe.

### 3. Propuestas de Remediación

#### Resultados

Peguen ambos diagramas Eh-pH a continuación:



- a) ¿Cómo se comportan los contaminantes en las condiciones Eh-pH (Eh: 0.65 [V], pH: 2.8) del río? (Solubles/Insolubles)  
**R =** El hierro es insoluble gracias a que forma un óxido de hierro y cobre. Mientras que el aluminio es soluble en las condiciones Eh-pH del río.
- b) ¿Cuáles iones ejercen el mayor control sobre la solubilidad de los contaminantes en las condiciones cercanas a las evaluadas el agua del río?  
**R =** Dos de los tres compuestos insolubles del hierro involucran cobre, el tercero cromo; los tres requieren de los EPT presentes en el agua. La insolubilidad del aluminio es controlada por el ion sulfato y el ion potasio en el caso de la alunita, la gibbsita y hercinita son óxidos e hidróxidos de aluminio por lo que no requieren de otro ion, y el arseniato de aluminio requiere de arsénico, uno de los EPT. Entonces, en el caso del Fe y Al, los iones que ejercen el mayor control sobre su solubilidad son los demás contaminantes y el ion sulfato (Bornita y Alunita).
- c) Determinen un valor de Eh y pH en el cuál ambos contaminantes evaluados precipitan.  
**R =** No es necesario modificar el Eh (0.65 [V]), solo se debe aumentar el pH de 2.6 a 3.5 para que tanto el aluminio como el hierro se vuelvan insolubles.

Propuesta B - Adsorción con arcillas

**Resultados**

En la tabla siguiente, anoten el porcentaje de Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn adsorbido en cada material evaluado.

Escenario 1 (pH = 2.8 , Eh = 0.65 [V])						
Material	%Al Adsorbido	%As Adsorbido	%Cu Adsorbido	%Fe Adsorbido	%Mn Adsorbido	%Zn Adsorbido
Ferrhidrita + Illita	99.999	99.389	99.977	99.997	99.978	99.977
Montmorillonita + Caolinita	100	0	99.996	99.996	99.996	99.996

- a) Comparen el comportamiento de las mezclas de arcilla. ¿Qué diferencias observan en la adsorción de los EPT?  
**R =** Dado que el arsénico tiende a formar complejos iónicos y la montmorillonita y caolinita tienen una carga superficial negativa permanente esta mezcla es poco favorable para adsorber al arsénico. La ferrhidrita puede adsorber al arsénico debido a su carga ligeramente positiva junto con fenómenos de coprecipitación, mientras que la illita, a pesar de tener una capacidad de intercambio catiónico mucho menor que la de la montmorillonita, cuenta con una carga superficial negativa capaz de adsorber a los demás EPT que se encuentran como iones de carga positiva.
- b) En el agua del río también están presentes iones mayoritarios como Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Expliquen cómo la presencia de estos iones podría influir en la adsorción de los metales y metaloides potencialmente tóxicos en las superficies minerales.

**R =** Los iones mayoritarios pueden influir en la adsorción de metales de varias maneras. Algunos cationes, como  $\text{Na}^+$  o  $\text{Ca}^{2+}$ , pueden competir con otros cationes metálicos por los sitios de adsorción en los minerales arcillosos, lo que puede disminuir la cantidad de metales retenidos. Además, algunos aniones pueden formar complejos en solución con ciertos metales, lo que reduce su disponibilidad para adsorberse en las superficies minerales. Finalmente, la presencia de estos iones aumenta la fuerza iónica del sistema, lo que puede modificar las interacciones electrostáticas entre las especies disueltas y las superficies minerales.

- c) Con base en los resultados obtenidos, ¿qué material o combinación de materiales recomendarían para la remediación en el río? Justifiquen su respuesta comparando la adsorción de los EPT.

**R =** Recomendaría el uso de la mezcla Ferrhidrita+Illita, ya que la ferrhidrita es capaz de adsorber los iones negativos de arsénico, mientras que la illita, aunque no tiene una capacidad de adsorción tan elevada como la montmorillonita, sigue poseyendo una carga superficial negativa capaz de adsorber los demás EPT que poseen una carga positiva en su forma iónica.

#### Propuesta C - Métodos Combinados

- Completen la siguiente tabla:

Escenario 2 (pH = 3.5 , Eh = 0.65 [V])						
Material	%Al Adsorbido	%As Adsorbido	%Cu Adsorbido	%Fe Adsorbido	%Mn Adsorbido	%Zn Adsorbido
Ferrhidrita + Illita	100	99.375	100	100	100	100

- a) ¿Cambia la capacidad de adsorción de los materiales?

**R =** Si, el aumento de pH disminuye la actividad de iones  $\text{H}^+$ , por lo que disminuye la fuerza iónica de la solución y hay menos competencia por sitios de adsorción, resultando en una mayor adsorción de los EPT.

- b) Considerando tus respuestas, ¿propondrías que se ocupen las dos estrategias de remediación simultáneamente?, ¿O sería mejor que se ocupe solo una? ¿Cuál será más eficaz?

**R =** El cambio de pH sugerido para la precipitación de Al mejora el rendimiento de la mezcla de arcillas al disminuir la competencia por sitios de adsorción, por lo que la combinación de ambos métodos (aumento de pH y adsorción mediante materiales arcillosos) será más eficaz que ocupar un solo método.