

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Instituto de Ingeniería y Tecnología

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



Distribución de metales pesados en sedimentos de arroyo y suelos de la zona mineralizada de
Sierra de Samalayuca, Chihuahua, México.

Tesis presentada en requerimiento para obtener el grado de Maestría en Estudios y Gestión
Ambiental

Autor: Montserrat Hernández Ramírez

Director: Dr. Aldo Izaguirre Pompa

Co-director: Dr. Miguel Domínguez Acosta

Ciudad Juárez, Chih., 15 diciembre de 2022

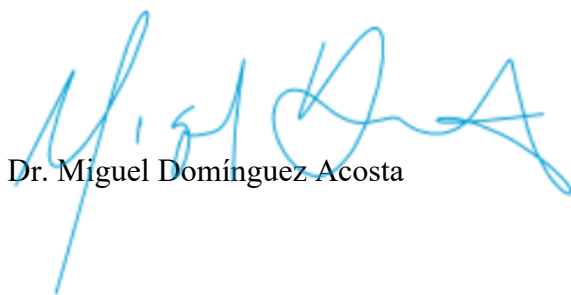
Revisión del Documento de Proyecto de Titulación por Director del Proyecto
(Requisito para enviarlo al Comité de Evaluación)

Después de haber revisado los aspectos técnicos, la estructura y formato del documento en general con título "Distribución de metales pesados en sedimentos de arroyo y suelos de la zona mineralizada de Sierra de Samalayuca, Chihuahua, México", que presenta la Ing. Montserrat Hernández Ramírez, consideramos que se cumplen los requerimientos necesarios para que se proceda a su evaluación final ante el comité evaluador que designe la Academia de la Maestría en Estudios y Gestión Ambiental.

ATENTAMENTE



Dr. Aldo Izaguirre Pompa



Dr. Miguel Domínguez Acosta

Diciembre 2022, Ciudad Juárez, Chihuahua,
México.

Dedicatoria

A mi familia.

Agradecimientos

A mis asesores, a mis sinodales, a mis profesores de la maestría en estudios y gestión ambiental, a mis compañeros de estudios, a mis compañeros de trabajo, a mi familia y amigos. A los laboratoristas del IIT

Resumen

El objetivo principal de este estudio es el de establecer una línea base para las concentraciones de metales pesados y cuantificar la dispersión de estos materiales que son derivados de los minados y tepetateras en la Sierra de Samalayuca, Chihuahua, México. Para resolver esta problemática se realizó una caracterización geoquímica, petrográfica y de difracción de rayos x en mantos de cobre, vetas de cuarzo-carbonato, sedimentos de arroyo y suelos agrícolas y residenciales del área. La comparación geoquímica de metales pesados al lado de valores límite permisibles y con valores de concentraciones umbral ha permitido obtener información valiosa que al momento nos permite concluir que no existe una contaminación importante por metales pesados en los depósitos sedimentarios de la Sierra de Samalayuca debido a la antigua actividad minera.

Palabras clave: Geoquímica, petrografía, metales pesados, mantos de cobre, vetas de cuarzo carbonato, suelos, Sierra de Samalayuca.

Abstract

The main goal of this study it is to establish a baseline for the concentrations of heavy metals concentrations and quantifying the dispossession from small mining pits, and mounds of ore waste located in Sierra de Samalayuca, Chihuahua, Mexico. In order to inquire into the problem, we performed a geochemical, petrographic and x-ray diffraction study characterization on stratabound copper, quartz carbonate veins, arroyo sediments and agriculture and residential

soils. A comparative of geochemistry results of heavy metals concentrations against permissible limit values and threshold soils values has allowed us to obtain valuable information which allows to conclude that there is no significant contamination by heavy metals in Sierra de Samalayuca due past mining activity.

Keywords: Geochemistry, stratabound copper, quartz-carbonate veins, soils, petrography, heavy metals, Sierra de Samalayuca.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	8
1.1. Antecedentes	8
1.2. Planteamiento del problema.....	10
1.3. Área de estudio	14
1.3.1. Contexto geológico de Sierra de Samalayuca.....	15
1.3.2. Mineralización	16
1.4. Alcance del estudio	16
1.4.1. Objetivo general.....	18
1.4.2. Objetivos específicos	18
1.4.3. Justificación	18
Capítulo 2. Marco teórico	19
Capítulo 3. Metodología	21
3.1. Muestreo	21
3.1.1. Muestras sólidas mineralizadas.....	21
3.1.2. Muestras de sedimentos de arroyo y suelos agrícolas-residenciales	22
3.2. Métodos analíticos	22
3.2.1. Petrografía de luz transmitida	22
3.2.2. Fluorescencia de rayos x (FRX)	24
3.2.3. Difracción de rayos x (DRX).....	26
Capítulo 4. Resultados y discusiones.....	28
4.1. Resultados	28
4.1.1. Petrografía.....	28
4.1.2. Geoquímica FRX de metales pesados.....	30
4.1.3. Difracción de rayos x	33
4.2. Discusión.....	37
4.2.1. Caracterización mineral	37
4.2.2. Geoquímica de metales pesados	38
4.2.2.1. Concentraciones de geoquímica base de mantos de cobre y vetas de cuarzo.....	38
4.2.2.2. Perfiles de dispersión	40
4.2.2.3. Factor de contaminación en suelos	40
4.2.2.4. Comportamiento de algunos elementos pesados	41
4.2.2.4.1. Cromo (Cr).....	41

4.2.2.4.2.	Plomo (Pb)	41
4.2.2.4.3.	Manganeso (Mn).....	42
4.2.2.4.4.	Arsenico y Cadmio (As y Cd).....	43
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones		43
5.1.	Conclusiones del proyecto	43
5.2.	Recomendaciones y reflexiones.....	44
5.2.1.	Trabajo futuro	44
5.2.2.	Reflexión sobre las aportaciones del presente trabajo	45
Referencias bibliográficas.....		47

1. Introducción

La Sierra de Samalayuca, ubicada a 45 kilómetros al sur de Ciudad Juárez en el estado de Chihuahua, es una cadena montañosa en donde se ha reportado una mineralización de cobre que ha sido objeto de prospección y de intentos de explotación (Bruno, 1995; Boily, 2013). En la actualidad se ha detectado un yacimiento importante de mantos de cobre de 9.6 millones de toneladas con 0.28 % de Cu y con posibilidades de extenderse a 14.4 millones de toneladas (Boily, 2013). Aunque existe un interés latente por realizar una explotación a gran escala de este yacimiento, al momento no se han iniciado actividades mineras, debido a asuntos políticos y sociales. Sin embargo, existe la posibilidad de una explotación futura y sobre todo la posibilidad de un riesgo ambiental inherente a causa de las actividades mineras que se desarrollarían. Uno de los factores más acuciantes en términos de riesgo ambiental, relacionado con las actividades mineras es la dispersión o posible contaminación por metales pesados, y este factor de riesgo se desconoce para esta zona por lo que es necesario que se realicen estudios específicos con el objetivo de determinarlo. Ante esta situación, este estudio establece las condiciones de la línea base que permitirá el desarrollo de futuras investigaciones que permitan evaluar los posibles impactos en distintas esferas ambientales.

1.1. Antecedentes

La región de Samalayuca, Chihuahua, posee gran relevancia social, biológica (flora y fauna), histórica, geológica, minera y cuenta con la presencia de un importante sitio arqueológico

de petrograbados (Figura 1; CONANP, 2013), este conjunto de características hace que la Sierra de Samalayuca sea representativa de la región en el norte de Chihuahua y para México. Sin

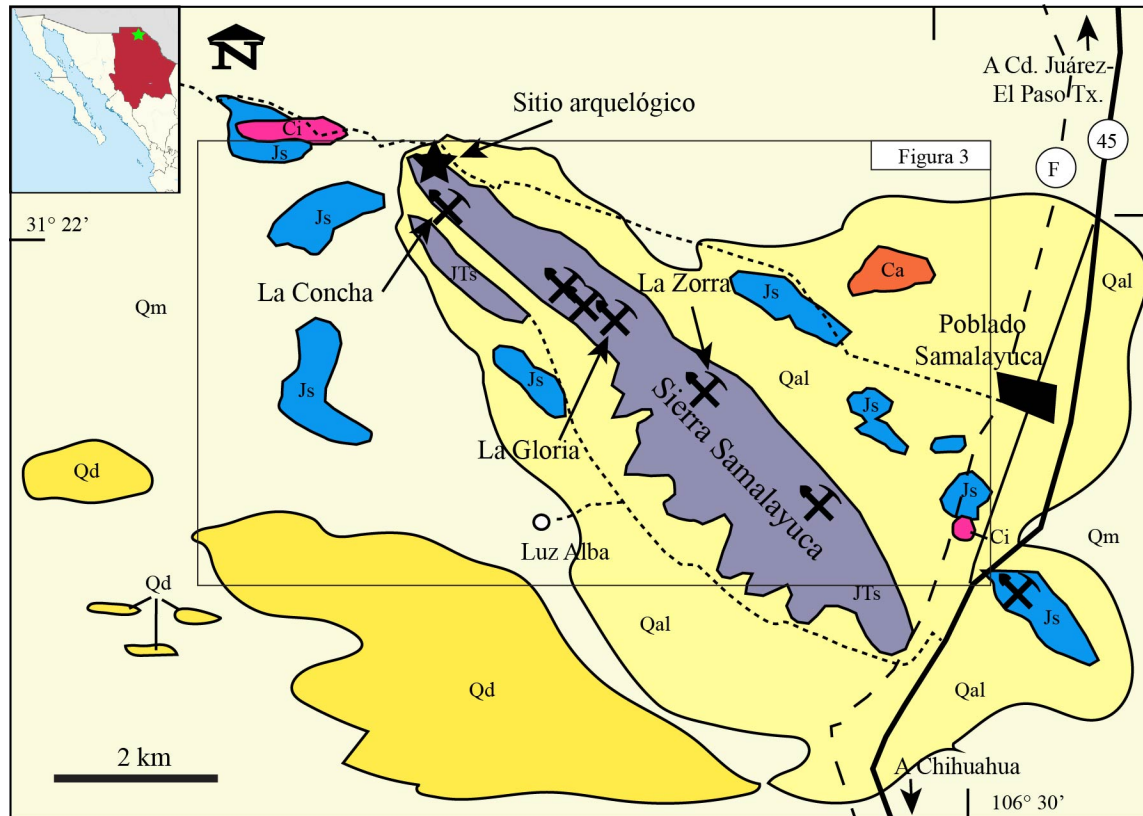


Figura 1. Mapa Geológico de Sierra de Samalayuca (modificado del Servicio Geológico Mexicano, SGM, escala 1:250 000). Qd = Dunas móviles de Samalayuca, cuaternario. Qal = Depósitos aluviales de pie de montaña, arroyo, talud y derrubio, cuaternario. Qm = Depósitos mixtos de arena fina de duna, gravas-cantos aluviales, arcillas y gravilla que cubren grandes extensiones ¿Cuaternario al Terciario? Ca = Andesita, cenozoica, Ci = Intrusivo diorítico, Cenozoico. Js = Arenisca y lutita (Fm. La Casita) con fósiles de amonitas, Jurásico medio. JTs = Metaarenisca metapelita de cuenca profunda, ¿Triásico-Jurásico? F = Vía férrea, 45 = Carretera federal (Panamericana).

embargo, desde 1950 el recurso minero de cobre ha sido explorado y trabajado de forma limitada por compañías mineras (p.ej., Compañía Minera Sentar S.A., subsidiaria de ASARCO; Bruno et al., 1995) teniendo como principal objetivo conocer el potencial minero a gran escala (Boily, 2013). Durante ese tiempo se produjo la formación de pequeños tajos y tepetateras en los sitios de la Sierra de Samalayuca, específicamente en los alrededores de los sitios denominados La Gloria, La Concha y La Zorra (Figura 1 y 2). Al mismo tiempo, cerca de las áreas minadas se desarrollan actividades agrícolas y de crecimiento urbano que en la actualidad condicionan la explotación de este yacimiento de cobre (Figura 3).

1.2. Planteamiento del problema

El estado actual de dispersión y potencial contaminación por metales pesados se desconoce para la zona mineralizada de Sierra de Samalayuca. Las primeras explotaciones que dejaron como resultado minados a tajo abierto y tepetateras con fragmentos de mantos de cobre (Boily, 2013, Figura 2) expusieron la roca mineralizada a factores de meteorización que actualmente influyen en su degradación y lixiviación de metales pesados. Debido a esto, en el presente estudio se planteó realizar una evaluación para determinar la contaminación y estado actual de la dispersión por metales pesados. Como metas se planteó obtener concentraciones base del yacimiento mineral y de los suelos aledaños que en la actualidad son de uso agrícola, comercial y residencial (Figura 4). El presente estudio se asemeja a los que usualmente se efectúan para obtener evaluaciones de riesgo ambiental para yacimientos minerales y que se enfocan en el contenido de metales pesados en matrices aledañas al yacimiento ya sea aplicado

en agua, aire o suelo (Barkett y Akün, 2018; Sulaiman et al., 2019; Qiao, 2020). En menor medida, se tomaron en cuenta los estudios basados en contaminación química y potencial de lixiviación de drenaje ácido

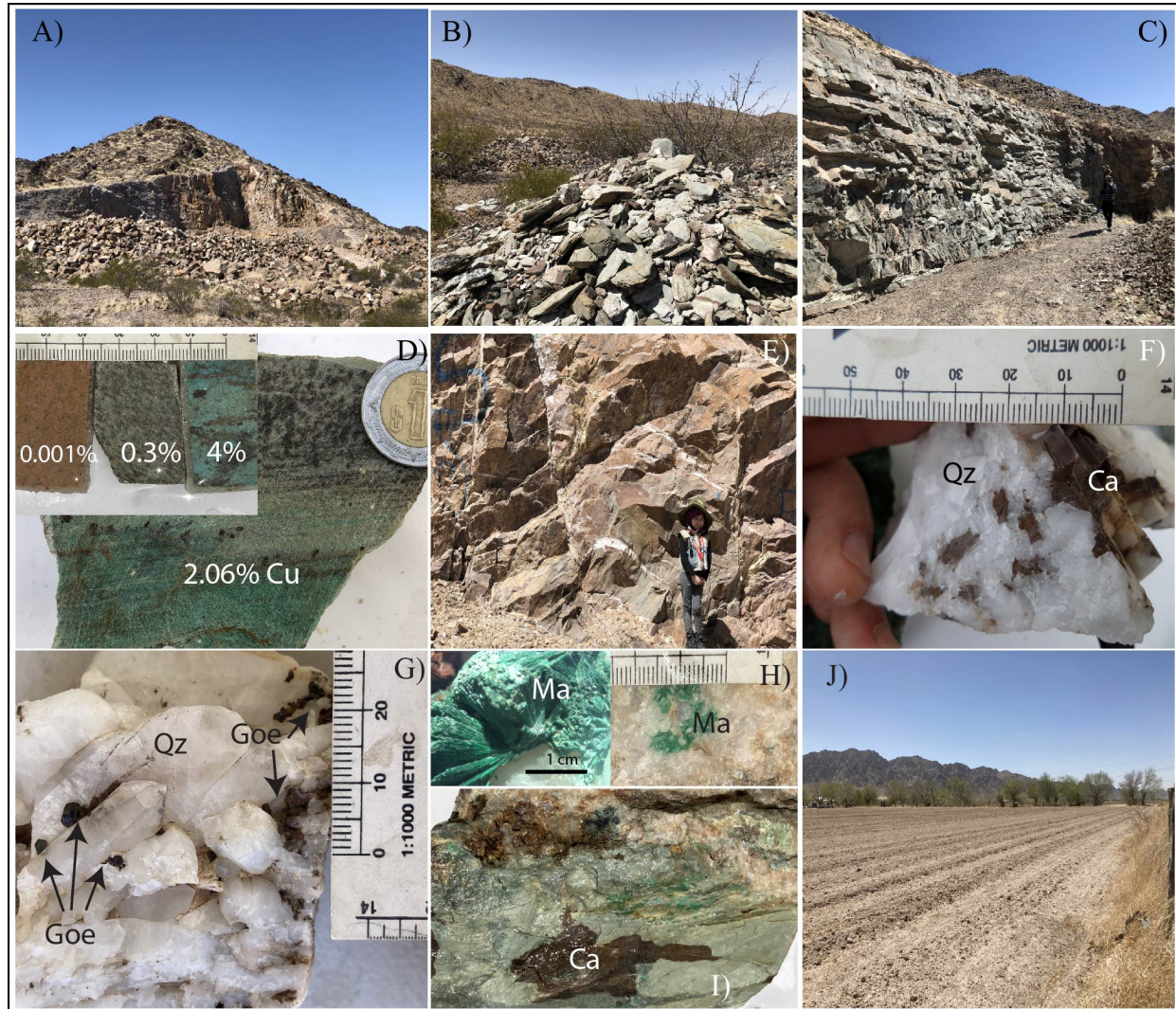


Figura 2. Fotografías del área Sierra de Samalayuca. A) Minados a cielo abierto área la Gloria; B) Tepetateras de mantos de cobre y vetas cuarzo carbonato; C) Mantos de cobre en areniscas; D) muestras de mantos de cobre estéril y con concentraciones de cobre hasta ~4% en carbonato de cobre; E) Vetas de cuarzo carbonato en forma de echelon y cola de caballo; F) Acercamiento de vetas de cuarzo y carbonato de calcio. G) Vetas de cuarzo carbonato en cristales grandes y goethita dodecaédrica. H) Carbonato de cobre (malaquita) fibroradial. (I) Acercamiento de veta de cuarzo carbonato cortando mantos de cobre. J) Campo agrícola y residencial en el área Sierra de Samalayuca. Ca = Calcita, Cu = Cobre, Goe = Goethita, Ma = Malaquita y Qz = Cuarzo.

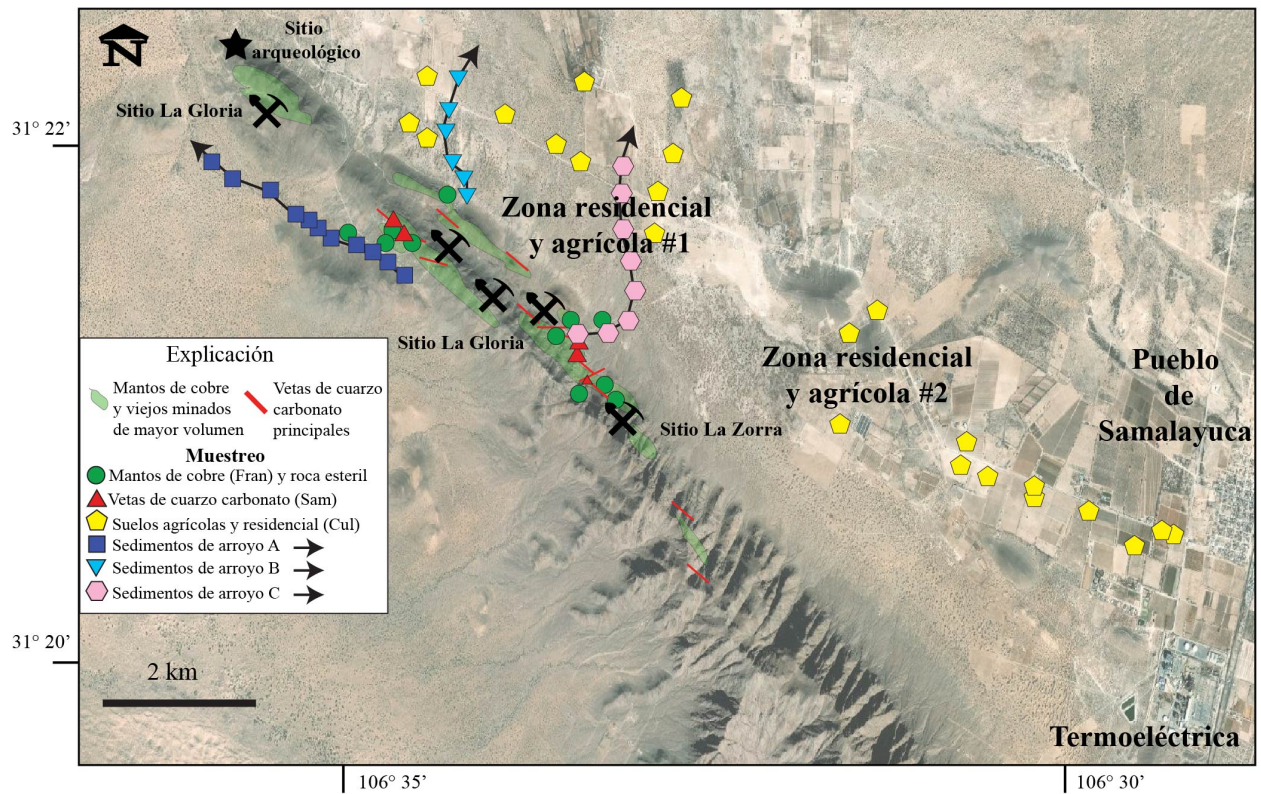


Figura 3. Ubicación de muestreo y áreas mineralizadas y minadas de Sierra de Samalayuca. En el fondo de la figura imagen satelital de Sierra de Samalayuca (CentroGeo Idegeo plataforma de información geoespacial). Flechas negras indican el flujo natural arroyo abajo.



Figura 4. Fotografías de sitios de muestreo del presente estudio en sitios agrícolas, residenciales y comerciales en Sierra de Samalayuca. A-C) áreas de parque, residencial en zona residencial y agrícola #1 (Figura 3). D) Suelos residenciales en pie de montaña. E) Estiércol empleado para abono en suelos agrícolas zona residencial y agrícola #2 (Figura 3). Termoeléctrica que utiliza combustibles fósiles (combustóleo y gas) en Samalayuca.

de mina, que llevan a cabo usualmente como medidas de remediación cuando el daño está hecho (Naidu et al., 2019; Skousen et al., 2019), debido a que en Sierra de Samalayuca las actividades mineras son incipientes.

1.3. Área de estudio

Sierra de Samalayuca es una montaña escarpada ubicada en el norte de Chihuahua, México, aproximadamente a 45 km al sur de Ciudad Juárez. Está constituida por una franja rocosa de aproximadamente 16 km de largo y orientada NW-SE rodeada por otras colinas rocosas de menor dimensión y de dunas del sistema Médanos de Samalayuca. El marco fisiográfico corresponde a una serranía aislada típica de la cuenca de América del Norte y la provincia de cuencas y sierras (Berg, 1970; Bruno, 1995; Cástulo, 1997). Las condiciones climáticas actuales en el área (Schmidt, 1979) coinciden con un desierto de altiplano muy seco con veranos calurosos (hasta 45°C) e inviernos fríos con temperaturas mínimas de -16°C. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 12 y 18 °C. En la clasificación climática de Köppen, corresponde a BWKx' (e') con una precipitación anual de 220 mm y una oscilación de temperatura de 23°C (CONAMP, 2013). Por lo general, la región se conoce como desierto frío de altiplano. Los vientos predominantes (45%) en la región provienen del oeste con velocidades de aprox. 20–40 km/h. Pero los vientos más rápidos provienen del sureste (aprox. 50 km/h). La vegetación de esta zona desértica del norte de Chihuahua es representada por *Larrea Tridentata* (arbusto de creosota), *Artemisia tridentata* (artemisa), sotol, palo verde, pequeñas plantas de choya y pequeñas plantas de chaparral.

1.3.1. Contexto geológico de Sierra de Samalayuca

Geológicamente, la base de la Sierra de Samalayuca está compuesta por areniscas o metareniscas de color verde, gris violáceas y grises (Figura 1); presenta intercalaciones de lutitas y limolitas moradas (metapelitas) con metamorfismo de bajo grado (Berg, 1969) formadas en ambientes detríticos no calcáreos y de posible edad Triásico y Jurásico (SGM, 2003). Esta unidad presenta fuertes plegamientos a lo largo de la sierra dominando la forma de anticlinal a lo largo de la misma (Cástulo, 1997). Comúnmente las capas de estas rocas presentan marcas de flujo, estratificación cruzada, y de desecación; y adyacente a la sierra, se encuentra otra unidad de areniscas deformadas con pliegues menos cerrados de tipo isopacos. Esta arenisca presenta lentes de conglomerados y de caliza, además presenta fósiles amonitas que en conjunto sugiere que esta unidad es la Fm. La Casita de edad jurásica (Berg, 1969). Cortando las secuencias sedimentarias antiguas se encuentran intrusivos de composición diorítica de posible edad Cenozoica temprana y de igual manera otra de composición andesítica oligoceno-mioceno, ambas sin deformación aparente (SGM, 2003). Cubriendo la región se hallan sedimentos aluviales, eólicos y dunas que se distribuyen en tres grandes unidades: (1) Depósitos mixtos de arena fina de duna, gravas-cantos rodados aluviales, horizontes de arcilla y gravilla que cubren grandes extensiones, terciario-actual (SGM, 2003). (2) Depósitos aluviales de pie de montaña, arroyo, talud y derrubio de edad cuaternario-actual. (3) Dunas móviles de Samalayuca cuaternario-actual.

1.3.2. Mineralización

La mineralización de cobre de Sierra de Samalayuca ocurre sobre las secuencias de rocas sedimentarias antiguas (Triásico-Jurásico) constituidas mayormente de areniscas. Estas se componen de cuarzo, calcita, moscovita, sericita y clorita (Bruno, 1995, Figura 2 y 5). Las areniscas tienen una porosidad casi nula, y carecen de feldespato potásico. La mineralización ocurre como mantos de cobre alojados en sedimentos o también llamados mantos estratoligados y están mayormente presentes a un rango estrecho de capas dentro de las secuencias sedimentarias de arenisca. Los mantos de cobre son epigenéticos y diagenéticos, ya que se formaron después de que se depositó el sedimento huésped, pero posiblemente antes de la litificación de la roca huésped (Bruno, 1995). Según estudios de perforación la mineralización de cobre hipogénica ocurre como sulfuros de cobre primarios y supergénicos de grano fino, que incluyen digenita, calcocita, calcita, bornita, calcopirita, pirita, galena y esfalerita subordinadas (Bruno, 1995). También presenta minerales en forma de óxidos y carbonatos en niveles oxidados superficiales como es malaquita y azurita comúnmente diseminados y en fracturas. Se interpreta que la mineralización consiste en una deposición controlada por la turbidez que generó cambios en la granulometría y el espesor de las areniscas (Bruno, 1995).

1.4. Alcance del estudio

El alcance de esta investigación es establecer una línea base, que permita evaluar el potencial de contaminación geoquímico debido a la dispersión de metales pesados que han derivado hasta el momento las actividades mineras realizadas y la ocurrencia directa mineral del yacimiento.

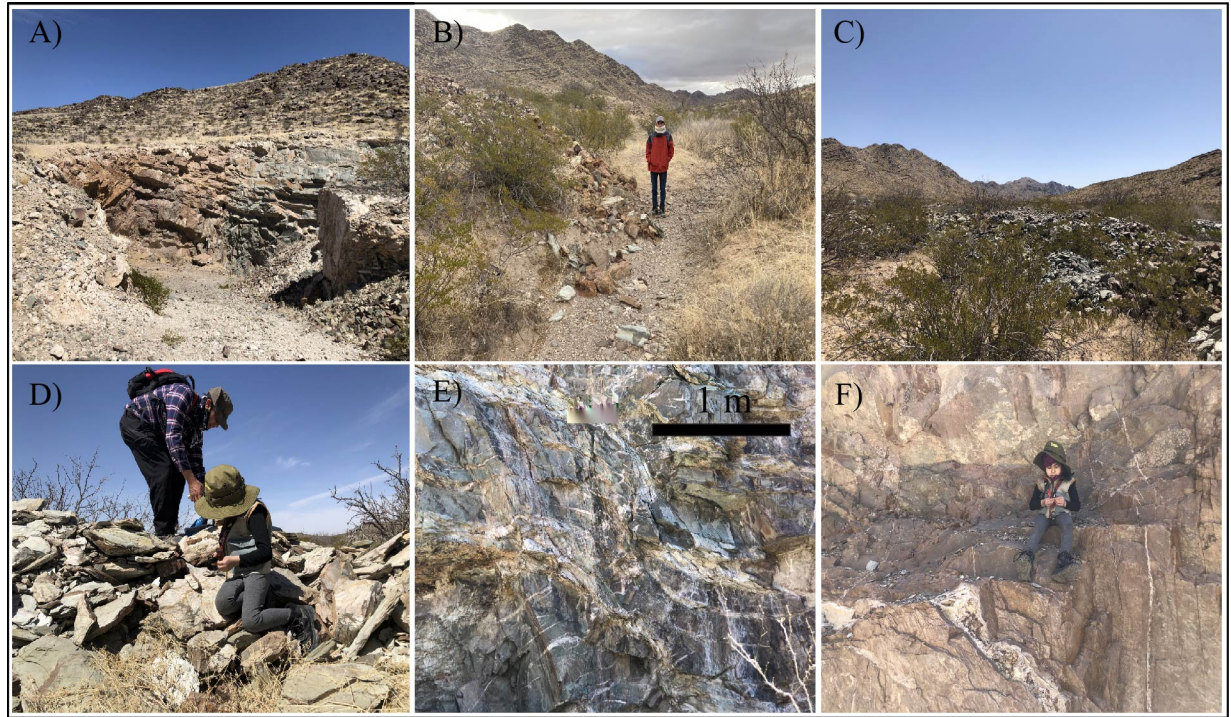


Figura 5. Fotografías de sitios de muestreo en Sierra de Samalayuca. A) Minados a cielo abierto de mantos de cobre. B) Ejemplo de arroyos en sitio de muestreo de sedimentos. C-D) Tepetateras de mantos de cobre y vetas de cuarzo carbonato. E-F) Vetas de cuarzo carbonato en echelón y cola de caballo.

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el estado actual de la concentración y dispersión de metales pesados en sedimentos, suelos agrícolas, comerciales y suelos residenciales cercanos a la fuente de mineralización y minados antiguos de Sierra de Samalayuca.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar las concentraciones de metales pesados en la estructura mineralizada, en la roca encajonante, sedimentos de arroyos, suelos agrícolas, residenciales y comerciales.
- Caracterizar megascópica y petrográficamente los minerales que contienen los metales pesados y/o la mineralización.
- Comparar los resultados de metales pesados con los valores límite permisibles que establece la norma mexicana de metales pesados en suelos (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) y/o las concentraciones que permiten agencias internacionales (He et al., 2015), además hacer una comparación con valores promedio de suelos a nivel mundial (Sipos y Póka, 2003) empleando valores de concentraciones umbral en un radio de 30 km de Sierra de Samalayuca (SGM, 2002), adicionalmente comparar con valores que presenta la corteza promedio.

1.4.3. Justificación

La existencia de obras de extracción antiguas que podrían estar generando un problema ambiental en la actualidad, por si solo, justifica la evaluación del potencial de contaminación medio ambiental. Adicionalmente, la afectación que pueda generar una contaminación de

metales pesados a las zonas aledañas enfatiza la necesidad de la evaluación y sobre todo debido el auge y expansión de terrenos agrícolas y residenciales en áreas adyacentes al yacimiento de cobre (Figura 4). La evaluación de riesgo potencial por contaminación de metales pesados en Sierra de Samalayuca debe implementarse previendo que el proyecto de minería actual puede llegar a realizarse. Por eso una investigación de esta índole, es pertinente ya que, al margen del contexto político, y de desarrollo económico, se podría utilizar la caracterización mineral y geoquímica del yacimiento para sentar una línea base y ser útil en futuras investigaciones en el contexto de riesgo ambiental y así aportar información que permita anticipar escenarios de riesgo y que ayuden a reducir impactos ambientales. Finalmente, aportar al conocimiento y técnica, ya que el presente estudio es de carácter original y presenta nuevas formas de comparar resultados de concentraciones geoquímicas.

2. Marco teórico

Es común observar evaluaciones o búsqueda de contaminación de metales pesados en zonas industriales o extracción mineral que empleen técnicas variadas con éxito (p.ej., Barkett y Akün, 2018; Sulaiman et al., 2019). En particular, es frecuente que se usen técnicas analíticas cada vez más simples, rápidas y económicas que puedan llevar la instrumentación analítica al campo de estudio como es el caso de las máquinas de fluorescencia de rayos x portátil (p.ej., Chakraborty et al., 2017; Lemiere, 2018; Rincheval et al., 2019). El interés de realizar cada vez más estudios relacionados a contaminación de metales pesados se debe a la necesidad de cumplir con la normatividad y legislación de los gobiernos que establecen límites permisibles de

concentración de metales pesados en diversos ambientes o medio ambientales (p.ej., Norma Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004). Por supuesto la necesidad de cuidar los recursos naturales tal como son la tierra, agua y atmósfera que son un bienpreciado insustituible y escaso sobre todo si se cuenta con poca extensión territorial útil (p.ej., en Japón). Además, cada vez se intenta poner en evidencia si existe un cumplimiento de los procesos de remediación o cierre industrial minero cuando se termina de aprovechar un recurso o cierra una fábrica industrial (p. ej., fundidora, mina o planta de beneficio).

3. Metodología

3.1. Muestreo

3.1.1. Muestras sólidas mineralizadas

Se tomaron 11 muestras de mantos de cobre en los sitios mineralizados y minados La Gloria y La Zorra, los más cercanos a los campos agrícolas y residenciales que se desarrollan en Sierra de Samalayuca (zona residencia y agrícola # 1 y 2; Figura 3; Tabla 1). Nueve de estas muestras consistieron en rocas de mantos mineralizados color verde y 2 muestras de roca estéril alejados de los horizontes mineralizados color café y gris, sin aparente mineralización. Por otro lado, se tomaron 5 muestras de vetas de cuarzo carbonato que se encuentran cortando la mineralización de mantos de cobre y que ocurren a lo largo de Sierra de Samalayuca en direcciones promedio 120° y echadas 70-80 grados al NE. Estas vetas ocurren en mayor medida a lo largo de la zona mineralizada de mantos de cobre (Figura 3). Estas vetas no reportadas en estudios previos se componen de cuarzo lechoso, carbonatos de calcio fierro remplazadas por fierro goethita y hematita; además, presentan pseudomorfos de goethita derivados de pirita cúbica y dodecaédrica diseminada (Figura 2G). Así mismo, espacios vacíos debido a la oxidación de sulfuros (*boxworks*). Adicionalmente presentan masas finas de sericita color amarillo-verdoso y pátinas y crecimientos de malaquita fibroradial o en forma de escobillas (Figura 2H). La ocurrencia de estas vetas es predominantemente asociada a estructuras de cizalla-pliegue y presentan formas de echelón y cola de caballo observado en varios cortes de afloramiento (Figura 2E).

3.1.2. Muestras de sedimentos de arroyo y suelos agrícolas-residenciales

Se hicieron 3 perfiles de muestreo a lo largo de 3 arroyos (A, B y C) que fueron identificados en campo como los más idóneos para tomar muestras de arroyo y de esta manera poder observar dispersión de minerales y metales pesados. Los sitios corresponden a los minados La Gloria y La Zorra (Figura 3). Un total de 25 muestras de 2 kg de sedimentos de arroyo de hasta 5 cm de profundidad distanciados en promedio 150 metros (Figura 3 y Tabla 2). Estos se tomaron de la parte central del cauce y en los bordes del arroyo para que la muestra fuera representativa. La muestra consistió en limos y arena fina a gruesa. Con respecto al muestreo de suelos agrícolas y de uso residencial se tomaron 23 muestras de 2 kg y de hasta 5 cm de profundidad (Figura 2J).

3.2. Métodos analíticos

3.2.1. Petrografía de luz transmitida

Utilizando las técnicas convencionales del Laboratorio de Geología del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la universidad Autónoma de Ciudad Juárez se prepararon secciones delgadas estándar (25-30 micras de espesor) del total de las muestras de mantos de cobre, roca estéril, vetas de cuarzo carbonato y de una selección de sedimentos de arroyo en briquetas de resina (Figura 6). Brevemente, se mencionan los pasos, estos consisten primero en cortar las muestras en talones prismáticos de 21x21x24 mm (Figura 6A), para el caso de briquetas de sedimentos se utiliza un molde de dimensiones similares al de rocas sólidas (Figura

6B). Posteriormente, se agrega un anillo de cuarzo granulado con resina a toda muestra para conseguir una referencia de espesor en el proceso final de la sección (Figura 6B). Después de un etiquetado



Figura 6. Técnica de secciones delgadas para petrografía de la UACJ en el Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA) Laboratorio de Geología. A) Corte de muestras con disco de diamante húmedo para obtener talón prismático. B) Elaboración de briquetas de muestras y resina con moldes azules y agregado de

anillo de granos de cuarzo a talones con moldes amarillos. C) Aplanado de muestras en devastadora/pulidora. D) Pegado de muestras con pegamentos acrílicos ultravioleta. E) Equipo de laminadora Ingram-Ward. F) Corte de muestras y laminado. G) Devastado y pulido manual de muestras de laminación con abrasivos de carburo de silicio malla 240, 400 y 600. H) Ejemplo de sección delgada concluida a 30 micras de espesor, se aprecia un anillo de cuarzo en color gris amarillento. H) Petrografía de secciones delgadas usando microscopio petrográfico.

apropiado se devastan las muestras hasta conseguir un aplanado (Figura 5C), se prosigue con un devastado y aplanado espejo que se consigue con abrasivo en polvo de carburo de silicio mallas 240, 400 y 600 tallando en contra de un vidrio plano. Las muestras se adhieren con pegamentos acrílicos ultravioleta en un portaobjetos 27x47 mm de dimensión (Figura 5D) y posteriormente se corta y desbasta utilizando una laminadora a 150 micras de espesor (Figura 5E y F). A continuación, se rebaja utilizando abrasivos en polvo nuevamente hasta lograr un espesor de 25 a 30 micras gracias al anillo de cuarzo referencia agregado anteriormente (Figura 5G y H). Finalmente se agrega un cubreobjetos para mejorar la nitidez y evitar dispersión de la luz al momento de efectuar la inspección y descripción petrográfica (Figura 5I).

3.2.2. Fluorescencia de rayos x (FRX)

Para la medición de las muestras por la técnica de fluorescencia de rayos x se utilizó la técnica de polvo suelto compactado usando un instrumento Niton XL3 Gold (Figura 7). Antes de la medición se pulverizaron todas las muestras usando un pulverizador tipo *shatter box* de carburo de tungsteno nuevo y en buenas condiciones. En primera estancia se tamizaron las muestras para homogenizar la fracción a pulverizar obteniendo 250 a 500 micras de tamaño. Para el caso de las muestras de mantos de cobre, roca estéril y vetas de cuarzo se trituró ~2 kg usando una quebradora de quijadas de acero. Del material quebrado resultante se realizó un cuarteo para obtener ~100 g de gravilla que se utilizó en el proceso final de pulverizado. De cada muestra se

obtuvieron ~ 50 g de polvo. Algunas muestras de suelo se pulverizaron usando un mortero de alúmina para dar un acabado final.



Figura 7. Procedimiento de técnica de fluorescencia de rayos x de la UACJ en el Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA) Laboratorio de Geología. A) Muestras embolsadas provenientes de campo. B) Fracciones de tamices para preparación de briquetas y geoquímica. C) Tamizado manual de muestras. D) Pulverizado en cápsula marca BICO. E) pulverizado manual con mortero. F) Ejemplos de

probetas de polvo suelto usando filme (Milar-Premier) para análisis de fluorescencia de rayos x. G) Equipo de fluorescencia de rayos Thermo Niton Gold. H) Posicionado de muestra cara abajo para su análisis directo.

3.2.3. Difracción de rayos x (DRX)

Se analizaron 4 muestras de mantos de cobre con un instrumento de difracción de rayos x de marca Panalytical perteneciente al laboratorio de microscopia electrónica del Instituto de Ingeniería y Tecnología de la UACJ (Figura 8). Se utilizó el mismo polvo obtenido de la preparación de las muestras para análisis de FRX. Se empleó una configuración 2 teta de 10 a 80 grados durante el proceso de medición. Para procesar los datos y obtener las fases minerales se empleó el programa computacional comercial Match (Crystal Impact) diseñado para comparar difractogramas desconocidos vs conocidos utilizando la herramienta *FPS tool bar*.

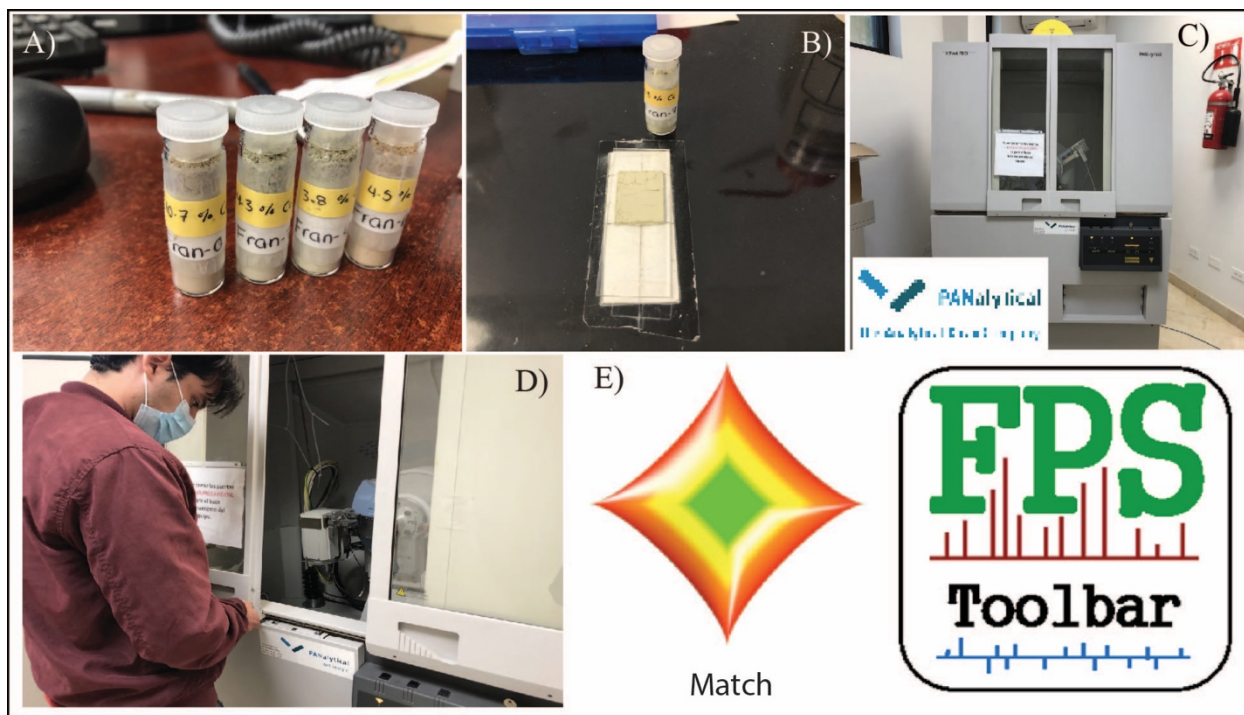


Figura 8. Técnica de difracción de rayos x. A) Ejemplos de muestras con alto contenido de cobre analizadas en difracción de rayos x. B) Ejemplo de muestras preparada para análisis de difracción de rayos x en portaobjeto y sin cubreobjetos. C) Difractómetro de rayos x marca Panalytical Xpert PRO (IIT-UACJ). D) Posicionado de muestra dentro de instrumento con ventanas protectoras de rayos x. E) Programa para procesamiento de datos y base de datos comparativa de difractogramas.

4. Resultados y Discusiones

4.1. Resultados

4.1.1. Petrografía

La inspección petrográfica de las muestras de este estudio reflejó un contenido de minerales en cada grupo de muestras estudiados: (1) Mantos de cobre y roca estéril: El contenido mineral de la roca madre que alberga la mineralización de cobre consiste principalmente en cuarzo, líticos y óxidos de hierro (Fran-7 y 11, Figura 9). Presentan granos redondeados a sub-redondeados de tamaño entre 0.05 mm a 0.25 mm y de líticos de origen ígneo y sedimentario, el tipo de roca correspondería a una sub-litarenita si aplicáramos la clasificación de Folk (1970), este resultado es equivalente al obtenido en el sitio La Concha en la punta norte de Sierra de Samalayuca (Agüero-Juárez, 2021). El contenido de cobre en roca madre mineralizada se observa en color verde en luz transmitida sin analizar y correspondería a malaquita principalmente ya que es efervescente al ácido clorhídrico en muestra de mano. La malaquita se encuentra diseminada, parches y de relleno en intersticios, preferentemente situado en planos de sedimentación (Fran-4 y 9, Figura 2D). También, frecuentemente se observan mosaicos de óxidos de fierro y manganeso. (2) Vetas de cuarzo carbonato: Las vetas de cuarzo carbonato consisten en cuarzo de tipo hidrotermal lechoso con carbonatos de calcio y hierro que se encuentran reemplazados parcialmente por goethita. El cuarzo de veta presenta múltiples patrones de inclusiones fluidas de dos fases, gaseosa y líquida, constituidas aparentemente de agua pura (Sam-5, Figura 9). (3) Sedimentos de arroyo: Bajo luz polarizada simple se puede

apreciar claramente una mayor concentración de granos con coloración verde correspondientes a malaquita y/o mineral de cobre adherido a los granos. En el perfil A

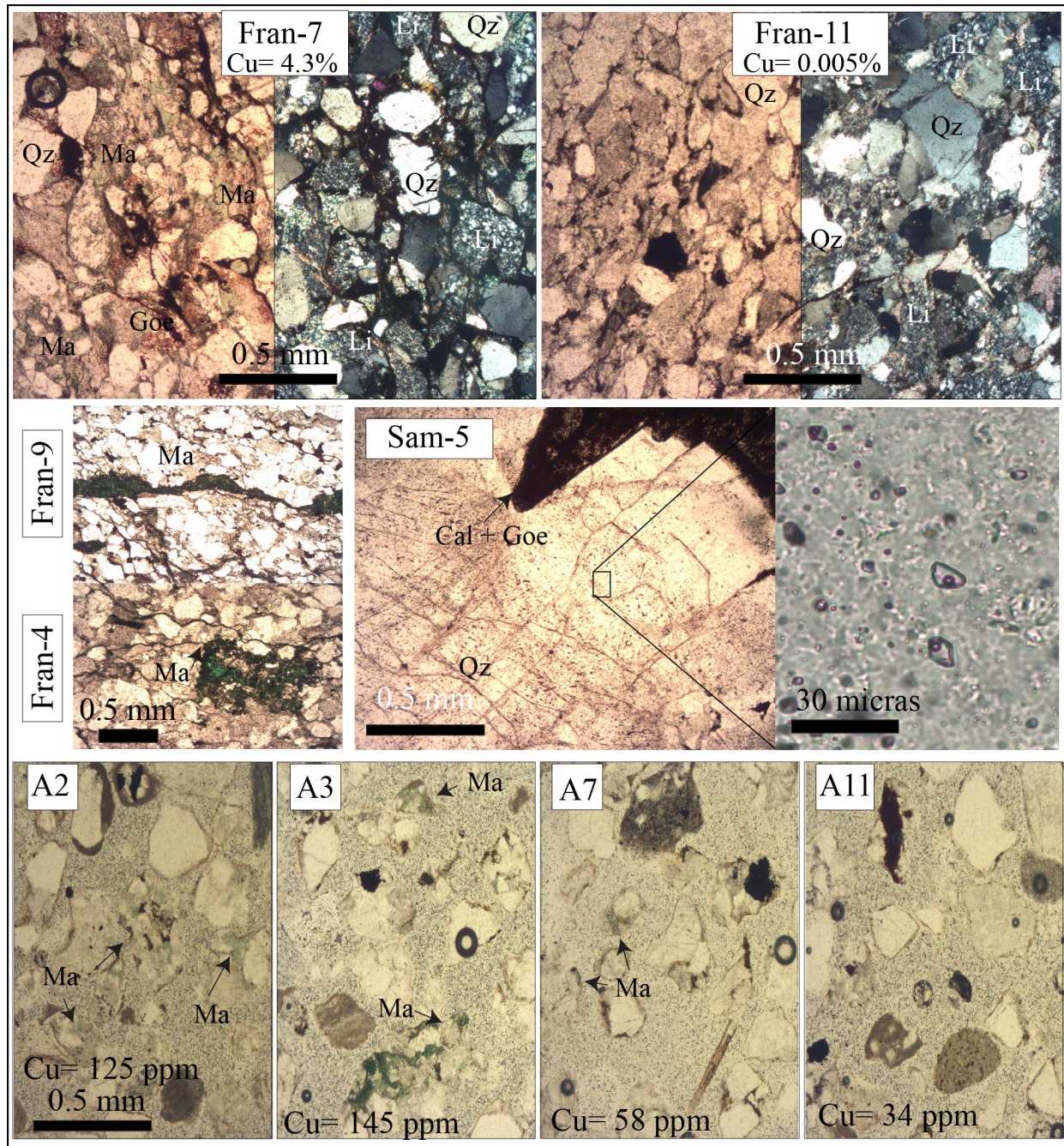


Figura 9. Fotomicrografías de secciones delgadas en luz transmitida plana y analizada de muestras varias del área Sierra de Samalayuca. Fran-7 y Fran-11 corresponden a muestras de mantos de cobre mineralizado y estéril, respectivamente. Muestras SAM-7 y SAM-6 corresponden a vetas de cuarzo carbonato. Muestras A1, A3, A7 y A11 corresponden a

sedimentos de arroyo en briquetas. Cal = calcita, Cu = Cobre, Goe = Goethita, Li = líticos, Ma = Malaquita y/o compuesto de cobre color verde, Qz = cuarzo.

(Figura 9) se observa una disminución paulatina según la concentración de cobre disminuye, hasta no encontrar granos verdes en la muestra A11. Para el resto de los elementos químicos es difícil detectarlos petrográficamente ya que no presentan una propiedad óptica que ayude a identificarlos.

4.1.2. Geoquímica FRX de metales pesados

Se analizaron un total de 64 muestras (Tabla 1 y 2) por la técnica de fluorescencia de rayos x en el Laboratorio de Geología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). Se obtuvieron concentraciones de 12 metales pesados de las muestras de mantos de cobre, roca estéril y vetas de cuarzo carbonato (Tabla 1). Los elementos Au, Be, Hg, Pb, Se y Tl fueron analizados, pero presentaron valores por debajo del nivel de detección. Sobresalen las concentraciones de cobre encontradas en mantos de cobre que son de entre 10.7% y 0.3% de Cu y con un promediando 3% de Cu. Para el caso de las muestras de sedimentos de arroyo y suelos agrícolas-uso residencial se detectó como extra el Pb y en conjunto sumó 13 elementos detectados (Tabla 2). Con los resultados de las muestras de suelos agrícolas y de uso residencial se calculó el factor de contaminación FCUSM, FCUSR (Tabla 2) con respecto a valores de umbral de suelos a nivel mundial (USM; Sipos y Póka, 2002), valores de suelos a nivel regional (USR) de 30 km de radio de Sierra de Samalayuca (SGM, 2003) y valores de concentración promedio de la corteza (Ridley, 2013). El factor de contaminación se calculó dividiendo la concentración en la muestra/concentración umbral (Tomlinson et al., 1980). Adicionalmente, se comparó con respecto a valores de geoquímica de la corteza promedio usando la ecuación FEC: Factor de enriquecimiento con respecto a la corteza según $FEC = [(C_x/CAI) \text{ muestra}/(C_x/CAI)$

corteza]. Cx: Concentración del elemento y CAI: Concentración de aluminio. Como resultados de los cálculos FCUSM y FCUSR se obtuvieron valores cercanos a 1 y como valor más elevado 11. El valor de 1 significaría que la muestras y el umbral serían iguales mientras que 11 significaría 11 veces más el valor del umbral. Respecto a los valores obtenidos con el cálculo FEC se puede observar valores que no son muy enriquecidos ya que van de 1-8 veces el valor de enriquecimiento, exceptuando Ag y Cd que presentan valores de 317 y 140 veces más que la corteza, respectivamente.

Con las concentraciones de metales pesados de las muestras de sedimentos de arroyo correspondientes a los perfiles A, B y C (Figura 3) se construyeron gráficos de concentración versus distancia de la fuente mineral (Figura 10) y se obtuvo que existen concentraciones más elevadas en las

Tabla 1. Metales pesados y otros obtenidos con XRF (NitonXL3 Gold) en mantos de cobre y vetas de cuarzo carbonato de Sierra de Samalayuca, Chihuahua, México.

Mantos de cobre

	cordenada	este	norte	Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Sr	V	Zn
Fran-0	350536	3471612	126	87	589				300	107429	22273			17	106	185
Fran-1	349449	3471271	13	6	276	10	34	377	2968	11978			46	27	79	36
Fran-2	349943	3471247	23		286		48	447	4974	19802	6940	50	23	78	60	
Fran-3	351888	3470313	24		330	9		377	14099	12262			49	20	67	72
Fran-4	352097	3469961	73	10	442	10		458	37878	13736			43	20	119	121
Fran-5	352367	3469764	49		588			246	17291	25556	11849	63	17	175	98	
Fran-6	349818	3471072	18	27	400	10	61	337	44775	17912			48	32	114	144
Fran-7	350129	3471172	106	6	415	11	47	431	43334	20353			38	24	104	94
Fran-8	352199	3470517	17		673		44	347	4485	20784	10702	58	26	192	41	
Fran-9	352042	3470296	36		404		38	395	20694	12316			46	20	119	102
Fran-10	351936	3470437			291	11	35	333	121	14026			43	51	48	20
Fran-11	351866	3469909	9		304	10	29	357	56	10180			44	51	49	12

Vetas de cuarzo carbonato

SAM-3R	352066	3469949	8		175	8		366	64	4387	121	27	4	46	8	
SAM-4	352073	3470189		75	191	10	32	401		11760	141	39	12	63	9	
SAM-5	352040	3470162	9	32	682	11	37	184		14297	848	62	77	26	8	
SAM-6	349959	3471256	9	72	354	12		248	321	12444	585	59	33	65	16	
SAM-7	350018	3471206	7	73	198	9		354	292	11938	299	40	19	28	12	

Las concentraciones de elementos químicos de esta tabla se encuentran expresados en partes por millón (ppm). Espacios vacíos indican por debajo del nivel de detección. El datum de las coordenadas son WGS84. Los metales Au, Be, Hg, Pb, Se y Tl fueron medidos pero se encuentran por debajo del nivel de detección. Límites de detección Hg = 6 ppm y Pb = 4 ppm en matriz de cuarzo (Niton XL3 Gold).

Tabla 2. Metales pesados y otros obtenidos con XRF (NitonXL3 Gold) en suelos agrícolas, residencial y sedimentos de arroyo, Sierra de Samalayuca, Chihuahua, México.

Suelo agrícola y residencial																	
cordenada	este	norte	Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sr	V	Zn	
Sedimentos de arroyo																	
A1	350128	3470896	7	15	312	12	46	562	122	16690	242	46		98	72	21	
A2	350037	3470968	7	15	287		48	446	125	15826	214	28		89	69	21	
A3	349893	3471054	8	13	268		29	555	143	16646	202	37	5	91	69	22	
A4	349664	3471157		15	353	11	41	438	86	16993	212	49	4	63	66	20	
A5	349455	3471194	7	16	309	8	35	461	83	16699	215	34		54	73	17	
A6	349286	3471269	8	21	333	8	42	419	52	16431	212	41		56	72	18	
A7	349120	3471362		17	292	10	41	539	58	16894	172	35		52	71	18	
A8	348894	3471424		15	278		48	542	48	15978	183	36		57	75	19	
A9	348602	3471675	7	15	265		40	484	38	15952	169	34		52	70	15	
A10	348236	3471737	7	17	319		47	640	38	16122	178	36	5	51	72	20	
A11	348024	3471858		17	315		50	503	34	15788	180	35		46	65	17	
B1	350675	3471651		20	1865		40	480	37	19932	341	70		890	77	22	
B2	350684	3471762	10	13	545		46	474	24	17277	263	44		303	68	20	
B3	350643	3471922	6	12	371	9	44	523	23	18109	244	46	6	152	79	18	
B4	350636	3472136	9	17	544		51	639	18	16067	239	42	5	224	72	15	
B5	350677	3472301	7	12	452	8	34	323	19	12082	171	46	6	229	59	16	
B6	350767	3472505	6	13	410	11	36	411	17	12169	172	45	5	228	50	17	
C0	351975	3470316		10	298	8	44	593	300	20551	329	39		61	82	25	
C1	352207	3470426	8	16	317	9	53	562	374	19426	308	42	5	61	75	26	
C2	352306	3470474	8	12	301	8	42	614	235	19469	265	42	5	52	74	23	
C3	352419	3470661	8	16	333	9	32	559	62	19420	202	55		51	82	21	
C4	352459	3470867		15	321	9	42	483	49	18151	194	42	4	49	77	20	
C5	352448	3471015	8	11	311	8	30	370	38	17284	169	39	5	48	73	25	
C6	352446	3471320		17	302		40	485	29	16769	166	45		46	72	16	
C7	352436	3471601	8	18	319	10	37	563	32	19283	171	51		37	80	19	
C8	352391	3471771	10	12	333		38	303		14041	180	49	5	47	65	16	
Suelo agrícola y residencial																	
cordenada	este	norte	Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sr	V	Zn	Al
Cul-1*	356089	3469216	8	7	520	10	25	135	17	5901	188	59	8	1012	27	27	23038
Cul-2*	356140	3469325	8	6	543		34	126	24	5566	198	64	9	1139	24	27	20961
Cul-3*	356320	3469150	8		611	9		174	26	6198	184	61	13	566	32	40	29591
Cul-4*	356914	3468970	8		572	9		244	22	7037	232	46	12	455	47	39	35886
Cul-5*	356914	3468870	8	6	548	10		219	25	10781	248	54	11	924	37	45	29531
Cul-6*	357605	3468817	8	7	485		29	127	20	6833	233	59	8	1400	29	40	26828
Cul-7*	357979	3468532	9	7	518	11	29	148	23	6468	220	52	8	1264	21	30	20614
Cul-8*	358489	3468564	7	7	605		39	273	21	11837	268	60	14	485	50	32	41197
Cul-9*	358389	3468564		6	614		31	216	19	13524	294	63	14	420	75	40	40807
Cul-10*	355317	3469302	9		628	12	32		26	6469	229	53	13	624	43	36	25803
Cul-11*	355311	3469865	9		659	10		36	18	12648	266	61	13	318	46	31	37937
Cul-12*	355525	3470099	11	7	534	12			20	5430	207	71	8	1489	57	23	21280
Cul-13^	352770	3471217	10	5	639	11		26	25	12760	252	66	11	209	49	27	39568
Cul-14^	352698	3471642	9	5	622			45	19	15197	270	63	12	211	62	28	42507
Cul-15^	352829	3472009	12		347	13	13		22	778	137	68		3677			4254
Cul-16^	352955	3472424		5	500		20		16	4984	173	54	11	683	33	18	26958
Cul-17^	352067	3471807	7		657	9		27	23	12397	244	66	15	206	60	25	46492
Cul-18^	351803	3471921	9	8	620	11	78	43	34	27382	441	82	9	163	114	40	41203
Cul-19^	351291	3472160	9	6	648	12	32	45	25	14463	279	62	11	271	53	29	37293
Cul-20*	350392	3472543	6	5	660	10	26	39	23	11120	248	59	11	319	39	24	31038
Cul-21^	350308	3472216	8	4	619	11	27		23	6589	225	53	9	381	35	21	27118
Cul-22*	350415	3472105	8	7	565			26	11571	261	69	8		598	45	19	33218
Cul-23*	352011	3472570	7	6	499	10	23	35	20	12678	230	54	12	444	64	21	32334
Promedio			8	6	575	11	31	115	22	9940	240	61	11	750	47	30	31107
FCUSM			4	1	2	11	3	1	1			3	0.5				0.4
FCUSR			4	2			6		3			10	2				1
FEC			317	8	4	140	3	3	1	0	1	2	2	5	1	1	
Norma			390*	22*	5400*	37*		280*	100#			1600*	400*		78*	200#	
USM			2	8	300	1	12.5	125	27.5			22.5	22.5				75
USR			2	2.5			5		8			6	7				32.61
VPC			0.07	2	425	0.2	25	100	55	56300	950	75	13	375	135	70	

Las concentraciones de elementos químicos de esta tabla se encuentran expresados en partes por millón (ppm). Espacios vacíos indican por debajo del nivel de detección. El datum de las coordenadas es WGS84. Los metales Au, Be, Hg, Se y Tl fueron medidos pero se encuentran por debajo del nivel de detección. Límites de detección Hg = 6 ppm y Pb = 4 ppm en matriz de cuarzo. * = Agrícola, ^ = Residencial, ° = Arroyo. Norma: Concentración límite propuesta para uso agrícola, residencial y comercial. * Norma 147-SEMARNAT-SSA-1 2004 (mexicana), # Agencia Australiana (He et al., 2015). USM: Umbral en suelos promedio a nivel mundial (Sipos y Poka, 2002). USR: Umbral en suelos promedio a nivel regional a 30 km de radio (SGM, 2003). VPC: Valores promedio de la corteza (Ridley, 2013). FCUSM y FCUSR: Factor de contaminación con respecto a la concentración en las muestras y las de suelos a nivel mundial y regional aplicando ecuación de Tomlinson et al. (1980). FEC: Factor de enriquecimiento con respecto a la corteza según $FEC = [(C_x/CAI)_{muestra}/(C_x/CAI)_{corteza}]$. Cx: Concentración del elemento y CAI: Concentración de aluminio

muestras que se encuentran cerca de la fuente mineral, esto es más notorio en el Cu y Mg observándose un espectro en caída de positivo a negativo (Figura 10 y/o Tabla 2). Para el resto

de los elementos As, Cd, Cr y Pb el espectro no es claro ya que todas las muestras del perfil presentan valores similares entre sí. También, se compararon los valores de metales pesados de cada perfil de dispersión con los de la norma mexicana, que determina los límites permisibles de concentraciones de metales pesados que debe contener un suelo agrícola, residencial y comercial (Norma 147-SEMARNAT-SSA-1 2004), y la norma de la agencia australiana (He et al., 2015), encontrándose que solo los valores de cobre y cromo a una distancia aproximada de 500 metros de la fuente se encuentran por encima del límite permisivo (Figura 10). Por otro lado, las concentraciones de las muestras de suelos agrícolas, residencial y comercial del presente estudio en todos sus elementos se encuentran por debajo de las concentraciones límite permisibles de la norma mexicana y la agencia australiana (Figura 11).

4.1.3. Difracción de rayos x

Con esta técnica solo se analizaron mantos de cobre y se seleccionaron muestras (Fran-0, Fran-4, Fran-6 y Fran-7) con un elevado contenido en cobre (3.8 a 10.7%) con el objetivo de tener un mayor éxito en la identificación de minerales asociados a la geoquímica (Figura 12). Cabe resaltar que el fierro también se encuentra en un contenido alto del orden de ~1-2%. Los resultados de empate utilizando la base de datos del programa Match-FPS-toolbar y los de las muestras arrojaron de manera contundente la presencia de cuarzo >90 % en el total de las muestras. Se identificó un compuesto de cobre conocido como dicobre en proporción de 0.5-1.4%, además de otro compuesto de Cu_2 (SnSe_3) en 1%. Adicionalmente se identificó wollastonita (CaSiO_3) en 4.5%

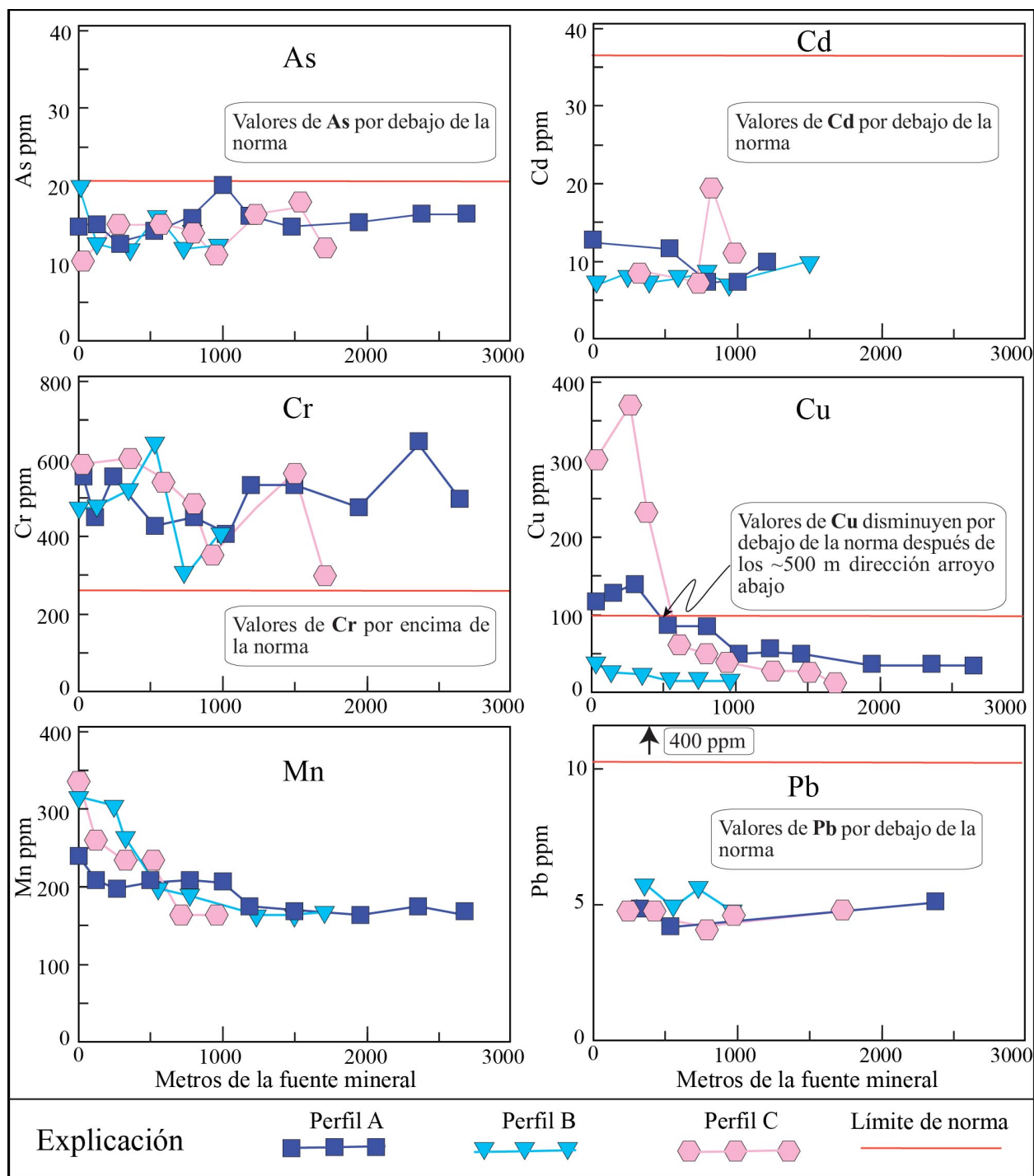


Figura 10. Perfiles de transporte de metales pesados As, Cd, Cr, Cu, Mn y Pb ppm vs. distancia en metros de la fuente mineral de minados de mantos de cobre, vetas y tepetateras en Sierra de Samalayuca, Chihuahua, México. La fuente mineral de metales pesados es la máxima elevación adyacente a los 0 metros del inicio del perfil y 3000 metros es la elevación más baja arroyo abajo. La línea roja indica el límite de concentración de metal pesado aceptado por la NOM-147-

SEMARNAT/SSA1-2004 y en complemento con valores de la agencia australiana para uso agrícola, residencial y comercial.

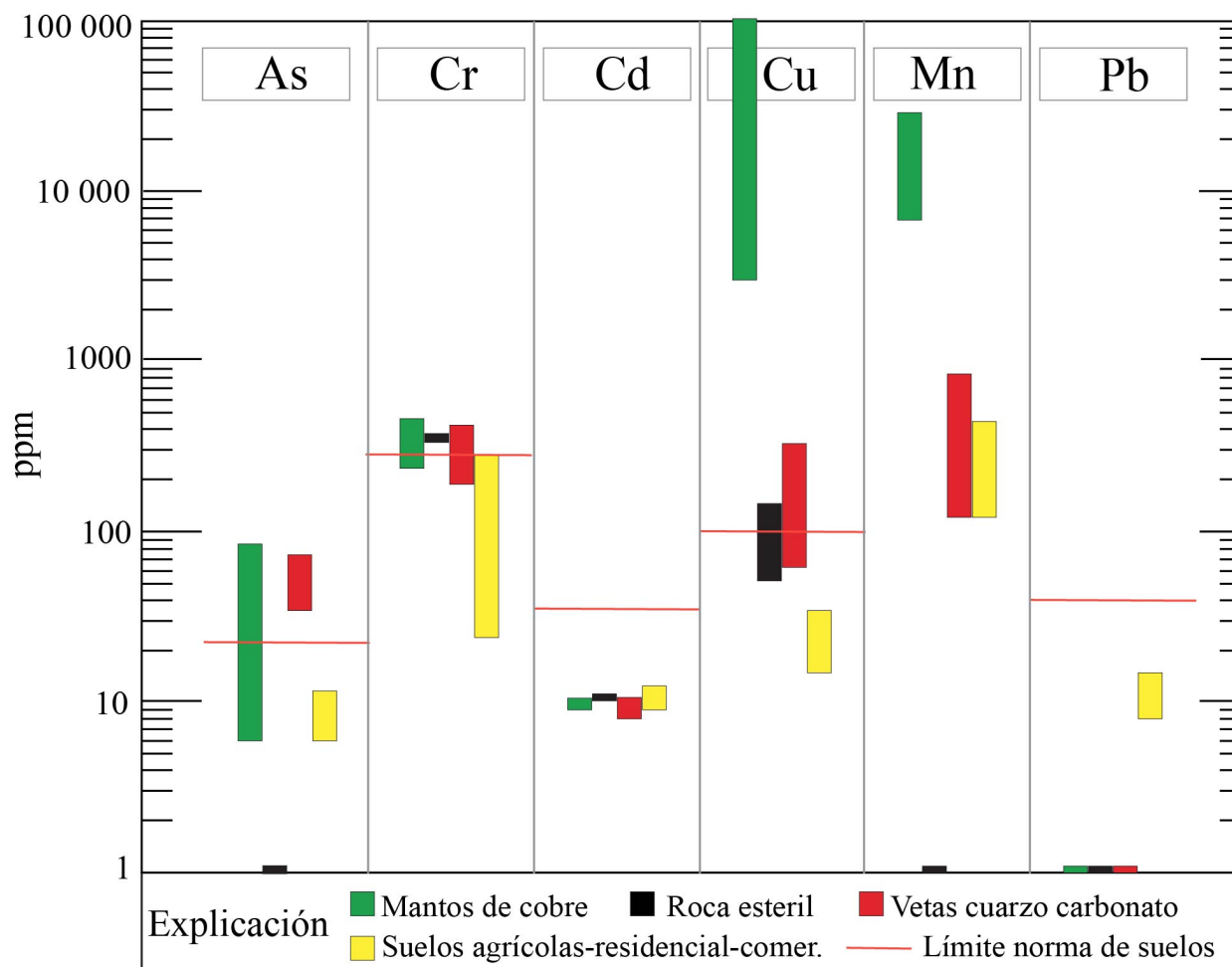


Figura 11. Rango de concentraciones absolutas escala logarítmica de As, Cd, Cr, Cu, Mn y Pb en ppm determinadas para muestras de este estudio de Sierra de Samalayuca, Chihuahua, México (Tablas 1 y 2). La línea roja indica el límite de concentración de metal pesado aceptado por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, y en complemento con valores de la agencia australiana para uso agrícola, residencial y comercial.

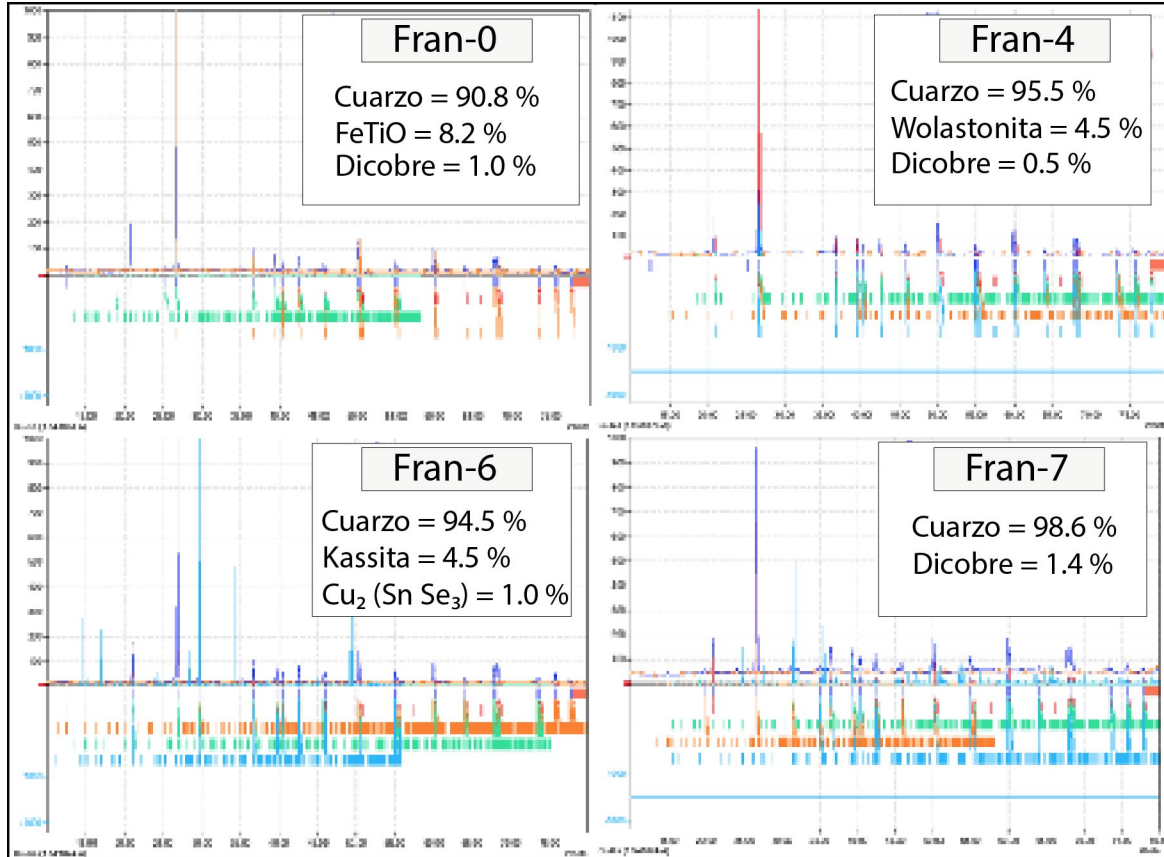


Figura 12. Difractogramas de muestras de mantos de cobre de mayor concentración de cobre obtenida en este estudio del área Sierra de Samalayuca.

en la muestra Fran-4 y kassita (CaTi_2O_4) en 4.5% en la muestra Fran-6. Finalmente se detectó un compuesto óxido de Fe y Ti en la muestra Fran-0 en 8.2%.

4.2. Discusión

4.2.1. Caracterización mineral

La caracterización de la mineralogía de los mantos de cobre y los sedimentos de arroyo del presente estudio corresponden a óxidos, compuestos de Sn-Te y carbonatos de cobre, en algunos casos, precipitados en forma de patinas y vetillas (Fran 4 y 9; Figura 4). Esto sugiere que los minados y tepetateras de los proyectos de los sitios mineros La Gloria y la Zorra en Samalayuca (Figura 2) son una zona de óxidos y de reprecipitación mineral. En contraste, estudios previos indican que a profundidad existe una mineralogía primaria de sulfuros (ejemplos, calcopirita, pirita y bornita) indicando niveles hipogénicos (Bruno, 1995; Boily, 2013). Igualmente, se observa que las vetas carbonato se encuentran oxidadas a partir de sulfuros como pirita completamente remplazados a goethita y con reprecipitados de patinas, vetillas y hábitos fibroradiales (Figura 2). Lo anterior, sugiere fluctuaciones constantes de un nivel freático; proceso que ocurre típicamente en climas desérticos (p.ej., desierto de Marruecos; Poot et al., 2020) justo como en el que se encuentra posicionado Sierra de Samalayuca.

Las vetas de cuarzo carbonato de Sierra de Samalayuca, que aparentemente no han sido materia de estudio en trabajos previos (Berg, 1969; Bruno, 1995; Cástulo, 1997; Boily, 2013), se encuentran cortando estratigráficamente hasta la secuencia sedimentaria Jurásica de la Fm. La Casita. Esto sugiere que el tiempo de emplazamiento del evento mineralizante es post Jurásico y

posiblemente sería Cretácico o Cenozoico temprano. Por su parte, el hecho de que estas vetas tengan un contenido muy importante de inclusiones fluidas acuosas correspondientes a una mezcla de agua meteórica con respecto al fluido hidrotermal original y debido a la poca profundidad de emplazamiento, lo anterior concuerda con tener rocas sedimentarias como base encajonante que representan un nivel somero de emplazamiento para estas vetas hidrotermales. La paragénesis mineral de cuarzo, carbonato, pirita oxidada y mica blanca muy fina en combinación con una ocurrencia controlada por estructuras sintectónicas de falla, cizalla, plegamiento sugiere que estas vetas encajan con una mineralización de tipo vetas orogénicas o de la tipología de oro de tipo orogénico (Goldfarb et al., 2001). Cabe mencionar este tipo de mineralización no es anómala en el norte de México y sobre todo dentro de la margen activa norteamericana que acusó a la región durante el Cretácico tardío y Terciario temprano (Izaguirre et al., 2017).

4.2.2. Geoquímica de metales pesados

4.2.2.1. Concentraciones de geoquímica base de mantos de cobre y vetas de cuarzo

Las concentraciones de geoquímica base generadas en el presente estudio sobre mantos de cobre y vetas de cuarzo (Tabla 1, Figura 11) son importantes para establecer un precedente sobre todo para futuros estudios realizados con la misma técnica de fluorescencia de rayos x portátil. Los resultados confirman que los valores en mantos de cobre fluctúan entre 10% a 0.3% de Cu lo que sugiere que existe un abundante recurso de cobre en lo general y que es muy semejante con tipologías de yacimientos minerales de muy alto contenido de cobre tal como son los yacimientos de pórfidos cupríferos en su zona supergénica compuestos por calcocita (Sillitoe, 2010). Así mismo las concentraciones concuerdan con las encontradas en estudios previos

enfocados a caracterizar la mineralización de cobre (Bruno, 1995; Boily, 2013). Con respecto al resto de metales pesados destacan las concentraciones de As, Mn, Fe, Cr en la roca mineralizada que presenta niveles altos comparando con valores límite permitidos en uso de suelos en lo general en México (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) y la agencia australiana (Figura 11).

4.2.2.2. Perfiles de dispersión

La dispersión de metales pesados se puede analizar observando los perfiles de sedimentos de arroyo A, B y C (Tabla 2 y Figura 10) que indican claramente una concentración que va de mayor a menor en Cu, Mn y Fe, se puede observar una mayor concentración en un inicio de los perfiles que corresponde a las muestras más cercanas de las áreas mineralizadas y una disminución paulatina hacia las zonas más bajas retiradas de las mismas. Lo anterior, es más notorio en los perfiles A y C que poseen zonas de tepetate más amplias y por lo tanto una mayor disponibilidad de fragmentos de mantos de cobre y vetas de cuarzo carbonato que serian las fuentes de aporte principal de metales pesados a los sedimentos de arroyo. Esto indica que el tener tepetateras en el pie de montaña es un factor más importante para la propagación de metales pesados en comparación a tener un gran minado como es el caso del perfil B que posee una gran cantera de minado de tajo a cielo abierto (Figura 2A). También, en los resultados de sedimentos de arroyo del mismo perfil se observó que después de los 500 metros de la fuente el Cu baja a niveles permitidos (Figura 10) para uso de suelo lo cual pudiera deberse a que a partir de ese punto los arroyos se extienden de manera notoria formando planicies, dando pie a la formación de un valle amplio y reduciendo las concentraciones notoriamente.

4.2.2.3. Factor de contaminación en suelos

Los factores de contaminación obtenidos de las muestras de cultivos agrícolas y de uso residencial fluctúan entre 1 y 11 (Tabla 2), esto en términos simples indica que se presenta una baja contaminación por metales pesados; por ejemplo, los valores de factor de contaminación en As, Cr y Cu son de ~ 1 es decir son semejantes o iguales a los valores promedio umbral ambiental en suelos a nivel mundial (Sipos y Póka, 2002; Reimann y Caritat, 2016). No obstante, si analizamos los valores de estos metales pesados, pero en los sedimentos de arroyo de los perfiles

A, B y C encontramos que en estos últimos pueden ser 3 o 4 veces más elevados. Esto se puede explicar debido a que las vetas de cuarzo carbonato y los mantos de cobre presentan valores por encima de los observados en suelos. Con respecto a los valores de enriquecimiento de Ag encontrados con el cálculo de FEC se pueden explicar con un aporte directo de los mantos de cobre que presentan valores anómalos en plata; sin embargo, para el alto contenido en Cd pudiera influir el tipo de litología que compone a la Sierra de Samalayuca que contrastaría con el valor tan bajo de 0.2 que presenta la corteza promedio (Tabla 2).

4.2.2.4. Comportamiento de algunos elementos pesados

4.2.2.4.1. Cromo (Cr)

Para el caso específico del Cr se tiene que analizar más en detalle donde es que se aloja este elemento ya que en la roca estéril, mantos de cobre y vetas de cuarzo carbonato sus concentraciones promedio exceden los niveles permitidos por la norma mexicana y/o la de otros países a nivel internacional en suelos (He et al., 2015) y así como los valores umbral en suelos (Sipos y Pokás, 2002). Inclusive, cabe mencionar que se percibe una mayor concentración de Cr en sedimentos de arroyo comparando con la roca madre (Tabla 1).

4.2.2.4.2. Plomo (Pb)

A pesar de que el Pb se encuentra en bajas concentraciones y presenta factores de contaminación bajos (0.5 y 2; Tabla 2) su presencia en suelos agrícolas (15 ppm) y en sedimentos de arroyo (6 ppm) es constante. En contraste, no se detectó Pb en roca estéril, mantos de cobre y vetas de cuarzo carbonato (Tabla 1) esto a pesar de que constantemente se afirma que la roca madre es por mucho el principal aporte geoquímico hacia los suelos (Santos-Francés et al., 2017; Barkett y Akün 2018; Sulaiman et al., 2019; Qiao et al., 2020). Sin embargo, al no

presentar Pb la roca madre en este y seguramente en la mayoría de los casos de estudio similares, se podría deber a factores de contaminación a nivel global que se originaron por el uso de gasolinas con plomo que ocurrió por varias décadas antes de los años 90's (Settle y Patterson, 1980) lo que hizo propagar Pb en el medio ambiente generalizadamente. Dicho lo anterior, la zona residencial agrícola # 2 que se encuentra cerca de caminos y a la carretera Panamericana (Figura 3) pudiera responder a dicho argumento. Otra respuesta podría ser la adición constante de fertilizante a suelos agrícolas de dicha zona en muestras agrícolas cercanas al poblado de Samalayuca, parcelas que han sido de uso intenso. Igualmente, se puede asociar a la influencia de contaminación de la termoeléctrica cercana que genera electricidad quemando combustibles fósiles (Figura 4F).

4.2.2.4.3. Manganeso (Mn)

Acerca del manganeso (Mn) no se encontró valores comparativos de norma ambiental o valores de umbral en suelos que pudieran advertir contaminación de los suelos de Sierra de Samalayuca. Sin embargo, es indudable su presencia en alta concentración sobre todo en los mantos de cobre (Figura 11) ya que es perfectamente identificable como mineral porque forma dendritas y parches en forma de motas oscuras casi en cualquier muestra que se tome en Sierra de Samalayuca (Figura 2D; Agüero-Juárez, 2021, pág. 62). La presencia de manganeso a nivel regional se puede advertir claramente ya que existen múltiples minas dentro de la cartografía geológica a lo largo de un corredor que se puede trazar desde el centro del estado de Chihuahua (p.ej., Sierra Mojina; SGM, 1998) y hasta el centro del estado de Nuevo México, E.E.U.U. (Región del Socorro NM; Wells, 1918).

4.2.2.4.4. Arsénico y Cadmio (As y Cd)

El As y Cd se encuentran muy por debajo de los niveles máximos permitidos en uso de suelos, sin embargo, se puede destacar que el As se encuentra constantemente en las vetas de cuarzo y carbonato en comparación a los mantos de cobre que, en algunas de las muestras, de estos últimos, no se pudo detectar (Tabla 1). En este caso se debe mantener atención hacia las vetas cuarzo carbonato, sobre todo si Sierra de Samalayuca entrase en un proceso de minado a cielo abierto tal como proyectan en los objetivos mineros actuales (Boily, 2013).

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones del proyecto

No se encontró una dispersión de metales pesados que sobrepasen los niveles permitidos o los niveles umbral para el caso de sedimentos de arroyo, exceptuando el Cu y Cr que potencialmente su nivel se mantiene por encima aproximadamente a 500 metros de distancia desde los sitios de minados hacia las zonas residenciales y agrícolas de Sierra de Samalayuca. Por su parte, los suelos estudiados se encuentran por debajo de los niveles de metales pesados permitidos por la norma mexicana y agencias internacionales. En cambio, si se observó que los mantos de cobre y vetas de cuarzo carbonato presentan niveles altos de concentración en Cu de hasta 10% y sobrepasan en As y Cr los niveles permitidos por la norma mexicana para suelos. No se detectó presencia de Hg en ninguna muestra de este estudio.

Se establecieron niveles base de concentraciones para mantos de cobre, vetas de cuarzo carbonato, sedimentos y suelos que serán útiles para estudios posteriores en caso de exponer una mineralogía hipogénica debido a futuros minados de profundidad que potenciarían condiciones de dispersión y concentración.

Además, se identificó y documentó la mineralización de vetas de cuarzo carbonato que no había sido contemplada en estudios previos y que potencialmente representa una fuente de metales pesados sobre todo por su nivel constante en arsénico.

5.2. Recomendaciones y reflexiones

5.2.1. Trabajo futuro

Se recomienda continuar con esta investigación en tres vertientes pertinentes. La primera, para determinar la aportación eólica en el contenido de metales pesados de los suelos aledaños a la zona mineralizada a la que se hace referencia en esta investigación. La segunda desde una perspectiva geológica, actualizar la estimación del contenido de cobre en la mineralización de la Sierra de Samalayuca ya que como se observa en la presente investigación las vetas de cuarzo, que no son contempladas en la estimación de reservas, solo contiene óxidos de cobre en la superficie, esto en materia ambiental influye en el cálculo de la dispersión de metales pesados en las matrices aledañas. Por último, se recomienda realizar una evaluación en los suelos a profundidad para determinar el grado de influencia por gravedad.

5.2.2. Reflexión sobre las aportaciones del presente trabajo

El propósito de este trabajo ha sido llevar a cabo una contribución acerca del estado actual de contaminación por metales pesados a algunas de las matrices ambientales aledañas a la zona mineralizada de la Sierra de Samalayuca, con el propósito de establecer una línea base de conocimiento para la toma de las medidas necesarias de remediación de la zona. Algunas veces las personas más afectadas por un factor determinado son las mismas que se encuentran ajenas a esta información tan relevante y por ello no pueden exigir a las autoridades pertinentes las acciones necesarias para una vida sin riesgos ambientales. Es imprescindible que la información llegue a todas las personas y no solo a grupos de interés científico y se tiene que comenzar con generar la información y difundirla.

Por otro lado, el principal problema a resolver fue determinar la concentración de metales pesados que han sido dispersados en los suelos y en los sedimentos aluviales aledaños a partir de la zona mineralizada y cuáles han sido las principales rutas y métodos de transporte y se pueda más adelante modelar una resolución y las posibles consecuencias si no se remedia lo que hasta ahora este hecho.

La información suscitada en el presente trabajo incluye los llamados datos duros: análisis químicos de metales pesados en mena, roca y sedimentos, que pueden ser interpretados según el contexto y las variables analizadas por lo que la producción y publicación de datos de esta índole pueden ser utilizados en un futuro para la correlación de información en vías de un desarrollo sostenible, remediación u otras evaluaciones ambientales. Los datos petrográficos también son una contribución que puede reinterpretarse en otro contexto, ya que no pertenecen a la

clasificación de datos duros, pero en cierta medida complementan la información de manera determinante junto con las interpretaciones de las aureolas de dispersión.

En esta investigación se da por un hecho que, aunque sea baja o nula la dispersión actual de los metales pesados, la posibilidad de que se agudice un problema ambiental debido a este factor es indiscutible, quizá no ahora ni en cincuenta años, pero en algún momento si no se remedia, lo que será un problema ambiental heredado a los futuros pobladores de esta zona.

Utilizando la geología, la mineralización y la geoquímica se puede correlacionar información que brinde un panorama distinto al que estamos acostumbrados a observar en los estudios de evaluación ambiental. Es por eso por lo que cabe destacar, que se espera que este tipo de trabajos se emulen en otras zonas del país y del mundo entero con la finalidad de mejorar la situación actual de las zonas mineras abandonadas mucho antes de que representen un problema irremediable.

Referencias bibliográficas

Agüero-Juárez, K.M., 2021, Caracterización petrológica del yacimiento de cobre “La Concha” en Sierra de Samalayuca, Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 84 p.

Barkett, M.O., Akün, E., 2018, Contenido de metales pesados de suelos contaminados y evaluación de riesgos ecológicos en el puerto de una mina de cobre abandonada en Yedidalga, en el norte de Chipre. *Ciencias Ambientales de la Tierra*, 77, 10, 1–14.

Berg, E.L., 1969, Geology of Sierra de Samalayuca, Chihuahua, Mexico: in: *The Border Region (Chihuahua, Mexico, & USA)*, Cordoba, D. A.; Wengerd, S. A.; Shomaker, J. W.; [eds.], New Mexico Geological Society 20th Annual Fall Field Conference Guidebook, 228, p. 176–181.

Boily, M., 2013, The Samalayuca stratiform sediment-hosted copper mineralization Northern Chihuahua State, Mexico, Technical Report, 160 p.

Bruno, C.B., 1995, A mineralogical and geochemical study of the sandstone-hosted stratiform copper deposits at Sierra de Samalayuca, Chihuahua, Mexico. M.Sc. thesis, University of Colorado at Boulder, 219 p.

Cástulo, L., 1997, Stratigraphy and structure of the Sierra Samalayuca, northern Chihuahua, Mexico: Msc. Thesis, University of Texas at El Paso, 135 p.

Chakraborty, S., Man, T., Paulette, L., Deb, S., Li, B., Weindorf, D.C., Frazier, M., 2017, Rapid assessment of smelter/mining soil contamination via portable X-ray fluorescence spectrometry and indicator kriging: *Geoderma*, 306, p. 108–119.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2013, Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Médanos de Samalayuca, Semarnat, Conanp, 169 p.

Folk, R.L., Andre, P.B., Lewis, D.W., 1970, Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zeland: New Zeland journal of Geology and Gephysics, 13, 8, p. 937–968.

Goldfarb, R.J., Groves, D.I., Gardoll, S., 2001, Orogenic gold and geologic time: a global synthesis, Ore GeologyReviews, 18, 1-2, p. 1–75.

He, Z., Shentu, J., Yang, X., Baligar, V.C., Zhang, T., Stoffella, P.J., 2015, Heavy Metal Contamination of Soils: Sources, Indicators, and Assessment, Journal of Environmental Indicators, 9, p. 17–18.

Izaguirre, A., Camprubí, A. Iriondo, A., 2017, Mesozoic orogenic gold deposits in Mexico: Ore Geology Reviews, 81(3), p. 1172–1183.

Lemiere, B., 2018, Una revisión de las aplicaciones de XRF (fluorescencia de rayos X portátil de campo) para la geoquímica aplicada: Revista de Exploración Geoquímica, 188, p. 350–363.

Naidu, G., Ryu, S., Thiruvengkatahari, R., Choi, Y., Jeong, S., Vigneswaran, S., 2019, A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage: Environmental Pollution, Volume 247, p. 1110–1124,

Poot, J., Verhaert, M., Dekoninck, A., Oummouch, A., El Basbas, A., Maacha, L., Yans, J., 2020, Characterization of weathering processes of the giant copper deposit of tizert (IghermInlier, Anti-Atlas, Morocco): Minerals, 10, 7, 620, p. 1–28.

Qiao, D., Wang, G., Li, X., Wang, S., Zhao, Y., 2020, Pollution, sources and environmental risk assessment of heavy metals in the surface AMD water, sediments and surface soils around unexploited Rona Cu deposit, Tibet, China: *Chemosphere*, Volume 248.

Reimann, C., Caritat, P., 2016, Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil: *Science of the Total Environment: Sci Total Environ*, p. 633–648.

Ridley, J., 2013, *Ore Deposit Geology*, Cambridge University Press, 398 p.

Rincheval, M., Cohen, D.R., Hemmings, F.A., 2019, Mapeo biogeoquímico de la contaminación por metales de los relaves mineros utilizando XRF portátil de campo. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 662, p. 404–413.

Santo-Francés, F., Martínez-Graña, A., Alonso-Rojo, P., García-Sánchez, A., 2017, Geochemical background and baseline values determination and spatial distribution of heavy metal pollution in soils of the Andes Mountain Range (Cajamarca-Huancavelica, Peru): *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14, 859, p. 1–22.

Settle, D.M., Patterson, C.C., 1980, Lead in Albacore: Guide to Lead Pollution in Americans: *Science*, 207, p. 1167–1176.

SGM, 1998, Carta Geológica Minera, Buena Aventura, Chihuahua, clave H13-7, escala 1:250, 000, estado de Chihuahua.

SGM, 2003, Carta Geológica Minera y Geoquímica de Ciudad Juárez, Chihuahua, clave H13-1, escala 1:250, 000, estado de Chihuahua.

Sillitoe, R., 2010, Porphyry Copper Systems1: Economic Geology, 105, 1, p. 3–41.

Sipos, P., Póka, T., 2002, Threshold limit values for heavy metals in soils in the function of spatial and temporal variation of geochemical factors: *Geologica Carpathica*, 53, cd-rom.

Skousen, J.G., Ziemkiewicz, P.F., McDonald, L.M, 2019, Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies: *The Extractive Industries and Society*, 6, 1, p. 241–249.

Sulaiman, M.B., Salawu, K., Barambu, A.U., 2019, Evaluación de concentraciones y riesgo ecológico de metales pesados en suelos residentes y remediados del sitio minero no controlado en Dareta Village, Zamfara, Nigeria. *Revista de Ciencias Aplicadas y Gestión Ambiental*, 23, 1, p. 187–193.

Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., Jeffrey, D.W., 1980, Problems in Assessment of Heavy Metals in Estuaries and the Formation of Pollution Index: *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33, p. 566–575.

Wells, B.H., 1998, Manganese in New Mexico: *Bulletin of New Mexico School of Mines*, 2, 85 p.