



Universidad Nacional Autónoma de México

Posgrado en Ciencias de la Tierra

Instituto de Geología

Estación Regional del Noroeste

Origen y caracterización geoquímica - mineralógica de las sales eflorescentes en jales mineros: caso Nacozari de García Sonora, México

TESIS

Tesis que para optar el grado de:
Maestro en Ciencias de la Tierra

Presenta:

Luis Alberto Palomino Medina

Tutor:

Dr. Martín Andrés Valencia Moreno Instituto de Geología, ERNO

Miembros del comité tutor:

Dr. Martín Andrés Valencia Moreno (Estación Regional Noroeste, UNAM)

Dra. Diana María Meza Figueroa (Departamento de Geología, UNISON)

Dr. Rafael Del Río Salas (Estación Regional Noroeste, UNAM)

Hermosillo Sonora, Mayo 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*“We can judge our progress by the courage of our questions
and the depth of our answers, our willingness to embrace
what is true rather than what feels good”*

Carl Sagan

*“To raise new questions, new possibilities, to regard old problems from a new angle,
requires creative imagination and marks real advance in science”*

Albert Einstein

“Exploration is in our nature. We began as wanderers, and we are wanderers still.

We have lingered long enough on the shores of the cosmic ocean.

We are ready at last to set sail for the stars”

Carl Sagan, Cosmos

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

Luis Alberto Palomino Medina

Copyright is owned by the Author of the thesis.

The thesis may not be reproduced elsewhere

without the permission of the Author.

Abstract

Mine tailings of Nacozari de García are the product of the mining activity in the Pilares de Nacozari mine between 1895 and 1949. For over 70 years, these tailings have been exposed to physical and chemical weathering, causing oxidation of sulfides, production of acid mine drainage (AMD) and formation of surficial efflorescence salts. Water and wind erosion promotes dissolution and dispersion of secondary copper sulfates to residential areas surrounding these tailings. The aim of this study is to characterize the geochemistry and mineralogy of the efflorescence salts present in the tailings dam I. The study provides clues on the geochemical behavior of the tailing minerals at depth, which may help to understand mobility and retention of elements involved in the formation of surficial soluble efflorescence copper salts. A X-ray diffraction (XRD) study showed that secondary minerals in tailings includes jarosite ($\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), jokokuite ($\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), rozenite ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), alpersite ($(\text{Mg,Cu})(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), chalcantite ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ferrihydrite ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), cuprian pentahydrate ($(\text{Mg,Cu})\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) and ramsbeckite ($(\text{Cu,Zn})_{15}(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{22} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). X-ray fluorescence (XRF) analyses indicate an exceptional enrichment of copper in efflorescent salts, with concentrations ranging from 8% to 14% Cu on top (evaporation zone), while lower concentrations are observed at deeper levels (0 - 10 m) (oxidation zone). The processes of evaporation and capillarity are those that promote migration and enrichment of copper salts efflorescence in the evaporation zone. Arsenic is concentrated mainly in the oxidation zone and is the only element that exceeds concentrations regulated by the Official Mexican Norm NOM-147-SEMARNAT SSA1-2004 for soils with residential use (> 22 ppm). The data obtained by XRD and XRF may help to establish criteria for native wildlife regarding the tolerance levels of copper and other elements, and ultimately in the efforts to look for a proper mechanism to reduce the problem, which may consider phytoremediation. Although not evaluated here, metal recovering from secondary copper sulfates could represent an interesting economic opportunity for the mining industry.

Keywords: Mine tailings, Nacozari de García, Pilares mine, AMD, efflorescent salts, chalcantite, alpersite, cuprian pentahydrate, ramsbeckite, evaporation zone, oxidation zone, capillarity.

Resumen

Los jales mineros de Nacozari de García son producto de la actividad minera del antiguo yacimiento de Pilares de Nacozari, durante su explotación en el periodo de 1895 a 1949. Por más de 70 años estos jales han estado expuestos al intemperismo fisicoquímico, provocando la oxidación de sulfuros, producción de drenaje ácido de mina (DAM) y formación de sales eflorescentes superficiales. La erosión hídrica y eólica promueve la disolución y dispersión de los sulfatos de cobre secundarios a las áreas residenciales aledañas a estos jales. El objetivo de este estudio es caracterizar geoquímica y mineralógicamente las sales eflorescentes presentes en la presa de jales I, así como también entender el comportamiento geoquímico a lo largo de perfiles verticales en los jales, lo cual ayudará a comprender los procesos de movilidad y retención elemental involucrados en la formación de sales eflorescentes solubles de cobre de manera superficial. Un estudio de difracción de rayos X (DRX) ha demostrado que la mineralogía secundaria en los jales de Nacozari está compuesta por jarosita ($\text{KFe}^{3+}3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), jokokuita ($\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), alpersita ($(\text{Mg,Cu})(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), calcantita ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ferrihidrita ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), pentahidrita cúprica ($(\text{Mg,Cu})\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y ramsbeckita ($(\text{Cu,Zn})_{15}(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{22} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Los análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) indican un enriquecimiento excepcional en sales eflorescentes con concentraciones que van del 8% al 14% de Cu en la parte superior (zona de evaporación), el cual disminuye con la profundidad (0 – 10 m) (zona de oxidación). Los procesos de evaporación y capilaridad son los que promueven la migración y enriquecimiento de las sales eflorescentes de cobre en la zona de evaporación. El arsénico se concentra principalmente en la zona de oxidación, y es el único elemento que sobrepasa las concentraciones permitidas por la Norma Oficial Mexicana NOM-147 SEMARNAT-SSA1-2004 para suelos con uso residencial (>22 ppm). Los datos obtenidos por DRX y FRX serán de suma importancia para establecer criterios sobre los niveles de tolerancia de cobre en la flora

silvestre que crece en los jales de Nacozari, y finalmente en los esfuerzos para la búsqueda de mecanismos que permitan reducir el problema, lo cual podría involucrar a la fitorremediación. Aunque no se hace una evaluación de ello, se estima que la recuperación de metales a partir de los sulfatos de cobre en los jales de Nacozari de García pudiera representar una interesante oportunidad económica para la industria minera.

Palabras clave: jales mineros, Nacozari, Pilares, DAM, sales eflorescentes, calcantita, alpersita, pentahidrita cúprica, ramsbeckita, zona de evaporación, zona de oxidación, capilaridad.

Agradecimientos

Agradezco primeramente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo económico durante la realización de mis estudios de posgrado. Un agradecimiento muy especial a mi casa de estudios la Universidad Nacional Autónoma de México por su gran ayuda para mi desarrollo profesional y humano. Le agradezco tanto al Instituto de Geología en Ciudad Universitaria como la Estación Regional del Noroeste en Hermosillo Sonora.

Un agradecimiento sincero a mis profesores asesores en la realización de este trabajo. Al Dr. Martín Valencia Moreno por su gran apoyo logístico, capacidad de discusión, aporte de ideas y apoyo en la redacción de mi tesis. A la Dra. Diana Meza Figueroa por su ayuda con su gran conocimiento en este tema, por su accesibilidad a diversos equipos analíticos para la realización de este trabajo y asesorías para utilizarlos, por su aporte de ideas y gracias por ayudarme con su profesionalismo como analista. Al Dr. Rafael del Rio Salas por su invaluable ayuda en campo, accesibilidad al microscopio electrónico de barrido y por discutir conmigo ciertos temas que me ayudaron a aclarar ideas para la reacción de esta investigación.

Un agradecimiento especial al Dr. Agustín Gómez Álvarez, de la Universidad de Sonora, por su accesibilidad al equipo de absorción atómica. Al Dr. Francisco Romero y a su equipo de trabajo por ayudarme con el acceso al Laboratorio de Geoquímica Ambiental en Ciudad Universitaria para realizar mis análisis de granulometría y fluorescencia de rayos X. Agradezco a la Dra. Teresa Pi por su ayuda invaluable en la realización e interpretación de datos de difracción de rayos X en el Laboratorio de Difracción de Rayos X en Ciudad Universitaria.

Un cordial agradecimiento a las secretarías Mónica Tellechea, Gloria Alba y María Luisa Reyes por su apoyo en los trámites administrativos durante mi estancia en el posgrado. A mis compañeros y amigos estudiantes en la ERNO: Karla, Yessi, Felipe, Javier, Arturo, Martha, David, Verónica. A mis amigos y compañeros de campo en Los Reyes Metzontla: Isela, Daniel, Jesus, Wasa, Rubén, Roger, Urenia, etc. Gracias a todos por su amistad.

Le agradezco a mi familia por su apoyo incondicional y su comprensión desde que tome la decisión de estudiar un posgrado, gracias por todo.

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Localización del área de estudio.....	2
1.2.1 Clima.....	4
1.2.2 Geomorfología y orografía.....	5
1.3 Marco geológico del noroeste de Sonora.....	6
1.3.1 Marco geológico local.....	7
1.3.2 Mina Pilares.....	9
1.3.3 Historia productiva de la mina Pilares.....	10
1.3.4 Mina La Caridad.....	11
1.4 Antecedentes.....	12
1.4.1 Sales eflorescentes.....	13
1.4.2 Jales mineros en México.....	17
1.4.3 Pasivos mineros de Nacozari.....	20
1.5 Justificación.....	22
1.6 Objetivos.....	22
1.7 Metas.....	23
1.8 Hipótesis.....	23
2. Marco teórico.....	25
2.1 Jales mineros.....	25
2.1.1 Características de jales mineros.....	27
2.1.2 Presas de jales.....	30
2.1.3 Intemperismo en jales mineros.....	32
2.1.4 Reacciones de producción de ácido.....	33
2.1.5 Reacciones reguladoras de ácido (neutralización).....	37
2.1.5.1 Silicatos.....	38
2.1.5.2 Carbonatos.....	40
2.1.5.3 Arcillas.....	41
2.1.5.4 Tasas de reacción.....	42
2.1.6 Drenaje ácido de mina.....	44

2.1.6.1 Ocurrencia.....	44
2.1.6.2 Fuente	45
2.1.6.3 Caracterización y clasificación.....	46
2.2 Sales eflorescentes.....	48
2.2.1 Mineralogía secundaria pre-minera y post-minera	52
2.2.2 Solubilidad de sales eflorescentes.....	56
2.2.3 Consumo y producción de ácido de mina.....	57
2.2.4 Temporalidad de sales eflorescentes.....	59
2.2.5 Recubrimientos de sales eflorescentes	60
2.2.6 Modelos teóricos para el enriquecimiento superficial de sales eflorescentes en base a su dependencia climática	62
3. Metodología y resultados	65
3.1 Descripción del área de estudio.....	65
3.1.1 Características de los jales mineros de Nacozari de García	65
3.1.2 Características de las sales eflorescentes.....	66
3.1.3 Muestreo	67
3.2 Parámetros fisicoquímicos.....	69
3.2.1 Metodología	69
3.2.2 Resultados	69
3.3 Granulometría	73
3.3.1 Metodología	73
3.3.2 Resultados	74
3.4 Difracción de Rayos X.....	84
3.4.1 Metodología	84
3.4.2 Resultados	85
3.5 Fluorescencia de Rayos X.....	98
3.5.1 Metodología	98
3.5.2 Resultados	99
3.5.2.1 Muestreo de noviembre de 2014.....	102
3.5.2.2 Muestreo de marzo de 2015.....	109
3.6 Microscopio de Barrido Electrónico (SEM-EDS).....	118
3.6.1 Metodología	118

3.6.2 Resultados	118
3.7 Absorción Atómica (AA).....	120
3.7.1 Metodología	120
3.7.2 Resultados	121
4. Discusión	123
4.1 Jales mineros de Nacozari de García (Presa de jales I).....	123
4.1.1 Concentración y movilidad elemental.....	123
4.1.1.1 Columna JI.....	123
4.1.1.2 Columna SI.....	125
4.1.2 Aspectos texturales de los jales de Nacozari y su relación geoquímica.....	126
4.1.3 Mineralogía de los jales.....	127
4.2 Sales eflorescentes.....	128
4.2.1 Concentración elemental.....	128
4.2.2 Mineralogía de sales eflorescentes.....	128
4.2.3 Ocurrencia de sales eflorescentes en horizontes alternados.....	130
4.2.4 Implicaciones climáticas en la temporalidad de las sales eflorescentes	132
4.2.5 Modelo de paragénesis de formación y transformación de sales eflorescentes.....	133
4.2.6 Implicación ambiental de las sales eflorescentes	136
4.2.7 Evaluación económica de los jales de Nacozari.....	138
4.3 Recomendaciones.....	139
5. Conclusiones.....	141
Bibliografía.....	143
Anexos	151

Lista de Figuras

Figura 1.1 Localización del poblado de Nacozari de García, Sonora.....	3
Figura 1.2 Provincias fisiográficas de México, mostrando la localización del poblado de Nacozari de García en la provincia de la Sierra Madre Occidental (INEGI, 2015).....	3
Figura 1.3 Mapa de climas para la república mexicana, en el cual se indica la posición del poblado de Nacozari de García, con un clima semiseco templado y semiseco-semicálido (INEGI, 2015).....	4
Figura 1.4 Precipitación media anual y temperatura media anual en Nacozari de García. Datos en base a la estación meteorológica 00026059 NACUZARI (SMN) con coordenadas 30°22'28" N, 109°41'15" W y una altura de 1,100 m.s.n.m. (CONAGUA, 2015).....	5

Figura 1.5 Mapa geológico simplificado del área de las minas Pilares y La Caridad (tomado de Valencia et. al., 2008).....	8
Figura 1.6 Sección esquemática de la brecha Pilares en Sonora, México. Se muestra los cuerpos mineralizados y los márgenes en contacto con las rocas encajonantes. Tomado de Sillitoe (1985).....	9
Figura 1.7 Túnel en la mina Pilares. Después de 1904 el material extraído del yacimiento era trasladado a Douglas, Arizona, donde terminaba de procesarse.	10
Figura 1.8 Mapa geológico generalizado del depósito de pórfido cuprífero de La Caridad, donde se muestra la periferia del enriquecimiento de calcosita. Tomado de Seagart et. al., 1974.	12
Figura 2.1 Diagrama de flujo simplificado para las operaciones de procesamiento mineral donde el producto final es un concentrado mineral y jales mineros (Tomado de Ripley, 1996).	25
Figura 2.2 Representación de los pasos del procesamiento mineral que se lleva a cabo en la extracción de minerales de mena en una mina (tomado de Dold, 2010).....	26
Figura 2.3 Principales rutas que emplea el agua de jales, caso jale Excelsior en Perú, tomado de Smuda et. al., 2007.....	28
Figura 2.4 Curvas esquemáticas de distribución de partículas para jales mineros, tomado de Lottermoser, 2010.....	30
Figura 2.5 Sección esquemática de una presa de jales, tomado y modificado de Lottermoser, 2010.	31
Figura 2.6 Deposición preferencial de las partículas encontradas en las presas de jales, los sedimentos gruesos se depositan cerca de la fuente de descarga, mientras que los sedimentos finos en las zonas más exteriores. Tomado y modificado de Lottermoser, 2010.....	32
Figura 2.7 Diagrama simplificado de las rutas de oxidación para la pirita.....	34
Figura 2.8 Diagrama de Eh-pH para el sistema Fe-S-K-O-H a 25°C, donde gt= goethita, jt= jarosita, sh= schwertmannita, fh= ferrihidrita y py= pirita. Tomado de Bigham et. al., 1996.	36
Figura 2.9 Capacidad de neutralización de algunos minerales de ganga en un jal minero hipotético. Tomado de Salomons (1995).....	38
Figura 2.10 Campos de estabilidad de los minerales gibsita, muscovita, caolinita y feldespato debido al intemperismo químico.....	40
Figura 2.11 Distribución de las especies solubles en un sistema acuoso de carbonato contra pH, para una concentración de 0.1 M.....	41
Figura 2.12 Modelo conceptual de la oxidación de sulfuros y el desarrollo de DAM en jales mineros (Tomado de Lottermoser, 2010).	46
Figura 2.13 Diagrama de clasificación geoquímica de aguas de mina basado en la suma de metales disueltos (Zn, Cu, Cd, Pb, Co, Ni) y pH. Tomado de Ficklin et. al., 1992.	47
Figura 2.14 Esquema del proceso de eflorescencia, a) en periodos de lluvia la precipitación aporta agua al medio y se percola hasta llegar a donde se encuentran las sales o sulfatos disueltos, b) el agua ya infiltrada retiene los minerales secundarios en solución, c) la evaporación promueve la migración de las sales en solución por la vía capilar hasta llegar a la superficie y cristalizar en forma de eflorescencias.....	49
Figura 2.15 a) Eflorescencias presentes en construcciones por el alto contenido de sulfatos alcalinos y potásicos, b) acumulación de evaporitas en la cuenca endorreica de Soda Lake en California EUA, c) sales eflorescentes superficiales en la Presa de Jales I en Nacozari de García, Sonora, México.	50
Figura 2.16 Variación temporal de pH y conductividad eléctrica de las aguas de un río asociado con la disolución de sales eflorescentes durante un evento de tormenta. Tomado de Seal & Hammarstrom, 2003.....	60
Figura 2.17 Concentraciones de Fe, Zn, Cu y Mn en Contrary Creek durante un evento de tormenta en septiembre de 1978. Tomado de Nordstorm, 2009.	61

Figura 2.18 Sales eflorescentes en los jales mineros de Nacozari de García. El recubrimiento de estos sulfatos es de manera horizontal y lateral en la zona de evaporación, el color blanco y verde de las mismas se debe a la presencia de minerales ricos en cobre y magnesio.....	62
Figura 2.19 Modelos esquemáticos para la movilización de elementos en jales mineros en condiciones con dominio en precipitación (A) y con dominio en evaporación (B). Tomado de Dold y Fondbote, 2001.....	63
Figura 3.1 Ubicación de la Presa de Jales I de Nacozari de García, Sonora México.	65
Figura 3.2 Zonas determinadas en la Presa de Jales I. La zona de evaporación y la zona de oxidación.	66
Figura 3.3 Capas de sales eflorescentes alternadas con capas sin sales eflorescentes. Las capas con sales eflorescentes no son penetrativas solo son superficiales.....	67
Figura 3.4 Columna SI que corresponde a una porción a detalle de la columna JI. El espesor muestreado de esta columna fue de 1 m.	68
Figura 3.5 Columna JI en los jales mineros de Nacozari de García, Sonora. El espesor muestreado de esta columna fue de 17 m.....	68
Figura 3.6 Gráfica de pH y conductividad eléctrica de la columna SI del muestreo de marzo de 2015.....	72
Figura 3.7 Gráfica de pH y conductividad eléctrica de la columna JI del muestreo de marzo de 2015.	72
Figura 3.8 Gráfica de pH y conductividad eléctrica de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014.....	72
Figura 3.9 Gráfica de pH y conductividad eléctrica de la columna JI del muestreo de noviembre de 2014.	72
Figura 3.10 Rotap marca H&P Equipment modelo RX-86 utilizado para la agitación y separación por fracciones del material.....	74
Figura 3.11 Tina ultrasónica marca Cole-Parmer modelo 8894, es utilizada para retirar las partículas retenidas en las mallas para tamizar.	74
Figura 3.12 Báscula de precisión utilizada para la medición del peso de las muestras a tamizar. Se calcula el peso inicial y el peso por cada fracción obtenida.....	74
Figura 3.13 Horno marca Hafo Series 1600, las muestras se secaron a temperatura ambiente de 35° C.	74
Figura 3.14 Columna granulométrica esquemática de la sección JI para el muestreo de noviembre de 2014... ..	80
Figura 3.15 Columna granulométrica esquemática de la sección SI para el muestreo de noviembre de 2014.. ..	81
Figura 3.16 Columna granulométrica esquemática de la sección JI para el muestreo de marzo de 2015.	82
Figura 3.17 Columna granulométrica esquemática de la sección SI para el muestreo de marzo de 2015.....	83
Figura 3.18 Difractómetro PANalytical Empyrean con un monocromador de CuK α ($\lambda=1.54056 \text{ \AA}$) utilizado para este estudio.....	84
Figura 3.19 Porta muestras especial para el equipo de difracción. El polvo obtenido de la molturación es vertido en los porta muestras y se va aplanando hasta obtener su forma circular.	85
Figura 3.20 Grupo 1 de difracción de rayos X. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo, Jt= jarosita.	88
Figura 3.21 Muestra JIS-11m-A-300315 representativa del grupo de difracción 1. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo.....	89
Figura 3.22 Grupo 2 de difracción de rayos X. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Fh= ferrihidrita, Jt= jarosita, Alp= alpersita, Qz= cuarzo, Roz= rozenita.....	89
Figura 3.23 Grupo 3 de difracción de rayos X. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Jt= jarosita, Alp= alpersita, Qz= cuarzo, Roz= rozenita.....	90
Figura 3.24 Muestra S-9II-A-300315 representativa del grupo 2 de DRX. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Fh= ferrihidrita, Jt= jarosita, Alp= alpersita, Qz= cuarzo, Roz= rozenita.	90
Figura 3.25 Grupo 4 de difracción de rayos X. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Qz= cuarzo.....	91

Figura 3.26 Muestra JIS-11m-B-300315 representativa del grupo 3 de DRX. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Jt= jarosita, Alp= alpersita, Qz= cuarzo, Roz= rozenita.	91
Figura 3.27 Muestra S-11I-291114 representativa del grupo 4 de DRX. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Qz= cuarzo.	92
Figura 3.28 Muestra JI-0m-291114 que forma parte de la zona basal de la sección JI. Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo, Jt= jarosita, Jk= jokokuita.	93
Figura 3.29 Muestra JI-10m-291114 que forma parte de la zona basal de la sección JI. Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo, Jt= jarosita, Jk= jokokuita.	93
Figura 3.30 Muestra JI-5m-291114 que forma parte de la zona basal de la sección JI. Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo, Jt= jarosita, Jk= jokokuita.	93
Figura 3.31 Columna de difracción de rayos X para la sección JI, se representa la columna esquemática a los costados con un límite marcado a la altura de 10 m que divide la parte basal de arenas medias y la parte superior de arenas muy finas a limos gruesos.	95
Figura 3.32 Columna de difracción de rayos X para la sección SI, se representa la columna esquemática a los costados, los tonos grises claros representan jales sin sales eflorescentes y los tonos más oscuros con rectángulos verdes representan horizontes con sales eflorescentes.	97
Figura 3.33 Muestras para FRX subdivididas por fracciones obtenidas en el análisis granulométrico.	98
Figura 3.34 Equipo de FRX portátil marca Thermo Scientific modelo Niton FXL 950 FM-XRF Analyzer. La muestra es montada en el analizador para ser irradiada por rayos X.	99
Figura 3.35 Elementos confiables para el estándar CCPRP TILL-4PP del muestreo de marzo de 2015. Se grafican solo los elementos que se encuentran en el rango de %D de ± 20 %.	100
Figura 3.36 Elementos confiables para el estándar Montana Soil 2710a del muestreo de marzo de 2015. Se grafican solo los elementos que se encuentran en el rango de %D de ± 20 %.	99
Figura 3.37 Elementos confiables para el estándar Montana Soil 2710a del muestreo de noviembre de 2014. Se grafican solo los elementos que se encuentran en el rango de %D de ± 20 %.	99
Figura 3.38 Elementos confiables para el estándar CRM-SA-C (Sandy Soil) del muestreo de marzo de 2015. Se grafican solo los elementos que se encuentran en el rango de %D de ± 20 %.	99
Figura 3.39 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica, Cu= cobre, As= arsénico, Ca= calcio, Fe= hierro, K= potasio.	102
Figura 3.40 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. Mn= manganeso, Pb= plomo, Zn= zinc, Rb= rubidio, Sr= estroncio, Ti= titanio.	103
Figura 3.41 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. U= uranio, V= vanadio, W= tungsteno, Zr= zirconio, Mo= molibdeno.	104
Figura 3.42 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. Cu= cobre, As= arsénico, Ca= calcio, Fe= hierro, K= potasio.	105
Figura 3.43 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. Mn= manganeso, Pb= plomo, Zn= zinc, Rb= rubidio, Sr= estroncio, Ti= titanio.	106

Figura 3.44 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. U= uranio, V= vanadio, W= tungsteno, Zr= zirconio, Mo= molibdeno, S= azufre.	107
Figura 3.45 Concentración elemental de sales eflorescentes de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014.	108
Figura 3.46 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, Cu= cobre, As= arsénico, Ca= calcio, Fe= hierro, K= potasio, Mn= manganeso.	109
Figura 3.47 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica. Pb= plomo, Zn= zinc, Rb= rubidio, Sr= estroncio, Ti= titanio, U= Uranio.	110
Figura 3.48 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica. V= vanadio, Zr= zirconio, Mo= molibdeno, Ag= plata, Nb= niobio, Th= torio.	111
Figura 3.49 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica. V= vanadio, Zr= zirconio, Mo= molibdeno, Ag= plata, Nb= niobio, Th= torio.	112
Figura 3.50 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, Cu= cobre, As= arsénico, Ca= calcio, Fe= hierro, K= potasio, Mn= manganeso.	113
Figura 3.51 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, Pb= plomo, Zn= zinc, Rb= rubidio, Sr= estroncio, Ti= titanio, U= uranio.	114
Figura 3.52 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, V= vanadio, Zr= zirconio, Mo= molibdeno, Ag= plata, Nb= niobio, Th= torio.	115
Figura 3.53 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, Bi= bismuto, Cd= cadmio, Ni= níquel, Sn= estaño, Te= telurio.	116
Figura 3.54 Concentración elemental de sales eflorescentes de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014.	117
Figura 3.55 Microscopio de barrido electrónico marca Hitachi TM 3030 Plus.	118
Figura 3.56 Cara de un cristal de calcantita. Las estrías presentes en este mineral se deben posiblemente a procesos de deshidratación.	119
Figura 3.57 Cristales de yeso acompañados con pequeños cristales de sulfatos de cobre. El análisis elemental muestra picos en Cu, Fe, Ca, K, S, Si, Al y Mg.	119
Figura 3.58 Cristal de calcantita a escala de 1 mm.	119
Figura 3.59 Cristal de calcantita con cristales de yeso amalgamados.	119
Figura 3.60 Espectrofotómetro de Absorción Atómica Analyst 400 de la marca Perkin Elmer utilizado para este estudio.	120
Figura 3.61 Gráfica de Cu mg/L vs. Profundidad de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014 con datos de cobre soluble por absorción atómica.	122
Figura 3.62 Gráfica de Cu mg/L vs. Profundidad de la columna JI del muestreo de noviembre de 2014 con datos de cobre soluble por absorción atómica.	122

Figura 4.1 Grupos elementales concentrados en diferentes partes de la columna JI (zona de oxidación y zona de evaporación). Grupo 1: Cu, Pb, Zn, U, Mn. Grupo 2: As, Fe, Mo, Ag, Sr, V. Grupo 3: Ca, K, Rb, Sr, Ti, V, W, Zr, Nb, Th, Bi, Cd, Se, Te.	123
Figura 4.2 Diagrama esquemático propuesto para la explicación de la ocurrencia de sales eflorescentes en forma de horizontes.	131
Figura 4.3 Modelo de paragénesis propuesto para la formación de sales eflorescentes en jales mineros de cobre en zonas áridas-semiáridas propuesto para este estudio.	134
Figura 4.4 Ubicación de la Presa de Jales I. El contorno color rojo representa la zona de evaporación donde existe una mayor concentración de sulfatos de cobre.	138

Lista de Tablas

Tabla 1 Ejemplos comunes de reactivos de flotación, modificadores, floculantes, coagulantes, reactivos hidrometalúrgicos y oxidantes (Lottermoser, 2010).	28
Tabla 2. Ejemplos de reacciones productoras de ácido de algunas especies minerales en jales mineros, (Lottermoser, 2010).	36
Tabla 3 Vida promedio de algunas especies minerales a 25°C y pH 5. Tomado y modificado de Lottermoser (2010).	43
Tabla 4 Agrupamiento de minerales en base a su reactividad relativa a un pH 5. Tomado de Dold, 2010.	43
Tabla 5 Clasificación de aguas de minas basado en el pH (Tomado de Lottermoser, 2010).	48
Tabla 6 Ejemplos de minerales secundarios pre- y post-mineros (tomado de Alpers et. al., 1994).	52
Tabla 7 Resultado de pH y conductividad eléctrica para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014. ...	70
Tabla 8 Resultados de pH y conductividad eléctrica para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014..	70
Tabla 9 Resultados de pH y conductividad eléctrica para la columna JI del muestreo de marzo de 2015.	70
Tabla 10 Resultados de pH y conductividad eléctrica para la columna SI del muestreo de marzo de 2015.	71
Tabla 11 Relación de tamices utilizados en este estudio. Tomado de USGS (http://pubs.usgs.gov/of/2000/of00-304/html/docs/chap04/).	73
Tabla 12 Datos texturales para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014.	76
Tabla 13 Datos texturales para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014.	77
Tabla 14 Datos texturales para la columna JI del muestreo de marzo de 2015.	78
Tabla 15 Datos texturales para la columna SI del muestreo de marzo de 2015.	79
Tabla 16 Minerales identificados por difracción de rayos X (DRX). (Información tomada de http://www.mindat.org/ y http://webmineral.com/)	86
Tabla 17 Agrupamiento de muestras en cuatro grupos, se presentan los minerales seguros, posibles y probables.	87
Tabla 18 Variabilidad mineralógica de la columna JI con respecto a la altura. X= mineral presente, Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Jt= jarosita, Jk= jokokuita, Qz= cuarzo, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Roz= rozenita, Ch= calcantita, Pc= pentahidrita cúprica, Alp= alpersita, Fh= ferrihidrita.	96
Tabla 19 Variabilidad mineralógica de la columna JI con respecto a la altura. X= mineral presente, Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Jt= jarosita, Qz= cuarzo, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Ch= calcantita, Pc= pentahidrita cúprica, Fh= ferrihidrita.	96
Tabla 20 Datos de absorción atómica de Cu en mg/L de la columna J-I del muestreo de noviembre de 2014. La absorción corregida es el producto de la multiplicación de la dilución y la absorción medida.	121

Tabla 21 Datos de absorción atómica de Cu en mg/L de la columna S-I del muestreo de noviembre de 2014. La absorción corregida es el producto de la multiplicación de la dilución y la absorción medida.	121
Tabla 22 Datos de absorción atómica de Cu en mg/L de la columna S-II del muestreo de noviembre de 2014. La absorción corregida es el producto de la multiplicación de la dilución y la absorción medida.	122
Tabla 23 Concentración de referencia total (CR _T) por tipo de uso de suelo. NOM-147 SEMARNAT SSA1 2004.	136
Tabla 24 Concentración elemental mínima, máxima y promedio en la columna de jales JI.....	137
Tabla 25 Concentración elemental mínima, máxima y promedio en sales eflorescentes.	137
Tabla 26. Valores de certificado para el estándar Montana Soil 2710a.....	151
Tabla 27. Valores de certificado para el estándar CCPRP TILL-4PP.....	152
Tabla 28. Valores de certificado para el estándar CRM-SA-C Sandy Soil.	153

Capítulo 1

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

México, desde hace aproximadamente cuatro siglos ha sustentado gran parte de su economía a través de la actividad minera. Tal hecho ha propiciado la explotación de diversos yacimientos minerales en toda la república mexicana. En base a datos revelados por la Cámara Minera de México (2014), México produce anualmente cerca del 3.61% de Au, el 20.77% de Ag, el 2.68% de Cu y el 4.44% de Zn requerido a nivel mundial. Hablando específicamente del cobre, el noreste de Sonora contribuye con cerca del 79% de la producción de este metal en el país (INEGI, 2014), siendo el municipio de Nacozari de García el segundo distrito en importancia.

Los yacimientos metálicos de mayor importancia en el distrito de Nacozari de García son La Caridad, la mina Pilares, Los Alisos, Florida-Barrigón, Bella Esperanza y El Batamote. El yacimiento de La Caridad es el único que se encuentra activo actualmente, y consiste en mineralización de Cu-Mo asociados a sistemas hidrotermales de tipo pórfido de cobre. La mina Pilares fue explotada por la compañía norteamericana *Moctezuma Copper Company* por cerca de cincuenta años, produciendo unas 3,000 toneladas de metal por día, acumulando cerca de 40 millones de toneladas de mineral de cobre durante su operación entre 1895 y 1949 (Alvarado y Volke, 2004). Dicha explotación generó una gran cantidad de residuos, que fueron depositados en tres presas de jales alrededor del pueblo de Nacozari de García, los cuales suman un total de aproximadamente 20 millones de toneladas.

La peligrosidad de los jales derivados de la actividad de minas de cobre está en dependencia de la composición mineralógica, la concentración de elementos potencialmente tóxicos y los factores climáticos. En climas húmedos y templados, el principal riesgo de los jales mineros es la generación de drenaje ácido de mina (DAM), que ocurre cuando los sulfuros metálicos son expuestos a la acción del agua y la atmósfera. Esto provoca la oxidación de los minerales, los cuales generan a su vez soluciones caracterizadas por bajos valores de pH y alto

contenido en elementos tóxicos, particularmente Cu, Pb, Zn, As y Hg (Meza-Figueroa *et al.*, 2009; De la O-Villanueva *et al.*, 2013; Romero *et al.*, 2008). Por otra parte, en climas áridos-semiáridos, donde la evaporación supera a la precipitación, la movilización de elementos potencialmente tóxicos (EPT) es controlada por procesos de capilaridad (Dold y Fontboté, 2001), promoviendo la formación de *sales eflorescentes* con altos contenidos de metales pesados.

Estas sales eflorescentes son el resultado del DAM en sistemas áridos debido a la alta tasa de evaporación y representan un riesgo potencial para el ambiente y las comunidades que están expuestas a ellas. Meza-Figueroa *et al.* (2009) demostraron que el contenido de metales en sales eflorescentes que se forman en los jales es significativo. Por ejemplo, la concentración promedio de Cu en la mayoría de los jales es de 400 mg kg⁻¹, mientras que en las sales eflorescentes se incrementa 170 veces ese valor, es decir, 69,000 mg kg⁻¹. Por su baja cristalinidad y textura fina, estas sales son extremadamente susceptibles a la erosión eólica lo cual permite, por su capacidad de sorción, una dispersión aérea importante de EPT.

La escasa información regional sobre el fenómeno de sales eflorescentes en jales mineros, conlleva a la necesidad de elaborar un trabajo de investigación que permita entender su origen y comportamiento con respecto al clima a través de la caracterización geoquímica y mineralógica de estas sales. El presente trabajo se enfocó a la presa de jales I, que se encuentra en el costado sur del pueblo de Nacozari de García, los cuales representan condiciones de clima semiseco templado a semiseco-semicálido, producto de la explotación de yacimientos de tipo pórfido de cobre, por lo cual los factores involucrados en el proceso de formación de las sales eflorescentes estarán bajo este contexto.

1.2 Localización del área de estudio

El municipio de Nacozari de García se encuentra ubicado al noroeste de la república mexicana en el noreste del estado de Sonora, en las coordenadas 30°22'31.23" latitud norte y 109°41'15.14" longitud oeste, con una altitud de 1,110 msnm (Figura 1.1). Nacozari de García se encuentra en la carta topográfica H12B74 escala 1: 50,000 del INEGI, con un área de 3 km²;

colinda al norte con los poblados de Agua Prieta y Fronteras, al sur con Cumpas y al sureste con Villa Hidalgo, al este con Bavispe y Bacerac y al oeste con Arizpe y Bacoachi. De acuerdo con Raisz (1959), el poblado de Nacozari de García se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental inmediatamente al sur de la provincia de Sierras y Llanuras del Norte (Figura 1.2).

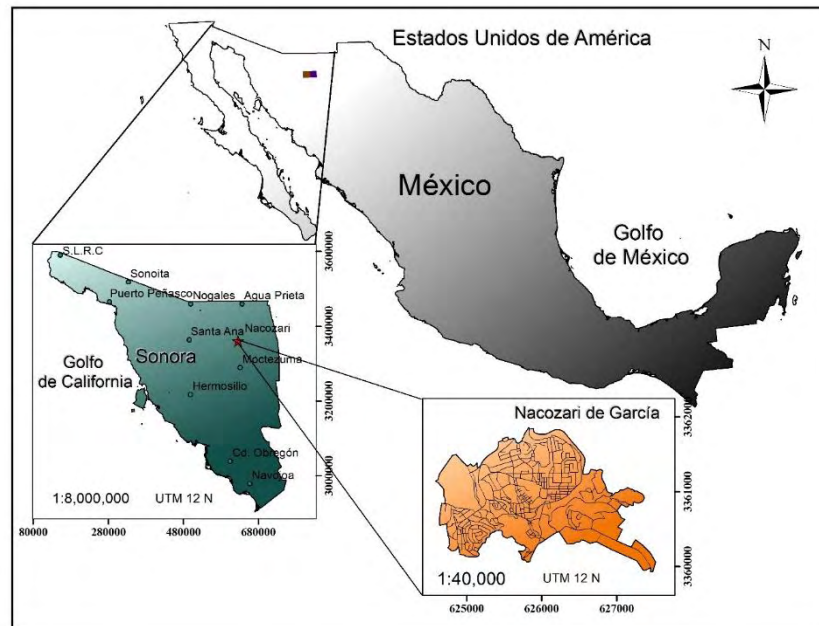


Figura 1.1 Localización del poblado de Nacozari de García, Sonora.



Figura 1.2 Provincias fisiográficas de México, mostrando la localización del poblado de Nacozari de García en la provincia de la Sierra Madre Occidental (INEGI, 2015).

1.2.1 Clima

El clima de Nacozari de García es de semiseco templado a semiseco- semicálido (Figura 1.3). En base a la estación meteorológica 00026059 NACUZARI del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), con coordenadas 30°22'28" N y 109°41'15" W y una altitud de 1,100 msnm, se tiene un registro de temperatura y precipitación en el periodo de 1984 a 2010 (CONAGUA, 2015). La temperatura máxima mensual promedio de 37.2°C a 34.6°C en los meses de junio y julio, con un registro máximo de 39.8°C ocurrido en el 2008. La temperatura mínima mensual promedio es de 4.9°C a 5.7°C para los meses de febrero y enero, la temperatura media anual es de 20.2°C (Figura 1.4).

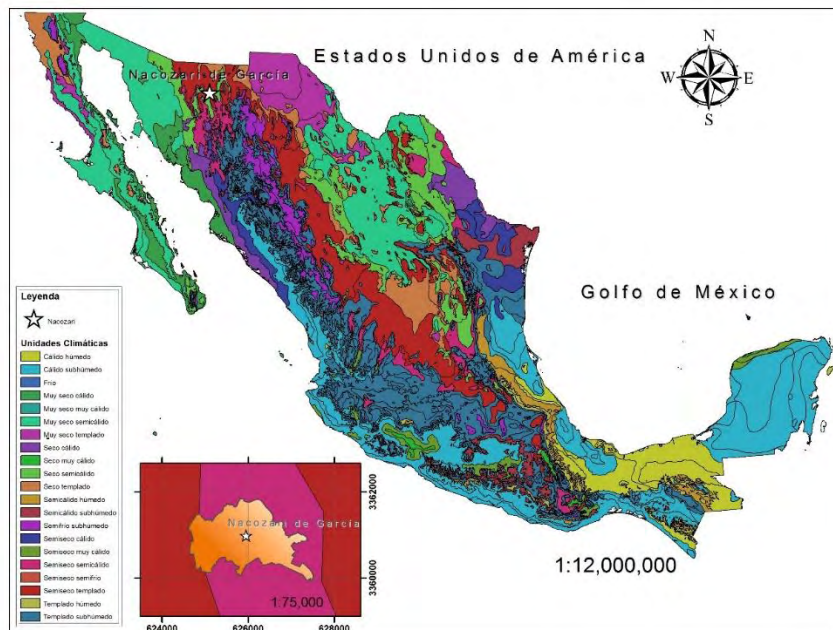


Figura 1.3 Mapa de climas para la república mexicana, en el cual se indica la posición del poblado de Nacozari de García, con un clima semiseco templado y semiseco-semicálido (INEGI, 2015).

La precipitación máxima mensual es de 278.2 mm y de 271 mm para los meses de julio y agosto para los años 1996 y 2008 respectivamente, con una precipitación media anual de 578.8 mm.

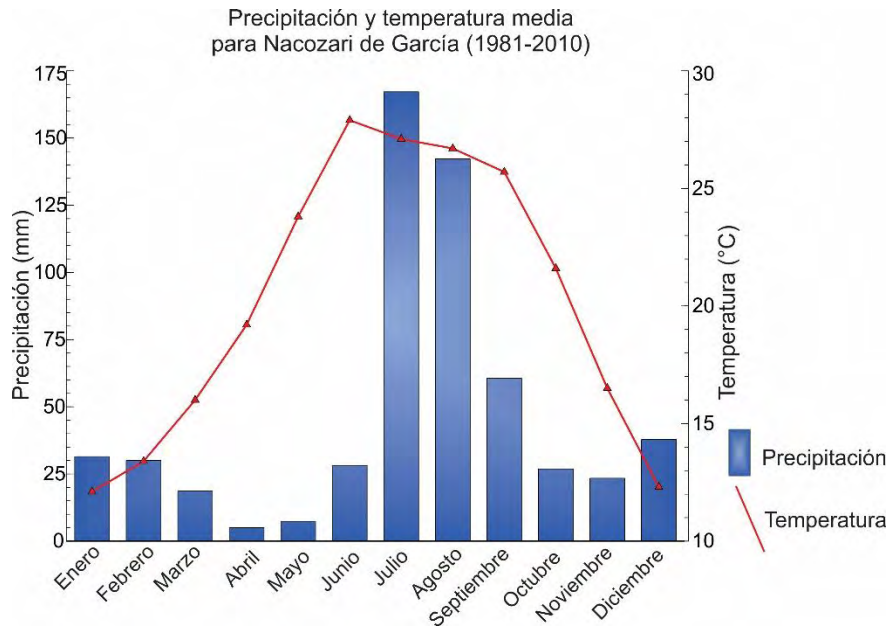


Figura 1.4 Precipitación media anual y temperatura media anual en Nacozari de García. Datos en base a la estación meteorológica 00026059 NACUZARI (SMN) con coordenadas 30°22'28" N, 109°41'15" W y una altura de 1,100 msnm (CONAGUA, 2015).

1.2.2 Geomorfología y orografía

El área de Nacozari está representada por una geomorfología compleja compuesta de rocas sedimentarias, volcano-sedimentarias, volcánicas, intrusivas y metamórficas. En la porción occidental muestra conjuntos de montañas originadas por movimientos tectónicos que generaron fallamiento importante, las cuales están separadas por valles que han sido parcialmente rellenados por materiales clásticos derivados de la erosión de las mismas montañas.

La orografía se compone por sierras alargadas y amplios valles con dirección noroeste-sureste generadas durante el evento de fallamiento en bloque reconocido como *Basin and Range*, ocurrido durante el Mioceno en la mayor parte del suroeste de Norte América. De todos estos bloques, la Sierra La Púrica resalta como la de mayor elevación con 1,720 msnm, aunque existen otras sierras importantes incluyendo la sierra San Diego y la sierra Buenos Aires en los límites con Bacoachi.

1.3 Marco geológico del noroeste de Sonora

El distrito minero de Nacozari de García se encuentra comprendido en el terreno tectónico de Norte América (Campa y Coney, 1983), el cual éste se caracteriza por un basamento complejo de rocas proterozoicas caracterizadas por el Esquisto Pinal (1.68 Ga), las cuales fueron intrusionadas por granitos anorogénicos de 1.41-1.48 Ga (Anderson y Silver, 1981; Anderson y Bender, 1989). Este basamento proterozoico está sobreyacido por rocas sedimentarias del Neoproterozoico y el Paleozoico, las cuales representan la extensión de la plataforma continental (Rangin, 1978; Stewart, 1988). Estas rocas están sobreyacidas por secuencias de rocas volcánicas jurásicas e intrusionadas por plutones contemporáneos que forman parte de un arco magmático continental (Anderson y Silver, 1978; Tosdal *et al.*, 1989).

Para el Jurásico Tardío, el arco magmático continental migró en dirección oeste (Coney y Reynolds, 1977; Damon *et al.*, 1983) y posteriormente el área fue afectada por un prominente levantamiento cortical y erosión, lo que dio como resultado el depósito del Conglomerado Glance (Hayes y Drewes, 1978).

Discordantemente por encima del Conglomerado Glance se encuentran secuencias sedimentarias de ambiente marino marginal y fluvial-deltaico del Cretácico Temprano las cuales corresponden al Grupo Bisbee (Bilodeau, 1978; González-León, 1988). Rascón-Heimpel *et al.* (2012) sintetiza las ideas de varios autores y menciona que en el Cretácico Tardío-Eoceno en la porción noroccidental de México se desarrolló una actividad compresiva en donde existió una predominancia en depósitos volcánicos, con intercalaciones locales de rocas sedimentarias de ambientes lacustres, lo cual ocurrió de manera contemporánea al emplazamiento de los grandes intrusivos asociados a la Orogenia Larámide (80-40 Ma; Coney y Reynolds, 1977), que afectó gran parte de la Cordillera oeste de Norte América.

El Eoceno medio y tardío fue un tiempo de quietud magmática, pero la actividad ígnea resurgió en el Oligoceno con la extrusión explosiva de un gran volumen de ignimbritas que formaron la Sierra Madre Occidental (McDowell & Clabaugh, 1979). Para el Mioceno, la dorsal del Pacífico se acercó a la paleotrinchera cambiando el régimen tectónico de un margen

convergente por uno transformante (Atwater, 1970; Lonsdale, 1991; Stock y Lee, 1994; Atwater y Stock, 1998), lo cual dio lugar a un régimen extensional (Rehrig, 1986; Nourse *et al.*, 1994; Parsons, 1995).

En la porción norte-central de Sonora, la extensión llegó a condiciones extremas provocando que rocas de la corteza media fueran exhumadas rápidamente dando lugar a los denominados *complejos con núcleo metamórfico*. Esta deformación extensiva continuó durante gran parte del Cenozoico con el desarrollo del sistema de fallas en bloque a lo largo de la porción sur de la provincia *Basin and Range* (Ráscon-Heimpel *et. al.*, 2012).

1.3.1 Marco geológico local

El distrito minero de Nacozari se encuentra dentro de la provincia *Basin and Range*, donde sus estructuras definen un conjunto de sierras y valles paralelos orientadas hacia el noroeste de manera paralela al margen continental. La zona está dividida en tres bloques delimitados por dos grandes estructuras. Las minas Pilares y La Caridad se encuentran en el bloque central, flanqueadas al este y al oeste por bloques hundidos de tipo graben (Figura 1.5). La Falla Pilares es una falla normal que aflora al oeste de la mina Pilares, con una orientación NW-SE 40° y un buzamiento de 70° al SW. La Falla La Caridad está localizada al oriente de la mina La Caridad y tiene una orientación general de NW-SE 45° con buzamiento de 42° al NE. Este bloque está dominado por andesitas fechadas al oeste de La Caridad en ~63.5 Ma por U-

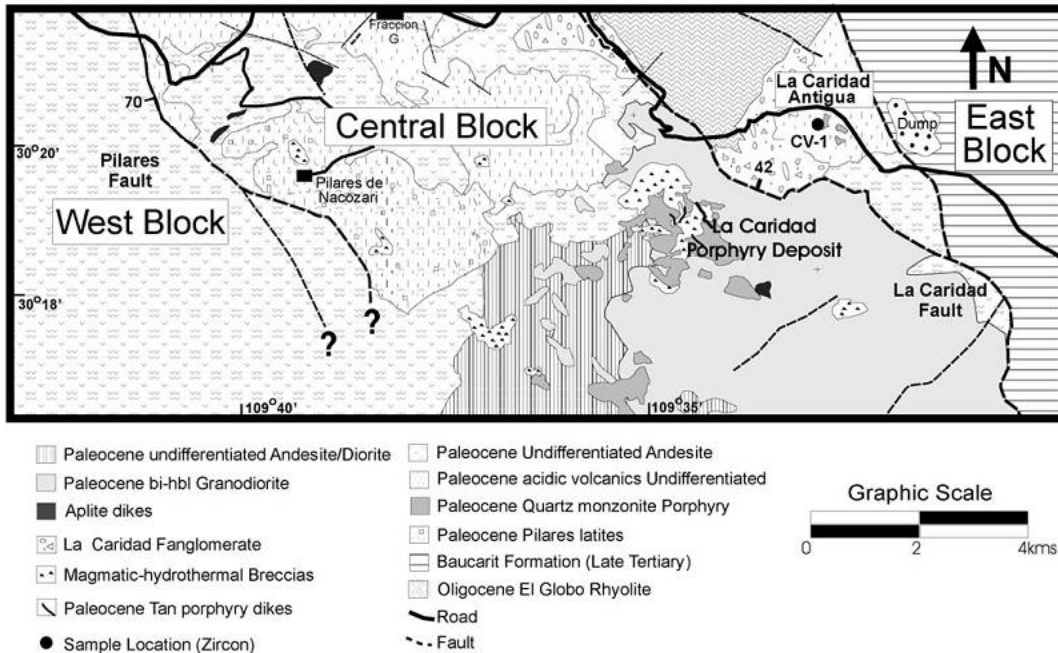


Figura 1.5 Mapa geológico simplificado del área de las minas Pilares y La Caridad (tomado de Valencia *et. al.*, 2008).

Pb en zircones, y está intrusionado por una diorita de biotita de grano fino a grueso con una edad U-Pb en zircones de 58.1 Ma (Valencia *et. al.*, 2005).

El bloque oeste contiene los prospectos de pórfido cuprífero El Batamote y Florida-Barrigón, ambos fechados por K-Ar en biotita en 56.8 ± 2.4 Ma y 52.4 ± 2.2 Ma, respectivamente (Damon *et. al.*, 1983). Este bloque está dominado por una secuencia de flujos dacíticos-andesíticos, brechas volcánicas y diques basálticos. El bloque este está conformado por rocas pre-minerales y post-minerales. Las rocas pre-minerales son andesitas e ignimbritas riolíticas con una edad de 51.3 ± 2 Ma (Livingston, 1973) las cuales están intrusionadas por un pórfido cuarzo-monzonítico, considerada la roca mineralizante (Valencia *et. al.*, 2008). En la región norte aflora una secuencia riolítica denominada riolita El Globo y cuya edad es de 24 Ma (Worcester, 1976). En el bloque este se encuentra un depósito epitermal de alta sulfuración reconocido como La Caridad Antigua el cual se encuentra localizado a aproximadamente 3 km al este de la mina La Caridad. La Caridad Antigua fue minada por oro en el periodo de 1907 a 1916, y está hospedada en latitas, riolitas y andesitas que fueron intrusionadas por una serie de *stocks* porfídicos de cuarzo-monzonita (Valencia *et. al.*, 2008).

1.3.2 Mina Pilares

La mina Pilares está situada en el antiguo pueblo de Pilares de Nacozeni, localizado a unos 11 km al este del pueblo de Nacozeni de García. Es un yacimiento de Cu-W emplazado en una brecha tubular denominada "brecha Pilares". La brecha se desarrolló en una secuencia volcánica de composición andesítica a latítica del Paleoceno Temprano, con una edad U-Pb en zircones de de ~64 Ma (Rascón-Heimpel, *et al.*, 2012), la cual corresponde a la parte superior de la Formación Tarahumara (Gómez-Landa, 2014).

La Figura 1.6 presenta una sección de la brecha Pilares donde estas rocas han sido erosionadas tanto que las rocas de la porción central están unos cien metros más abajo que las rocas que corresponden a la parte externa de la brecha. La parte central de la estructura está moderadamente fracturada, pero los márgenes se encuentran intensamente brechados; la envoltura de brecha es de aproximadamente 15 metros de espesor a lo largo de las paredes laterales y mucho más gruesa hacia los extremos. Los minerales de mena son principalmente pirita y calcopirita en una matriz con abundante especularita.

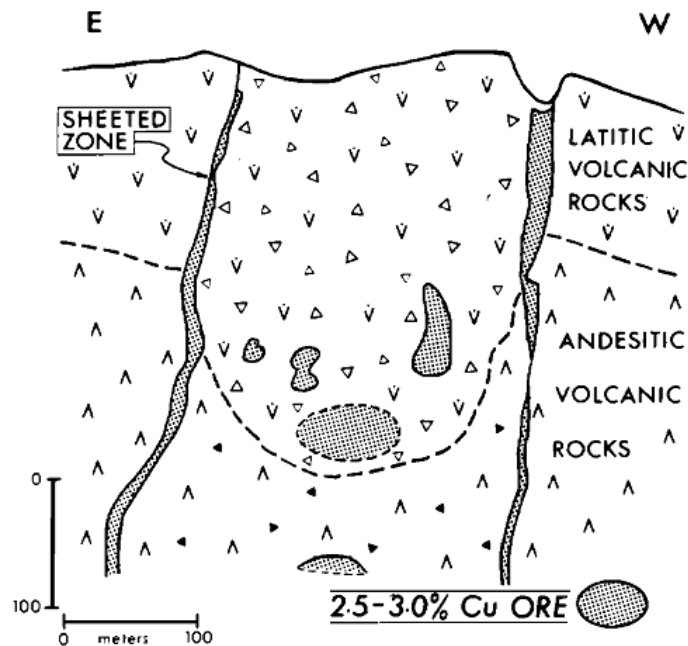


Figura 1.6 Sección esquemática de la brecha Pilares en Sonora, México. Se muestra los cuerpos mineralizados y los márgenes en contacto con las rocas encajonantes. Tomado de Sillitoe (1985).

1.3.3 Historia productiva de la mina Pilares

La mina Pilares se convirtió en un productor importante de cobre tras ser adquirida por la compañía Phelps Dodge de Guggenheim & Corporation en 1897. Para 1900 ya se encontraba en operación un molino de 400 toneladas y dos hornos de 150 toneladas. El yacimiento contenía una ley del 3% de Cu (Livingstone, 1912) y el método de *cut and fill stoping* fue el empleado principalmente a lo largo de la vida de la mina en el proceso de extracción (Figura 1.7). La producción de cobre para inicios de la mina es desconocida, pero se sabe que para 1901 se produjeron cerca de 8 millones de libras de cobre (Gardner *et. al.*, 1938).



Figura 1.7 Túnel en la mina Pilares. Después de 1904 el material extraído del yacimiento era trasladado a Douglas, Arizona, donde terminaba de procesarse.

En 1904, después de la construcción del ferrocarril de Nacozari a Douglas Arizona, la empresa Phelps Dodge había terminado su nueva fundidora y los hornos de Nacozari fueron abandonados; desde entonces todos los concentrados y fundiciones directas del yacimiento fueron tratados en Douglas, Arizona. En 1908 se completó la construcción de un molino de 1,500 toneladas, triplicando la capacidad de la mina y la producción anual incremento a 26 millones de libras de cobre. El molino fue progresivamente ampliado y en 1918 la producción incremento a un máximo de 42 millones de libras anuales. La flotación fue utilizada en cierto grado después de 1916 y fue la base para el diseño de un molino de 3,000 toneladas construido en 1920-1922.

Después de 1923, Pilares produjo entre 35 y 45 millones de libras de cobre anuales hasta su cierre en 1930. A finales de 1930 la producción total fue cerca de 14,650,000 toneladas de metal, con unos de 800 millones de libras de cobre y posiblemente 9 millones de onzas de plata y 25,000 onzas de oro. Las operaciones fueron suspendidas en septiembre de 1931 (Gardner *et. al.*, 1938).

1.3.4 Mina La Caridad

La mina de La Caridad es actualmente uno de los el depósitos con mayor producción de cobre en México y el sistema de pórfido de cobre más joven en la región suroeste de América. El depósito está albergado en rocas laramídicas de composición intermedia a félsica (Figura 1.8). Estas rocas están intrusionadas por un stock de cuarzo monzonita, el cual controla la alteración y la mineralización. La alteración en la parte central es pervasiva y predominantemente del tipo filítico caracterizada por la asociación cuarzo-sericita-pirita. La mineralización hipogénica consiste de pirita, calcopirita y molibdenita, pero también se encuentran cantidades menores de esfalerita, bornita y galena. El contenido total de sulfuros varía entre 2% y 3%, con una relación de pirita-calcopirita de 2:1, que llega a ser de 10:1 en la parte central. La concentración de cobre hipogénico es menor al 0.3%, mientras que el molibdeno varía entre 0.04% y 0.01% (Seagart *et. al.*, 1974)

El enriquecimiento supergénico consiste completamente y parcialmente de calcosita remplazando a calcopirita y pirita que ocurre por debajo de la capa de oxidación. La zona de enriquecimiento supergénico ocurre como cuerpos planos y tabulares con la apariencia un platillo invertido. El enriquecimiento en esta zona tiene leyes aproximadas de 0.75% de cobre en la zona de calcocita (Seagart *et. al.*, 1974).

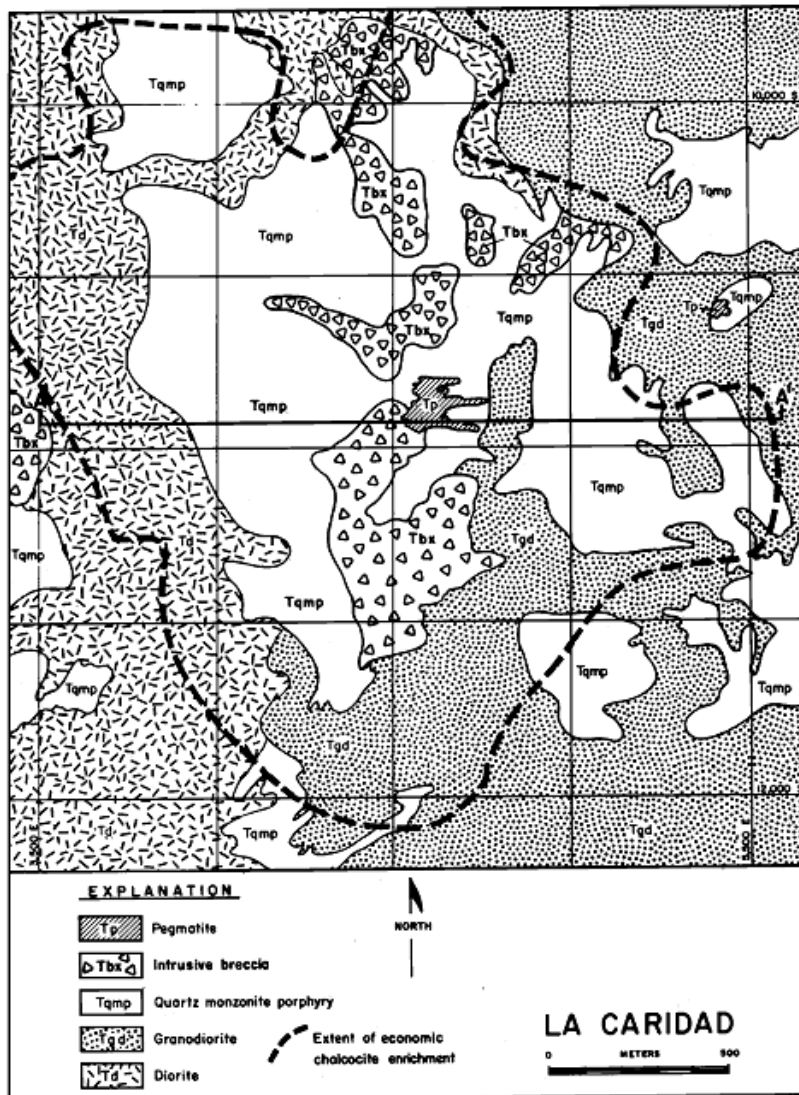


Figura 1.8 Mapa geológico generalizado del depósito de pórfido cuprífero de La Caridad, se muestra la periferia del enriquecimiento de calcosita. Tomado de Seagart et. al., 1974.

La edad de la mineralización se estima de 53.8 Ma por edades Re-Os en molibdenita (Barra et. al., 2005).

1.4 Antecedentes

Existen algunos trabajos de investigación dedicados a tratar de explicar los procesos físico-químicos que ocurren en los jales mineros, así como también los mecanismos involucrados en la formación de minerales secundarios en la superficie de los mismos. A continuación se mencionan varios de los trabajos previos que se han escrito acerca de jales

mineros y sales eflorescentes a escala global, así como los trabajos que se han realizado particularmente en la zona de Nacozari de García, Sonora.

1.4.1 Sales eflorescentes

El proceso de eflorescencia es muy común en pasivos mineros abandonados o con un control antropogénico. Éstos se han reportado en diferentes partes del mundo incluyendo México y en condiciones climáticas diferentes, aunque generalmente la temporalidad de las eflorescencias ocurre en las épocas de sequía, cuando la evaporación es mayor que la precipitación.

Dold *et. al.* (2001) realizaron una comparación geoquímica y mineralógica en tres jales mineros de Chile, donde el objetivo principal era observar los cambios geoquímico-mineralógicos en la interfase entre la zona de oxidación y la zona primaria en los jales. Ellos encontraron que en la zona de oxidación se tenía una mineralogía secundaria formada por jarosita, schwertmannita, capas de vermiculita y trazas de goethita. En la zona primaria por debajo de la zona de oxidación se encontró covellita producto de la alteración de calcopirita lo que dio lugar también a otros minerales secundarios de Cu con un potencial económico, esto ocurre en jales donde predomina la precipitación. Para los jales donde predomina la evaporación en condiciones climáticas áridas, ellos encuentran que la migración de elementos es de manera capilar y los elementos son movilizados hacia la cima de los jales en condiciones de oxidación y encuentran sales eflorescentes altamente solubles como bonattita y calcantita. Como conclusión, los autores presentan dos modelos esquemáticos sobre la movilidad de elementos en jales mineros de Cu. El primer modelo se basa en aquellos jales que tienen un dominio de precipitación, es decir la movilidad de los elementos es de arriba hacia abajo por infiltración y la precipitación de minerales secundarios de cobre es en la base del jal en la zona de neutralización. Para los jales con un dominio de evaporación la movilidad ocurre vía capilar hacia la superficie del jal y es donde se depositan las sales eflorescentes ricas en Cu.

España *et. al.* (2005) reportaron las propiedades físicas y químicas de 64 zonas de descarga de drenaje ácido de mina (DAM) de 25 minas en la Faja Pirítica Ibérica que drenan hacia el río Odiel en España. Las soluciones de DAM varían ampliamente en tasas de flujo y

composición química tanto espacialmente y estacionalmente, incluyendo casos con valores muy bajos de pH, un alto contenido de sulfatos y metales. En este trabajo se obtienen datos geoquímicos de los DAM, entre ellos determinan la solubilidad y la capacidad de retención de metales traza por parte de oxihidróxidos de Fe y de minerales sulfatados hidratados comúnmente asociados al drenaje ácido de mina. Encuentran, como resultado de la oxidación y la subsecuente hidrólisis de Fe disuelto, que las sales eflorescentes son precipitados de Fe incluyendo schwertamnnita, jarosita, goethita y ferrihidrita, fases de aluminio (basaluminita) y eflorescencias de Mg-Fe-Al, particularmente epsomita, hexahidrita, copiapita, halotriquita, rozenita y coquimbita. Concluyen que esta mineralogía es altamente dependiente del pH y que refleja la evolución geoquímica de las aguas ácidas sulfatadas. También se menciona que la mayoría de los sulfatos hidratados llevan a los afluentes del río Odiel y subsecuentemente al océano atlántico con grandes cantidades de metales solubles como Mn, Zn, Cd y Cu.

Lottermoser *et. al.* (2005) estudiaron la transferencia de contaminantes provenientes de jales mineros y zonas mineralizadas de la mina de uranio Mary Kathleen, en Queensland, Australia. La zona mineralizada contiene concentraciones importantes de Ca, Fe, Mg, Ce, La, Mn, P, S, Ba, Cu, Th y U. Estos elementos han sido movilizados debido a procesos de intemperismo fisicoquímico y se han dispersado a suelos, sedimentos de arroyo, pozos de agua y ciertas especies de plantas. La movilización química de estos elementos comenzó con disolución de sulfuros de mena para producir ácido sulfúrico y la formación de sales eflorescentes superficiales. Algunos de las sales eflorescentes reportadas en este artículo son copiapita, melanterita, roemerita, halotriquita, calcantita, yeso y epsomita. Algunos de estos minerales como copiapita y melanterita tienen concentraciones de Ce, Cu, La, Mn, Ni, As, P, Th, Y, U y Zn. Ellos concluyen que la movilización de uranio debido a la disolución de los desperdicios mineros pudo facilitar la formación de sulfatos y carbonatos de U y que las plantas que han crecido en las zonas mineralizadas han acumulado elementos de tierras raras, U, Cu y Th y en menor grado As, Ni, Y, Pb y Zn lo cual hace que los elementos que se acumulan en los tejidos de las plantas se encuentre biodisponible para la fauna local.

Robles Arenas *et. al.* (2006) presentan en este trabajo una evaluación de impacto ambiental y riesgo potencial de un sitio minero abandonado en la Sierra de Cartagena-La Unión al sureste de España. Según datos mineralógicos y químicos se pueden distinguir por lo menos nueve tipos de desperdicios minero-metalúrgicos, y en base a concentraciones de metales pesados en diversos materiales concluyen que el impacto de las actividades mineras no solo afecta en el área inmediata del sitio sino también a sus alrededores (1,000 km² de área afectada). Determinan que el principal proceso geoquímico involucrado en el área es la oxidación de sulfuros y la disolución por aguas subterráneas y de escorrentía de sulfatos precipitados posteriormente; además que la escorrentía y el viento son los mecanismos principales del transporte de metales y sulfatos en el área. En este trabajo se reportan algunas sales eflorescentes como rozenita, yeso, illita, clorita, apjohnita, halotriquita, starkeyita, hexaidrita y epsomita. Las lluvias disuelven estas sales eflorescentes formadas en las superficies de las pilas de desperdicios y movilizan elevadas concentraciones de metales y sulfatos en aguas ácidas con cantidades importantes de sólidos suspendidos promoviendo su entrada a las cadenas tróficas en ecosistemas acuáticos y terrestres.

Smuda *et. al.* (2007) presentan un estudio geoquímico y mineralógico del jal minero Excélsior originado de la mina Cerro de Pasco en Perú. Los objetivos principales fueron: caracterizar el ensamble de la mineralogía secundaria y el DAM, y en base a esta información crear un modelo de transporte elemental dentro y fuera del jale minero bajo las condiciones de clima de montaña altamente variable con alta precipitación en temporada de lluvias y alta evaporación en temporada de secas. En esta investigación se reportan algunas sales eflorescentes encontradas en los jales de Excélsior como por ejemplo: melanterita, siderolita, fibroferrita, rozenita, szomolnokita, romerita, copiapita, epsomita, starkeyita, kieserita, goslarita, gunningita, changoita y anglesita. Este estudio les permite establecer un modelo con variación climática en la formación y disolución de mineralogía secundaria y el subsecuente flujo de elementos del jal Excélsior en Perú.

Carmona *et. al.* (2009) emplean un estudio para entender los ciclos geoquímicos de elementos como el Cd, Cu, Pb y Zn en suelos mineros del distrito minero de Mazarrón al

sureste de España caracterizados por una acidez extrema, una alta salinidad y alto contenido de metales. Colectaron sales eflorescentes correspondientes al material superficial del suelo y determinaron que se trataban principalmente de sulfatos hidratados de Al, Fe, Mn, Mg y Zn (halotriquitas), apjohnita, copiapita, sulfatos de zinc y hexahidrita. Algunas otras sales encontradas fueron epsomita, starkeyita, goslarita, jarosita, natrojarosita, mirabillita, coquimbita y hohmannita. Ellos concluyen que estas sales son enriquecidas altamente con metales potencialmente tóxicos, como por ejemplo se adjudica un enriquecimiento de Cd, Cu y Pb en las sales de copiapita y apjohnita, mientras que el Zn se encuentra en la goslarita.

Bea *et. al.* (2010) reportan la presencia de sales eflorescentes en unos jales mineros en las áreas costeras de Chañaral en Chile. En este trabajo intentan entender el proceso de formación de estas sales solubles y diseñan estrategias de prevención y remediación para estos minerales secundarios ya que por su alta solubilidad y riesgo a los seres humanos hace esta ocurrencia un peligro ambiental serio. Las principales eflorescencias encontradas en este escenario costero son halita, eriochalcita y yeso, donde la eriochalcita tiene una ocurrencia natural muy rara: se necesitan condiciones de muy alta evaporación y una baja humedad relativa del aire. Se establece en este trabajo algunos de los escenarios para la formación de las eflorescencias donde involucran como factores la temperatura, salinidad, actividad del agua y saturación de poro. Como conclusión, establecen una estrategia de remediación y prevención que se centra en la reducción de la tasa de evaporación en la superficie de los jales por lo cual se establecen algunas capas superficiales de materiales para prevenir la evaporación: (1) una capa de arena y grava, (2) una geomembrana donde su función consiste en aislar la barrera capilar del sistema de drenaje ácido de mina y prevenir la oxigenación hacia los jales y (3) una capa de suelo orgánico que promueva el desarrollo de vegetación.

Quispe *et. al.* (2013) efectúan un estudio en dos jales mineros adyacentes en el distrito minero de Monte Romero, en la Faja Pirítica de España, donde comparan características geoquímicas y mineralógicas de la fracción sólida de los jales así como también análisis geoquímicos de agua y gas en los materiales. En este trabajo determinan que ambos jales mineros han estado expuestos al intemperismo en un clima semiárido desde 1978 y que la

evaporación en la superficie de los mismos ha causado la precipitación de sales solubles sulfatadas de hierro en las épocas de sequía. Estas sales contienen Cd, Co, Zn, Ni, Cu y Mn que son liberados en las épocas de lluvias. Según este estudio, los dos jales presentan características diferentes lo cual se refleja en el grado de intemperismo de cada uno. Uno de los jales contiene cerca de un 30% en peso de pirita lo que hace que el pH del agua atrapada en los poros incremente en los periodos de lluvias causando la precipitación de fases secundarias de Fe (III) como jarosita, goethita y schwertmannita. El otro jal contiene un 80% en peso de pirita por lo cual presenta un pH muy bajo de 0.5 tanto en temporada de secas y de lluvias, y no contiene mineralogía secundaria en la zona de oxidación. Esto refleja que ante una misma condición climática ambos jales se intemperizan de manera diferente debido a la composición mineralógica particular de cada uno.

Hayes *et. al.* (2014) investigan la relación de la propagación de las reacciones de oxidación de la zona de *gossan* y la especiación molecular de Fe y S en los jales de la mina de Iron King ubicados en Dewey-Humboldt, Arizona, cuyo intemperismo se asocia a un clima semiárido. Los datos de extracción secuencial indican que existe una gran cantidad de fases secundarias de Fe así como también sales eflorescentes en la cima de los jales. Los datos de DRX muestran la presencia de minerales como cuarzo, feldespato, arcillas, sulfuros, sulfatos y carbonatos en el jal. Como mineralogía secundaria en la superficie se reportan plumbojarosita, H-jarosita, jarosita, natrojarosita, yeso, melanterita, siderita, schwertmannita y ferrihidrita. Con este trabajo concluyen una trayectoria de reacción: pirita, silicatos, carbonatos→ferrihidrita y yeso→schwertmannita→grupo de la jarosita. El limitado flujo de agua en el jale limita la translocación de sulfatos y contribuye a la persistencia de ferrihidrita y shwertmannita por lo cual indica que las reacciones cinéticas de estos minerales son retardadas en este sistema semiárido. Como resultado se tiene una zona de gossan delgada de 30 cm susceptible a la erosión hídrica y eólica que implica una dispersión de contaminantes.

1.4.2 Jales mineros en México

La diversidad de yacimientos minerales en México ha promovido una notable actividad minera desde tiempos prehispánicos. En consecuencia, cada uno de los yacimientos minerales

explotados ha dejado una gran cantidad de residuos mineros (jales mineros), normalmente depositados en presas o depresiones topográficas, los cuales permanecen expuestos a condiciones climáticas ambientales particulares de cada región. La principal problemática del depósito de este tipo de materiales es el contenido de metales pesados, metaloides, material radioactivo, ácidos y químicos involucrados en diversos procesos de beneficio, los cuales pueden ser tóxicos y requieren monitoreo, tratamiento y un confinamiento seguro (Lottermoser, 2010).

Diversos autores han estudiado y documentado información sobre jales mineros en México desde diferentes puntos de vista. La mayoría de los trabajos están enfocados a geología ambiental, geología médica, riesgos geológicos y geoquímica, aunque algunos de los trabajos se están enfocados a la explotación misma del jal.

Mendoza-Amézquita *et. al.* (2006) caracterizan geoquímica y mineralógicamente los residuos mineros las minas La Asunción y Las Torres en el distrito minero de Guanajuato, con el objetivo de evaluar la movilidad de ciertos elementos como Zn, Cu, Pb, Cd, Se y Ar. De acuerdo a los resultados se observó que las concentraciones de elementos traza son más homogéneas en los jales y además, debido la relación de sulfuros, se concluyó que era poco favorable la producción de drenaje ácido de mina, por lo cual no existen condiciones geoquímicas para la lixiviación de metales, excepto en el caso del arsénico y el selenio, que podrían movilizarse en condiciones de neutralidad.

Gutiérrez-Ruíz *et. al.* (2007) estudiaron los depósitos de jales inactivos de la Unidad Minera Santa Bárbara, en Chihuahua, para evaluar su impacto ambiental en suelos y sedimentos. Se emplearon técnicas para determinar parámetros fisicoquímicos de las muestras como absorción atómica para determinar concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en la fase soluble del sedimento para evaluar el potencial de lixiviación y movilización de dichos elementos. Este estudio logró determinar que la concentración total de metales, incluyendo Zn, Pb, Cu y As, son relativamente altas en los jales, pero consideran a estos pasivos mineros como “residuos no peligrosos” porque no son generadores potenciales de ácido de mina y las soluciones que se liberan con ETP son muy bajas.

Medel *et. al.* (2008) caracterizaron dos jales mineros en el distrito minero de Guanajuato, a los cuales se refieren como jal histórico y jal reciente. Determinaron las concentraciones de EPT en las pruebas de lixiviación empleadas en los jales en base ICPMS y absorción atómica, encontrando importantes cantidades de Fe, Mn, Zn, Pb y Cr. Además, mediante pruebas en celdas húmedas observaron que no se puede lixiviar más del 0.4% de los metales presentes en el jal, por lo cual estos jales no representan un riesgo ambiental importante.

Hernández-Acosta *et. al.* (2009) estudiaron características fisicoquímicas de residuos mineros y la concentración de EPT en la vegetación circundante al jal minero conocido como Don Carlos, ubicado en Pachuca, Hidalgo. Se determinó que en el jal se tenía un pH medianamente alcalino y una textura arenosa, y que el Zn y el Pb fueron los elementos con mayor concentración con 45 mg.kg⁻¹ y 14 mg.kg⁻¹ respectivamente. Se concluyó que algunas especies de plantas como *Solanum corymbosum*, *Brickelia veronicifolia*, *Atriplex suberecta*, *Cynodon dactylon* y *Bouteloua curtipendula* contenían concentraciones importantes de Cu, Pb, Zn, Cd, Mn y Ni en su biomasa, por lo cual se consideraron como especies indicadas para la bioremediación del jal.

Romero *et. al.* (2010) realizaron un estudio geoquímico y mineralógico en jales en dos zonas mineras localizadas al sur y al centro de México. En ambas zonas se encontraron jales inalterados con coloración grisácea y jales oxidados color café. Los jales oxidados presentan concentraciones totales altas de EPT, incluyendo As, Cd, Pb, Cu, Zn y Fe. En base a los valores de pH neutros a ligeramente alcalinos en el caso del centro de México, estos jales no son generadores de DAM. En cambio, los jales del sur de México tienen valores de pH ácido que puede potencialmente generar DAM; pero en otros sectores, los jales tienen valores de pH básicos. En base a un balance ácido-base, los autores consideran que los jales inalterados al sur de México serán generadores de DAM cuando éstos se oxiden y que los jales al centro de México no serán generadores de ácido de mina ya que el potencial de neutralización en esta zona es mayor que el potencial de acidez.

Moreno Tovar *et. al.* (2012) hacen un estudio en unos jales del distrito minero de Zimapán, en el estado de Hidalgo, donde evaluaron la bioaccesibilidad de As, Pb, Zn y Cd, en base a microscopía óptica y electrónica. Algunos de los minerales que encontraron son arseniatos (escorodita y simplesita), sulfatos (anglesita y plumbojarosita) y carbonatos (cerusita). En este trabajo también determinaron la bioaccesibilidad de estos elementos en la fase gástrica (pH = 1.3) e intestinal (pH = 7.0), y se concluyó que la bioaccesibilidad del arsénico y el plomo es mayor en la fase gástrica, mientras que el zinc y el cadmio son variables en ambas fases.

1.4.3 Pasivos mineros de Nacozari

Los pasivos mineros de Nacozari de García tienen una antigüedad de más de ochenta años, desde que la compañía *Moctezuma Copper Company* terminó la explotación de la mina Pilares. El producto de las plantas de beneficio de la mina generó tres presas de jales ubicadas en los alrededores del pueblo de Nacozari. Los jales de Nacozari de García han empezado a ser estudiados a partir de años recientes, a raíz del desarrollo de temas de investigación enfocados a la geología ambiental, geología médica y geotecnia.

Alvarado *et. al.* (2004) efectúan un estudio geoquímico y granulométrico en las tres presas de jales inactivos de Nacozari, donde incluyen un muestreo de agua en diferentes áreas aledañas a los jales que permite establecer un panorama preliminar sobre el riesgo ambiental y a la salud que implican estos jales y terreros. Con este trabajo determinan que la mayoría de las muestras de jales analizadas por granulometría caen en el campo de arenas gruesas a medias y que las concentraciones elementales son muy heterogéneas en casi todas las fracciones de partícula.

Meza Figueroa *et. al.* (2009) realizan una investigación sobre el contenido de metales en jales mineros, sales eflorescentes, suelos, polvo de camino y suelos residenciales para determinar el impacto ambiental que tienen los jales de Nacozari en el pueblo. En este artículo se argumenta que algunos efectos climáticos, como fuertes vientos y lluvia, pueden tener un gran impacto en la dispersión de metales en áreas semiáridas puesto que los suelos carecen de cubierta vegetal. En este trabajo se hace un hincapié importante en la mineralogía de las

sales eflorescentes, las cuales, debido a su grano muy fino son susceptibles a la erosión y a incrementar su nivel de dispersión hacia las áreas residenciales, haciéndolos biodisponibles a la inhalación e ingestión; por otra parte, las altas concentraciones de EPT hacen que este proceso represente un riesgo potencial para la salud de los habitantes de este poblado. En este artículo se propone la creación de una capa vegetativa superficial que evite la erosión por viento, agua, dispersión de polvo y sales eflorescentes. Para tal efecto, se tendrían que encontrar plantas candidatas que toleren las concentraciones de los jales mineros y puedan crecer en ese medio ambiente.

Moreno Zazueta *et. al.* (2010) elaboran un estudio geotécnico en la Presa de Jales I en Nacozari de García con el que se pretende sea empleado para la estabilización de esta pasivo minero no confinado. En este trabajo se diseña una metodología geotécnica que proyecta estabilizar los taludes de los residuos mineros, ya que las pendientes son de hasta 50°, lo que los hace muy susceptibles a una alta erosión hídrica, eólica y el posible colapso del material. El diseño geotécnico empleado toma consideraciones geoquímicas, geotécnicas, climáticas, geológicas, topográficas, sociales y un análisis de riesgo previo a la restauración. En este artículo se concluye que la metodología geotécnica empleada para el caso de la Presa de Jales I en Nacozari de García es útil para ese tipo de diseños, ya que con el mismo se pueden reducir la inclinación de pendientes lo que permite significativamente disminuir la erosión así como también el transporte de partículas del jal a zonas residenciales.

De la O Villanueva *et. al.* (2013) efectúan un trabajo de investigación acerca de los procesos erosivos dominantes en la Presa de Jales I de Nacozari de García para evaluar su influencia en la dispersión de cobre a zonas residenciales. Con esta investigación pudieron definir los flujos de escorrentía principales gracias a un trabajo de topografía y concluyeron que el proceso erosivo principal es la erosión hídrica la cual provoca la dispersión del material del jal hacia la zona urbana y suelos residenciales. En el caso de la erosión eólica se definió que, aunque es un proceso menos dominante, puede causar mayores daños a la salud humana ya puede transportar partículas más pequeñas con altos contenidos de cobre, como las sales eflorescentes, hacia la zona urbana.

1.5 Justificación

Este trabajo de investigación se justifica por la existencia de una problemática ambiental y riesgo a la salud actual para los habitantes del poblado de Nacozari de García, Sonora. La presencia de los pasivos mineros en Nacozari, debido a su actividad minera histórica, necesitan atención para comprender los procesos fisicoquímicos que promueven la oxidación de estos jales, así como la formación de minerales secundarios superficiales que contienen EPT. El entendimiento de estos fenómenos estacionales dependientes del clima, pueden ayudar a implementar medidas de remediación futuras para los pasivos mineros de este lugar.

Como se ha mencionado antes, existen trabajos escasos sobre este tipo de problemática en Nacozari de García, pero ninguno enfocado a la formación de sales eflorescentes, por lo cual este trabajo de investigación pretende aportar nuevos datos para la comprensión de éste fenómeno, y servir de punto de partida para futuros estudios sobre este tema.

1.6 Objetivos

- Caracterización de la mineralogía de las sales eflorescentes presentes en los jales, así como la mineralogía de los mismos jales.
- Evaluar geoquímicamente las sales eflorescentes para conocer la concentración elemental de posibles elementos potencialmente tóxicos así como la química general de los jales mineros.
- Evaluar dos perfiles verticales en diferentes estaciones del año (lluvias y secas) para entender el proceso de formación de sales eflorescentes en el jal minero.
- Conocer la granulometría de la Presa de Jales I de Nacozari de García para evaluar el comportamiento a profundidad de las concentraciones de ciertos elementos en cada fracción granulométrica.
- Determinar la concentración de cobre soluble presente en los jales mineros.

-
- Caracterizar la morfología, estructura cristalina y mapeo elemental de las sales eflorescentes mediante microscopia electrónica de barrido.

También se tienen contemplados algunos objetivos secundarios que ayudarán a entender mejor el proceso de eflorescencia y oxidación de jales:

- Determinar a escala microscópica las reacciones de oxidación de sulfuros presentes en el jal minero.
- Establecer una ruta de proceso de formación de sales eflorescentes en función de parámetros fisicoquímicos, geoquímicos y dependencia climática.

1.7 Metas

- Determinar y reportar la mineralogía correspondiente a las sales eflorescentes como mineralogía secundaria en los jales de Nacozari de García.
- Conocer la variabilidad geoquímica de las sales eflorescentes con respecto a diferentes estaciones del año.
- Crear datos analíticos y conocimiento para una futura remediación del sitio contaminado y que esta metodología sirva como base para futuras investigaciones de este tipo.

1.8 Hipótesis

- La formación de sulfatos secundarios superficiales en jales mineros con climas áridos a semiáridos, debe estar sujeta a la pérdida de agua del sistema donde estas sales solubles se encuentran y el transporte a la superficie debe de ser vía capilaridad.
- La ocurrencia de sales eflorescentes en forma de capas alternadas con capas sin sales solubles en los jales mineros, debe tener una relación con: la granulometría del jal, fases impermeables de jal entre capas, hidrología interna del jal y/o retención de agua en ciertas capas de jal.

-
- Las especies minerales de sales eflorescentes deben tener una componente importante de cobre por su color verdoso en campo, por lo tanto se esperaría que muchas de estos minerales sean minerales secundarios de cobre.
 - La mineralogía de sulfatos secundarios podría variar con la profundidad debido a diferentes estados de hidratación, temperatura y geoquímica del medio.

Capítulo 2

Marco teórico

2. Marco teórico

2.1 Jales mineros

Los jales mineros se pueden definir como el material residual producto de rocas o suelos que ha sido sometido a diversos procesos de beneficio en la planta de procesamiento de una mina (Tailings, 2015). Algunos procesos mecánicos y químicos son empleados para extraer el producto deseado del yacimiento mineral y el desperdicio minero final es conocido como *jal minero* y estos residuos son generalmente confinados en presas con infraestructura geotécnica para su resguardo.

El aprovechamiento de yacimientos metálicos en rocas duras (ej., Au, Cu, Pb, Zn, U) y depósitos minerales industriales (ej., fosfatos, bauxita) involucran la reducción de tamaño del material y la separación de especies minerales individuales, lo cual se lleva a cabo en distintos pasos para su procesamiento (Lottermoser, 2010). En una primera etapa, los grandes bloques de roca con mineral a recuperar son reducidos a unos cuantos milímetros de tamaño, incluso a escalas micrométricas. Esto involucra en principio la trituración y después el tamizado y molienda del material (Figura 2.1).

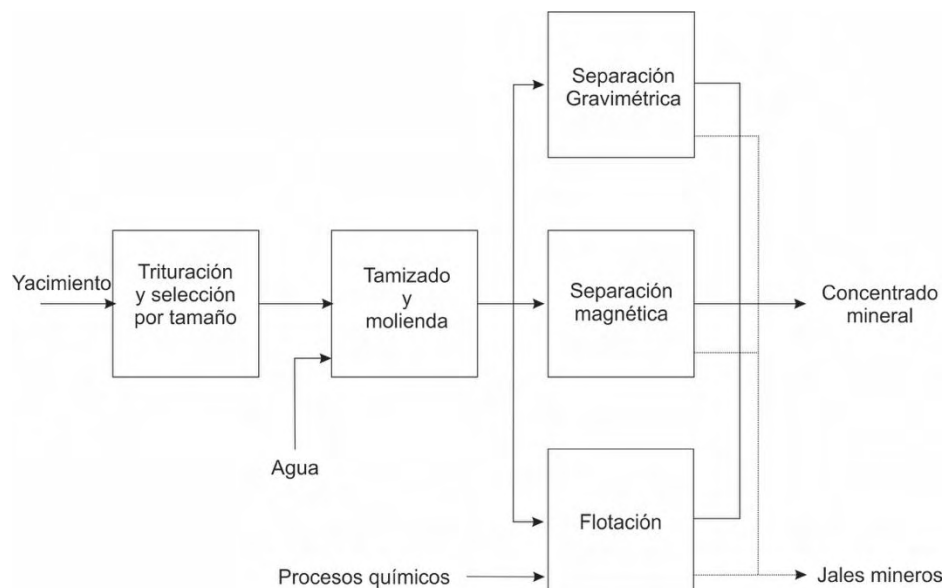


Figura 2.1 Diagrama de flujo simplificado para las operaciones de procesamiento mineral donde el producto final es un concentrado mineral y jales mineros (Tomado de Ripley, 1996).

El objetivo de esta etapa es liberar los minerales de mena de las fases de ganga. En la segunda etapa se emplean diversos métodos fisicoquímicos para la separación del mineral de mena de la ganga aprovechando las propiedades gravimétricas, magnéticas, eléctricas o superficiales de cada uno de estos minerales para lograr la separación. La liberación de los minerales en estos procesos está gobernado por tamaño de grano y la complejidad mineral del yacimiento (Ritcey, 1989).

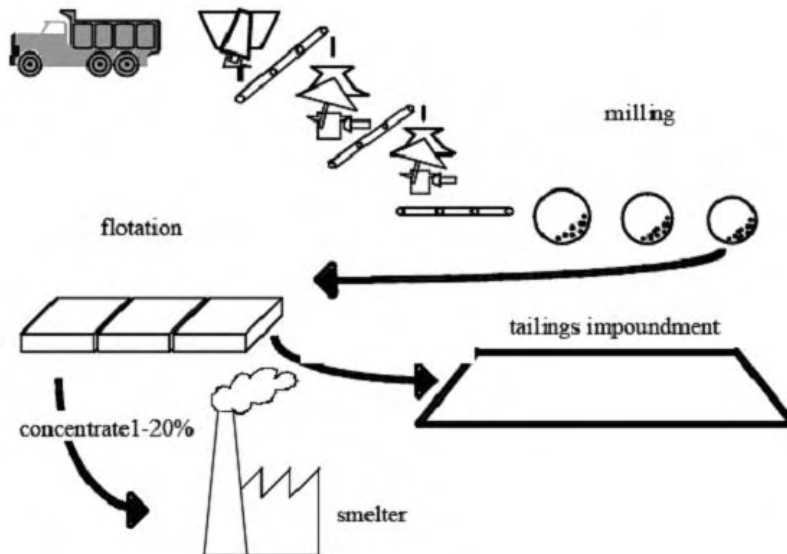


Figura 2.2 Representación de los pasos del procesado mineral que se lleva a cabo en la extracción de minerales de mena en una mina (tomado de Dold, 2010).

El producto final del proceso de extracción de yacimientos metálicos y no metálicos será un concentrado rico en minerales de mena y una cantidad residual de desperdicios conocidos como jales. Generalmente los jales son producidos en forma de partículas en suspensión que son transportados por tuberías hacia las presas de jales (Figura 2.2) para su deposición final (Dold, 2010). Los jales consisten principalmente en minerales de ganga como silicatos, óxidos, hidróxidos, carbonatos y sulfuros, pero la mayoría de estos grupos minerales no son el 100% de la composición total. Siempre queda una cantidad mínima de mineral de mena en ellos que se pueden enriquecer superficialmente por procesos fisicoquímicos en dependencia de su componente climática, y los sulfuros, principalmente pirita, promueven la generación de drenaje ácido de mina.

En la industria minera metálica, el mineral de mena extraído representa solo una pequeña fracción del volumen total, la vasta mayoría de material ha sido convertido en jales por lo cual representan el desperdicio minero más voluminoso en este tipo de actividad (Lottermoser, 2010).

2.1.1 Características de jales mineros

Los jales mineros varían notablemente en sus características físicas y químicas. Algunas de estas características incluyen: composición geoquímica y mineralógica, peso específico de las partículas en los jales, comportamiento de sedimentación, relación de permeabilidad y densidad, plasticidad de suelo, comportamiento de consolidación, relaciones de reología/viscosidad, química de agua de poro y propiedades de lixiviación (Lottermoser, 2010).

Algunos jales de la misma clase pueden contener diferente mineralogía y por lo tanto tendrán diferentes características físicas y químicas (Ritcey, 1989). Las características de estos residuos tienen que ser determinadas para establecer un comportamiento de los jales una vez depositados en su locación final y el potencial a corto y largo plazo de los impactos ambientales (Tailings, 2015). Los jales consisten básicamente en una mezcla de sólidos y líquidos, los sólidos son descargados comúnmente en las presas de jales y los líquidos encontrados en las presas se encuentran de manera superficial y en los poros del material. Generalmente el agua de los jales contiene altas concentraciones de productos químicos utilizados en el proceso de beneficio.

La mayoría de los procesos de beneficio e hidrometalúrgicos funcionan en agua, de esta manera el agua subterránea o superficial es explotada para utilizarse en este tipo de operaciones. Por esta razón los procesos hidrometalúrgicos requieren reactivos químicos específicos para cada tipo de mineral de mena en base a su comportamiento. Estos químicos se pueden clasificar como reactivos de flotación, modificadores, floculantes/coagulantes, agentes hidrometalúrgicos y oxidantes, sus características son enlistadas en la tabla 1.

El agua presente de manera superficial o dentro de los poros de los jales se llama *agua de jales* y esta puede variar ampliamente en composición con el tiempo en dependencia de los procesos químicos a los que fue sometida. La lluvia se encarga de la dilución del agua de jales y las concentraciones por evaporación causa la precipitación de minerales secundarios ya sea por debajo

o superficialmente encima del jal minero. Smuda *et. al.*, (2007) presentan un modelo hidrológico para el jal minero Excélsior en Perú donde la mayor parte del agua provenía de la lluvia, las dos maneras de flujo de esta agua en el jal Excélsior era de manera de escorrentía y por infiltración

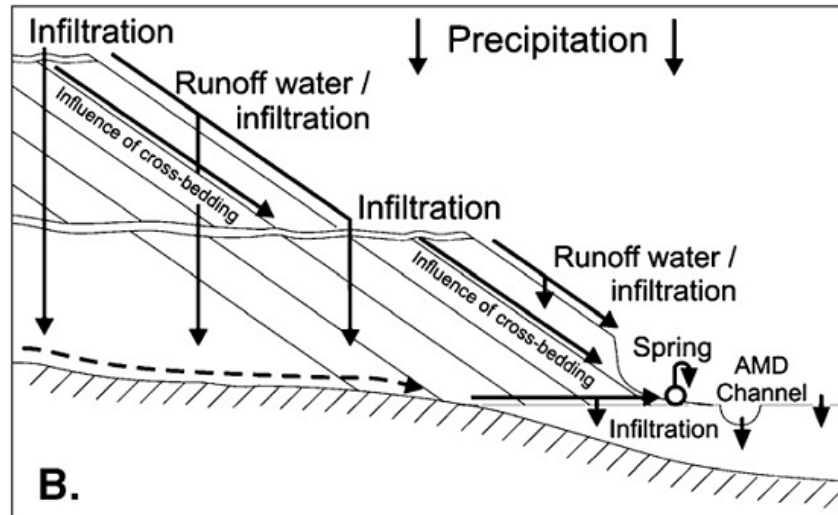


Figura 2.3 Principales rutas que emplea el agua de jales, caso jale Excélsior en Perú, tomado de Smuda *et. al.*, 2007.

(Figura 2.3). Por otra parte la explotación de agua dulce, salobre y salina utilizada para el procesamiento mineral puede influir en la composición del agua de los jales como por ejemplo el uso de agua salina para el procesado de yacimientos en climas áridos.

Tabla 1 Ejemplos comunes de reactivos de flotación, modificadores, floculantes, coagulantes, reactivos hidrometalúrgicos y oxidantes (Lottermoser, 2010).

Clase	Uso	Ejemplos de reactivos
Reactivos de flotación		
(a) <i>Espumantes</i>	Actúa como medio de flotación	Reactivos orgánicos superficiales como aceite de pino, propilenglicol, alcoholes alifáticos, ácido cresílico
(b) <i>Colectores</i>	Para atraer selectivamente particular recubiertas con una superficie repelente al agua hacia burbujas de aire	Agua soluble, reactivos orgánicos superficiales como amina, ácidos grasos, xantatos
Modificadores		
(a) <i>Reguladores de pH</i>	Para cambiar el pH y promover la flotación	Cal, cal hidratada, calcita, carbonato de sodio, hidróxido de sodio, amoníaco, ácido sulfúrico, ácido nítrico, ácido clorhídrico

<i>(b) Activadores y depresores</i>	Para modificar selectivamente la respuesta de flotación de los minerales presentes	Reactivos orgánicos superficiales y diversos compuestos inorgánicos como sulfato de cobre, sulfato de zinc, sulfato de sodio, nitrato de plomo, cal, silicato de sodio
<i>(C) Aceites</i>	Para modificar la espuma y actuar como colector	Queroseno, aceites combustibles, aceites de alquitrán
Floculantes	Para promover la formación de grandes partículas y una sedimentación eficiente haciendo que partículas más pequeñas se adhieran a partículas más grandes	Arcillas, hidróxidos metálicos, polisacáridos, derivados de almidón
Coagulantes	Promueve la formación de partículas más grandes y una sedimentación eficiente reduciendo las fuerzas netas repulsivas en las superficies de las partículas	Sulfato férrico y ferroso, sulfato de aluminio, cloruro férrico
Agentes Hidrometalúrgicos	Para lixiviar selectivamente los minerales de mena	Ácido sulfúrico, cianuro de sodio
Oxidantes	Para oxidar el agua involucrada en el proceso	Peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio, cloruro férrico, permanganato de potasio

La acidez en las aguas de jales está influenciada por el proceso de beneficio aplicado. Por ejemplo la extracción hidrometalúrgica de cobre, níquel y uranio está basada en el uso de ácido sulfúrico en condiciones oxidantes. Este ácido sulfúrico aplicado o generado por la oxidación de sulfuros en los jales, lixiviará los minerales contenidos en los jales (Lottermoser, 2010). El tamaño de grano de las partículas en jales mineros está relativamente restringido a tamaños de arcilla a arenas (2 µm a 2mm). Los jales *secos* consisten típicamente en un 70%-80% de arenas y de 20%-30% en arcillas a limos finos (Figura 2.4).

El tamaño de grano depende de las características de liberación de los minerales de mena y de ganga en los procesos de trituración y tamizado, esto influye en la resistencia de las partículas del jal a la erosión hídrica y eólica y en el comportamiento y características de sedimentación de las partículas en las presas de jales. El material contenido en los jales mineros contiene minerales

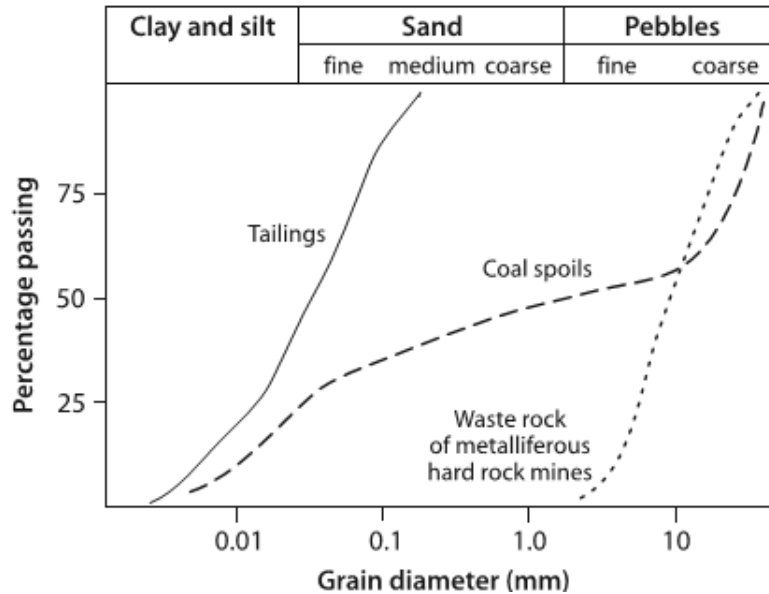


Figura 2.4 Curvas esquemáticas de distribución de partículas para jales mineros, tomado de Lottermoser, 2010.

similares a los del yacimiento explotado pero también contiene partículas y minerales ampliamente diferentes en tamaño de grano, mineralogía y geoquímica en comparación de su fuente.

Los componentes sólidos en los jales pueden ser: 1) minerales primarios de mena o ganga, 2) minerales secundarios formados durante el intemperismo, 3) precipitados químicos formados durante y después de los procesados minerales y 4) precipitados químicos formados después de la deposición del material en presas de jales (Lottermoser, 2010).

2.1.2 Presas de jales

La técnica de deposición de jales más económica y comúnmente utilizada es verter en estado húmedo los desperdicios cerca del sitio minero (Dold, 2010). El flujo de agua cargada con sedimentos es bombeado y depositado en depresiones topográficas como lagos, cuencas de drenaje o en el peor de los casos en sitios mineros cerca de las costas, donde los residuos se desechan al mar lo cual produce consecuencias ambientales críticas. En términos generales una presa de jales es una estructura física que mantiene y resguarda los residuos producto de la actividad minera, que tiene como doble función i) contener todo aquel desperdicio minero y rocas del proceso de molienda y ii) separar y reciclar el agua para su uso en el proceso (Figura 2.5).

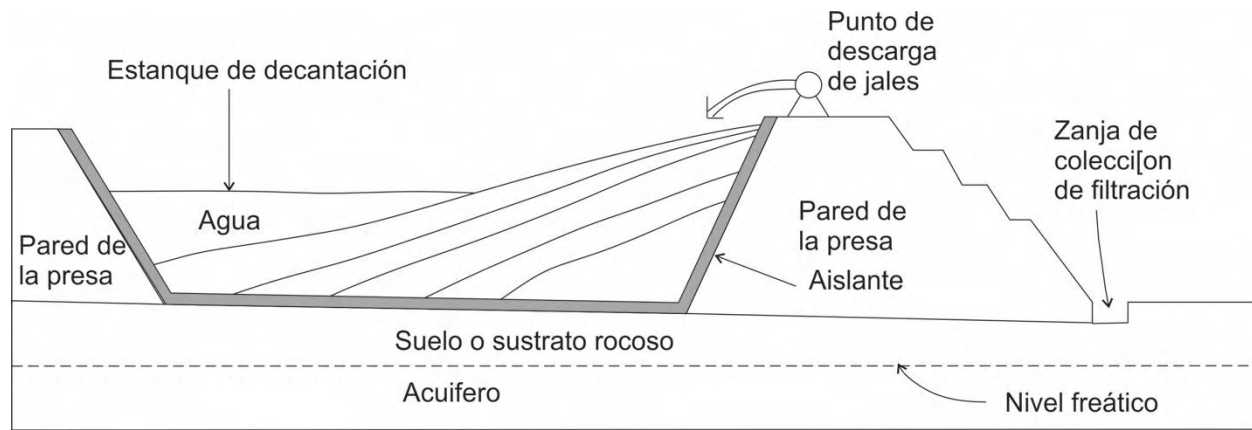


Figura 2.5 Sección esquemática de una presa de jales, tomado y modificado de Lottermoser, 2010.

Las presas de jales son construidas en base a estándares aplicables a presas convencionales para el almacenamiento de agua y generalmente no se construyen para que ese sea su diseño final; es decir su crecimiento es conforme la presa de jales se va llenando.

Algunas de las preocupaciones de las presas de jales en menor y mayor grado ambiental son:

- El impacto visual de estas grandes obras ingenieriles.
- La estabilidad estructural de la presa de jales y el potencial riesgo de un desborde causando un daño al medio ambiente.
- La clausura y el recubrimiento vegetativo de las presas de jales.
- Liberación de radiación.
- Contaminación de aire y suelo a través del viento.
- Infiltración de contaminantes hacia aguas superficiales y subterráneas.

El bombeo hacia las presas de jales tiene comúnmente un contenido de 20% - 40% de sólidos y ocurre mediante grandes tuberías que van cambiando su posición con respecto al tiempo, esto hace que el sedimento acumulado sea una masa heterogénea. Cabe mencionar que el transporte de los sólidos en un ambiente acuoso se comporte de manera similar como cualquier sedimento en su estado natural, es por esta razón que algunas estructuras sedimentarias son conservadas en la

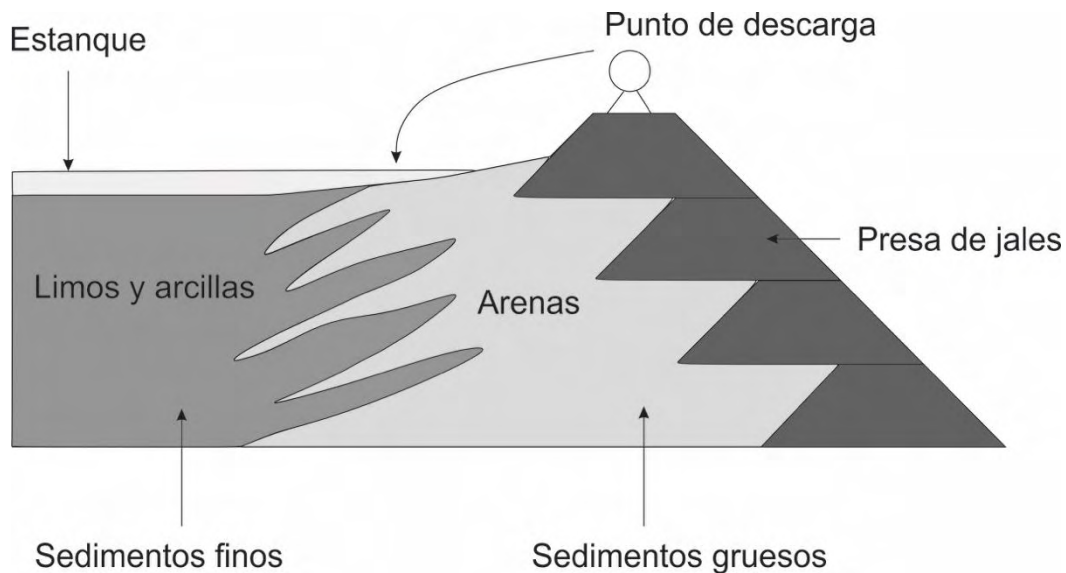


Figura 2.6 Deposición preferencial de las partículas encontradas en las presas de jales, los sedimentos gruesos se depositan cerca de la fuente de descarga, mientras que los sedimentos finos en las zonas más exteriores. Tomado y modificado de Lottermoser, 2010.

sedimentación como por ejemplo: estratificación gradada, estratificación cruzada así como también lentes y texturas sinuosas (Lottermoser, 2010).

Las partículas en suspensión tienen diferentes composiciones mineralógicas y diferente gravedad específica, y es esta propiedad física la que controla el comportamiento de sedimentación individual de cada partícula dentro de la presa de jales. En términos generales las partículas de arena más pesadas y grandes se sedimentarán cerca de la zona de descarga de bombeo, mientras que las partículas más finas y ligeras estarán más ampliamente distribuidas lejos de la fuente de descarga (Figura 2.6).

2.1.3 Intemperismo en jales mineros

Los jales mineros presentan un contenido mineralógico diverso, incluyendo sulfuros, silicatos, óxidos, fosfatos, sales y carbonatos. Cuando los sulfuros quedan expuestos a un ambiente oxidante, estos materiales se vuelven químicamente inestables y una serie de complejas reacciones químicas inician. El intemperismo de estos minerales es auxiliado por los gases atmosféricos, aguas meteóricas y actividad microbiana; y esto ocurre principalmente por que las fases minerales concentradas en los jales mineros no se encuentran en equilibrio termodinámico con el ambiente que los rodea (Lottermoser, 2010).

El intemperismo químico de los minerales puede ser clasificado como *productores de ácido* (es decir, generadores de H⁺), *amortiguador ácido* (consumidores de H⁺) y por último los que no generan ni consumen H⁺. Por ejemplo la degradación de pirita es una reacción generadora de ácido, mientras la calcita actúa como un *buffer* o consume ácido y el cuarzo por ejemplo ni produce ni consume H⁺. El balance estequiométrico de estas reacciones determina si el material involucrado generara o no drenaje ácido de mina (DAM).

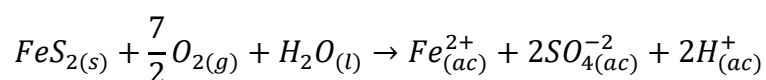
El problema más crítico es la generación del DAM y el DAR (drenaje ácido de roca), el cual tiene influencia directa con la mineralogía primaria del yacimiento. La disolución de la pirita (sulfuro principal generador del DAM) libera SO₄⁻², Fe⁺² y H⁺ que promueven eventualmente una superficie de reacción para el resto de los minerales y afecta la estabilidad química de las potenciales fases secundarias (Hayes *et. al.*, 2014).

2.1.4 Reacciones de producción de ácido

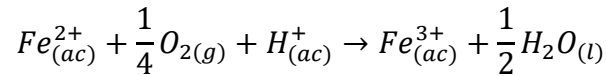
Los sulfuros son estables bajo condiciones altamente reductoras, la exposición de estos minerales en condiciones oxidantes los desestabiliza, y los sulfuros se destruyen mediante diversos mecanismos de oxidación. El sulfuro más común en yacimientos minerales y por ende en jales mineros es la pirita (FeS₂). Su oxidación se lleva a cabo en varios pasos, incluyendo la formación de varios minerales metaestables como melanterita (FeSO₄·7H₂O), copiapita (Fe^{II}Fe^{III}(SO₄)₆(OH)₂·22H₂O), coquimbita (Fe₂(SO₄)₃), ferrihidrita (5Fe₂O₃·9H₂O), schwertmannita (entre Fe₈O₈(OH)6SO₄ y Fe₁₆O₁₆(OH)₁₀(SO₄)₃), goethita (FeO(OH)), jarosita (KFe₃(SO₄)₂(OH)₆) y hematita (Fe₂O₃).

La oxidación de la pirita ocurre en tres pasos: i) oxidación del sulfuro, ii) oxidación del hierro ferroso y iii) oxidación de la pirita por hierro férrico (hidrólisis y precipitación de minerales férricos complejos). Estas reacciones se enlistan a continuación:

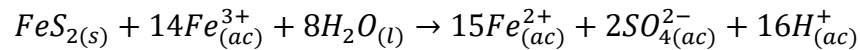
- Oxidación de la pirita (i)



- Oxidación de hierro ferroso (ii)



- Oxidación por hierro férrico (hidrólisis) (iii)



En la reacción (i), la pirita se oxida por el oxígeno formando hierro ferroso (Fe^{2+}) en solución, iones de hidrógeno y iones sulfato. Los iones disueltos de hierro causan un incremento en los sólidos totales disueltos en el agua y la liberación de iones de hidrógeno y sulfato promueven una solución ácida. El segundo paso (ii) representa la oxidación del hierro ferroso (Fe^{2+}) a hierro férrico (Fe^{3+}) por el oxígeno y ocurre en condiciones de bajo pH. En el tercer paso (iii), la pirita es oxidada con la ayuda de Fe^{3+} generada en el paso dos (ii). La oxidación de la pirita por Fe^{3+} genera más Fe^{2+} y éste a su vez se vuelve a oxidar mediante el paso dos (ii), de tal manera que el Fe^{3+} vuelve a oxidar a la pirita para generar más Fe^{2+} hasta que el agente oxidante (Fe^{3+}) en el sistema se haya agotado.

Bajo condiciones abióticas, la tasa de oxidación de la pirita (Figura 2.7) por el hierro férrico (Fe^{3+}) es controlada por la tasa de oxidación del hierro ferroso (Fe^{2+}), la cual decrece rápidamente con el decremento del pH. Por debajo de un pH=3, la oxidación de la pirita por el hierro férrico es de 10 hasta 100 veces más rápido que la oxidación producida por el oxígeno (Dold, 2010).

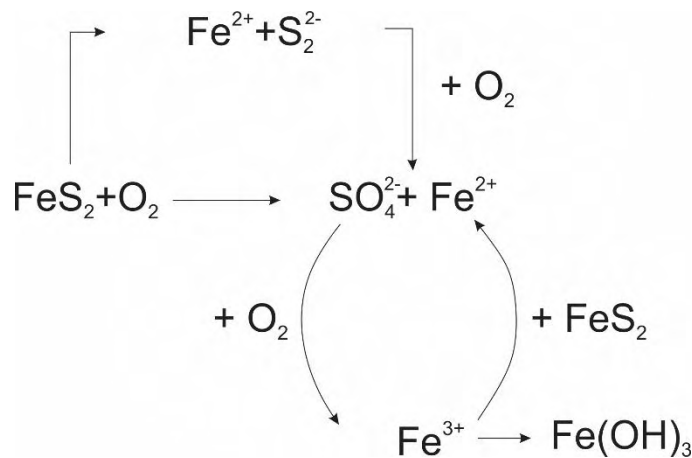
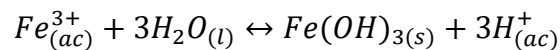


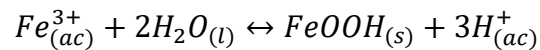
Figura 2.7 Diagrama simplificado de las rutas de oxidación para la pirita (Lottermoser, 2010).

Desde hace tiempo es bien sabido que microorganismos como las bacterias *Acidithiobacillus ferroxidans* y *Leptospirillum ferroxidans* obtienen energía a partir de la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} en donde dichas bacterias catalizan la reacción. Esto acelera la tasa de reacción de oxidación en esta etapa. Cuando el DAM rico en hierro ferroso y férrico llega a la superficie oxidada, comienza la hidrólisis y la precipitación de minerales metaestables como ferrihidrita (fh), schwertmannita (sh), goethita (gt), y jarosita (jt) en función de las condiciones de Eh-pH (Figura 2.8). Con un incremento en el pH en la solución, la concentración de Fe^{3+} disminuye forzando a que la solubilidad se limite a la precipitación de hidróxidos férricos ($Fe(OH)_3$) y oxyhidróxidos ($FeOOH$), es decir, si el pH aumenta a más de 3, las siguientes ecuaciones de reacción pueden ocurrir:

- Ecuación (iv)



- Ecuación (v)



La precipitación química de hidróxidos de hierro en las pasadas reacciones se les conoce como hidrólisis. La hidrólisis es un proceso químico donde las moléculas de agua reaccionan con cationes disueltos y estos cationes quedan enlazados con el grupo hidróxido y se liberan iones de hidrógeno. Bajo condiciones ácidas con un pH menor a 3, los iones de Fe^{3+} se quedan en solución y en valores más altos de un pH 3 ocurre la precipitación de hidróxidos de Fe^{3+} . Estos precipitados pueden formar películas y capas cementadas las cuales pueden disminuir la tasa de oxidación (Lottermoser, 2010).

Existen otros sulfuros que pueden producir cantidades significantes de ácido, los cuales se enlistan en la Tabla 2, donde se muestran las reacciones de oxidación de algunos sulfuros, precipitación de hidróxidos de hierro y aluminio y la disolución de minerales secundarios (sales eflorescentes).

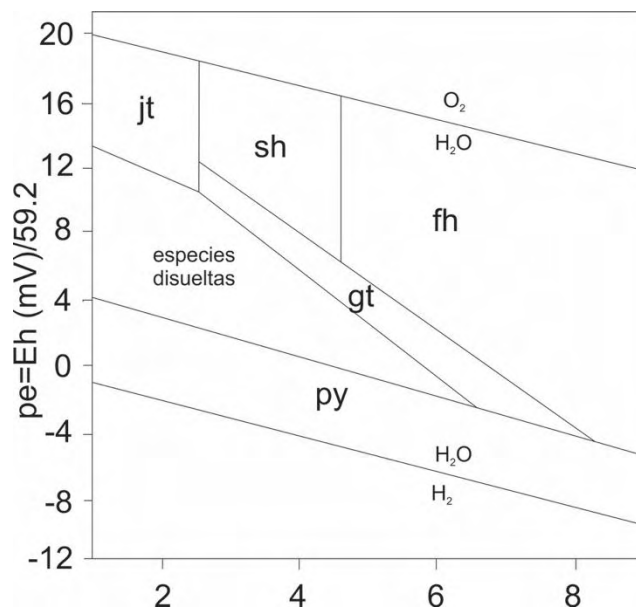


Figura 2.8 Diagrama de Eh-pH para el sistema Fe-S-K-O-H a 25°C, donde gt= goethita, jt= jarosita, sh= schwertmannita, fh= ferrihidrita y py= pirita. Tomado de Bigham et. al., 1996.

Tabla 2. Ejemplos de reacciones productoras de ácido de algunas especies minerales en jales mineros, (Lottermoser, 2010).

Minerales a intemperizar	Reacción química
1.- Oxidación completa de sulfuros ricos en Fe	
Pirita y marcasita	$FeS_{2(s)} + \frac{15}{4}O_{2(g)} + \frac{7}{2}H_2O_{(l)} \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 2SO_{4(ac)}^{2-} + 4H_{(ac)}^+$
Pirrotita	$Fe_{0.9}S_{(s)} + 2.175O_{2(g)} + 2.35H_2O_{(l)} \rightarrow 0.9Fe(OH)_{3(s)} + SO_{4(ac)}^{2-} + 2H_{(ac)}^+$
Calcopirita	$CuFeS_{2(s)} + \frac{15}{4}O_{2(g)} + \frac{7}{2}H_2O_{(l)} \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 2SO_{4(ac)}^{2-} + Cu_{(ac)}^{2+} + 4H_{(ac)}^+$
Bornita	$Cu_3FeS_4_{(s)} + \frac{31}{4}O_{2(g)} + \frac{7}{2}H_2O_{(l)} \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 4SO_{4(ac)}^{2-} + 3Cu_{(ac)}^{2+} + 4H_{(ac)}^+$
Arsenopirita	$FeAsS_{(s)} + \frac{7}{2}O_{2(g)} + 3H_2O_{(l)} \rightarrow FeAsO_4 \cdot 2H_2O_{(l)} + SO_{4(ac)}^{2-} + 2H_{(ac)}^+$
Esfalerita rica en Fe	$(Zn, Fe)S_{(s)} + 3O_{2(g)} + H_2O_{(l)} \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + SO_{4(ac)}^{2-} + Zn_{(ac)}^{2+} + 2H_{(ac)}^+$
2. Precipitación de hidróxidos de Fe³⁺ y Al³⁺	
Hidróxidos de hierro	$Fe_{(ac)}^{3+} + 3H_2O_{(l)} \leftrightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 3H_{(ac)}^+$
Hidróxidos de aluminio	$Al_{(ac)}^{3+} + 3H_2O_{(l)} \leftrightarrow Al(OH)_{3(s)} + 3H_{(ac)}^+$

3. Disolución de minerales secundarios (sulfatos y sales hidroxisulfatadas de Fe²⁺, Mn²⁺, Fe³⁺ y Al³⁺)

Halotriquita	$FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O_{(s)} + 0.25O_{2(g)} \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 2Al(OH)_{3(s)} + 13.5H_2O_{(l)} + 4SO_{4(ac)}^{2-} + 8H_{(ac)}^+$
Römerita	$Fe_3(SO_4)_4 \cdot 14H_2O_{(s)} \leftrightarrow 2Fe(OH)_{3(s)} + Fe_{(ac)}^{2+} + 8H_2O_{(l)} + 4SO_{4(ac)}^{2-} + 6H_{(ac)}^+$
Coquimbita	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O_{(s)} \rightarrow 2Fe(OH)_{3(s)} + 3H_2O_{(l)} + 3SO_{4(ac)}^{2-} + 6H_{(ac)}^+$
Melanterita	$FeSO_4 \cdot 7H_2O_{(s)} + 0.25O_2 \rightarrow Fe(OH)_{3(s)} + 4.5H_2O_{(l)} + SO_{4(ac)}^{2-} + 2H_{(ac)}^+$
Jurbanita	$Al(SO_4)(OH) \cdot 5H_2O_{(s)} \rightarrow Al(OH)_{3(s)} + 3H_2O_{(l)} + SO_{4(ac)}^{2-} + H_{(ac)}^+$
Jarosita	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_{6(s)} + 3H_2O_{(l)} \rightarrow K_{(ac)}^+ + 3Fe(OH)_{3(s)} + 2SO_{4(ac)}^{2-} + 3H_{(ac)}^+$
Alunita	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_{6(s)} + 3H_2O_{(l)} \rightarrow K_{(ac)}^+ + 3Fe(OH)_{3(s)} + 2SO_{4(ac)}^{2-} + 3H_{(ac)}^+$

2.1.5 Reacciones reguladoras de ácido (neutralización)

La oxidación de la pirita, la precipitación de hidróxidos de hierro y aluminio y la disolución de algunos minerales secundarios liberan hidrógeno en la solución, lo que hace que incremente la acidez de la solución, a menos que este hidrógeno sea consumido a través de reacciones de amortiguamiento. Los minerales formadores de roca, en este caso los de ganga, tienen la capacidad de regular la acidez de una solución (consumir H⁺), algo común durante el intemperismo de silicatos, carbonatos e hidróxidos.

Las reacciones que regulan la acidez ocurren bajo las mismas condiciones oxidantes que causan el intemperismo de los sulfuros. Sin embargo, a diferencia de las reacciones de oxidación de sulfuros, estas reacciones de neutralización son independientes de la concentración de oxígeno de la fase gaseosa o acuosa en donde ocurre el intemperismo. Los minerales de ganga involucrados en este proceso se disuelven a diferentes condiciones de pH, y por lo tanto, las reacciones de neutralización ocurren a diferentes valores de pH (Figura 2.9).

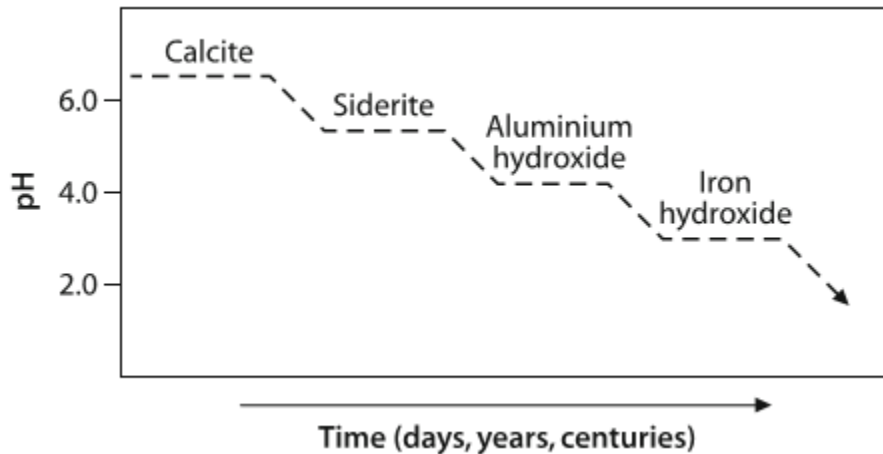
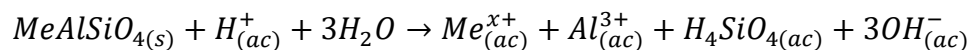


Figura 2.9 Capacidad de neutralización de algunos minerales de ganga en un jal minero hipotético. Tomado de Salomons (1995).

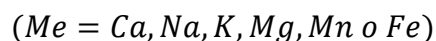
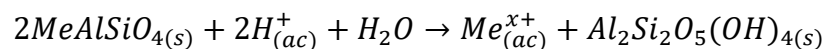
2.1.5.1 Silicatos

Los silicatos, que son los principales minerales formadores de roca en la corteza, son el más grande reservorio para desarrollar reacciones de neutralizadora en el ambiente. El intemperismo químico de los silicatos hace que consuman H^+ y lo pueden hacer de diversas maneras, una de ellas es llamado intemperismo incongruente, que ocurre en la mayoría de los silicatos y consiste básicamente en la alteración de los mismos para formar otra fase mineral. La composición química de los olivinos, piroxenos, anfíboles, granates, feldespatos, feldespatoides, arcillas y micas se restringe a un rango de elementos. Por lo tanto los dos tipos de reacciones de intemperismo se pueden representar de la siguiente forma (Dold, 2010; Lottermoser, 2010):

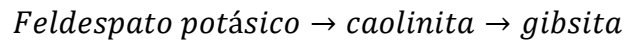
- Ecuación (vi)



- Ecuación (vii)

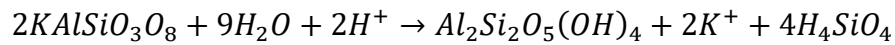


Las reacciones de disolución de aluminosilicatos consume H^+ , el cual a su vez disuelve cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Na^+ , K^+ , Si^{4+} y Al^{3+} en los jales mineros. La disolución de este tipo de minerales es más lenta que los hidróxidos metálicos y mucho más lenta que los carbonatos. El intemperismo de los feldespatos está controlado principalmente por pH, Si, Na, K y concentraciones de Ca (Dold, 2010). Un posible camino de intemperismo es el siguiente:



el cual se representa en la Fig. 2.10. Las reacciones involucradas en el proceso son las siguientes:

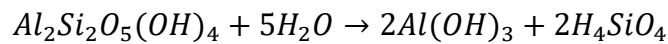
- Ecuación (viii)



Feldespato

Caolinita

- Ecuación (ix)

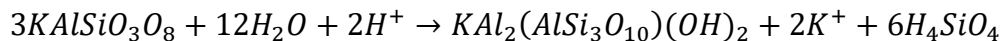


Caolinita

Gibsita

A un pH y concentraciones de K más elevados, la muscovita teóricamente se puede formar en lugar de caolinita como mineral secundario a partir del feldespato potásico:

- Ecuación (x)

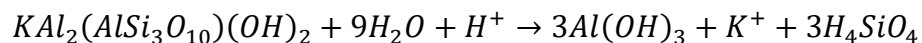


Feldespato

Muscovita

Y la muscovita reacciona para formar gibsita

- Ecuación (xi)



Muscovita

Gibsita

El cuarzo, calcedonia, ópalo y otros minerales de silicio no consumen H⁺ cuando se intemperizan para formar ácido silícico. El ácido silícico es muy débil y no contribuye de manera significativa al aumento de H⁺ en la solución:

- Ecuación (xii)

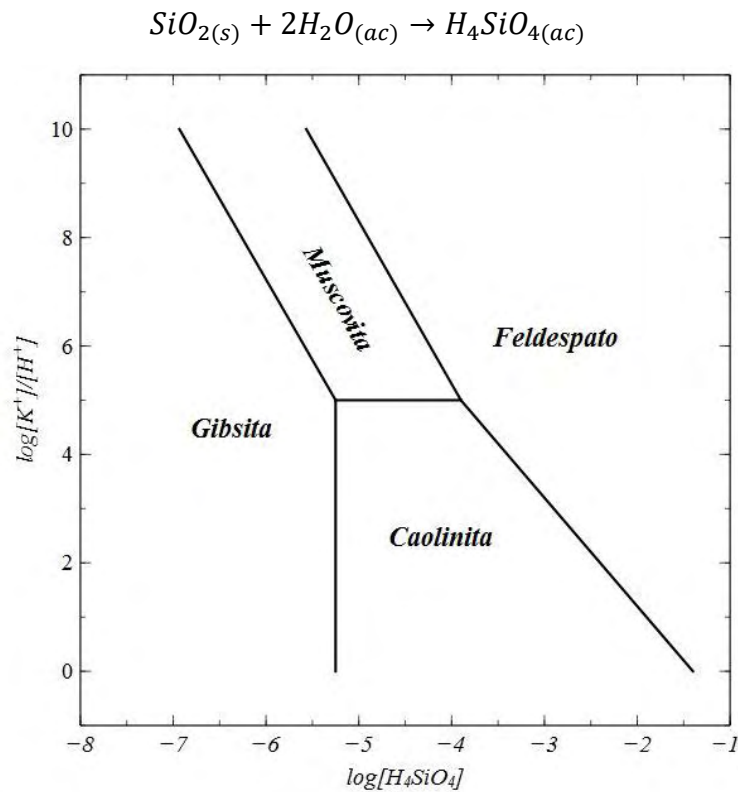
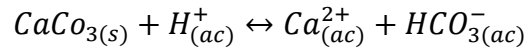


Figura 2.10 Campos de estabilidad de los minerales gibbsita, muscovita, caolinita y feldespato debido al intemperismo químico.

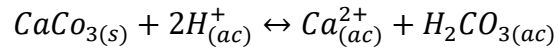
2.1.5.2 Carbonatos

Los carbonatos juegan un papel sumamente importante en las reacciones de neutralización de soluciones ácidas. Minerales como la calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)₂), ankerita (Ca(Fe, Mg)(CO₃)₂) o magnesita (MgCO₃) neutralizan el ácido generado por la oxidación de sulfuros. La calcita es el agente neutralizador más importante porque se encuentra en una amplia variedad de ambientes geológicos. Este mineral neutraliza el ácido disolviendo el H⁺ y para formar bicarbonato (HCO₃⁻) y ácido carbónico (H₂CO₃) (Dold, 2010; Lottermoser, 2010):

- Ecuación (xiii)



- Ecuación (xiv)



La especiación de los carbonatos es dependiente del pH y la disolución de la calcita incrementa la cantidad de carbonato en la solución, aumentando con ello el potencial de neutralización de la solución. Cuando la neutralización avanza y se alcanzan valores de pH altos, la calcita puede precipitar como mineral secundario (Figura 2.11).

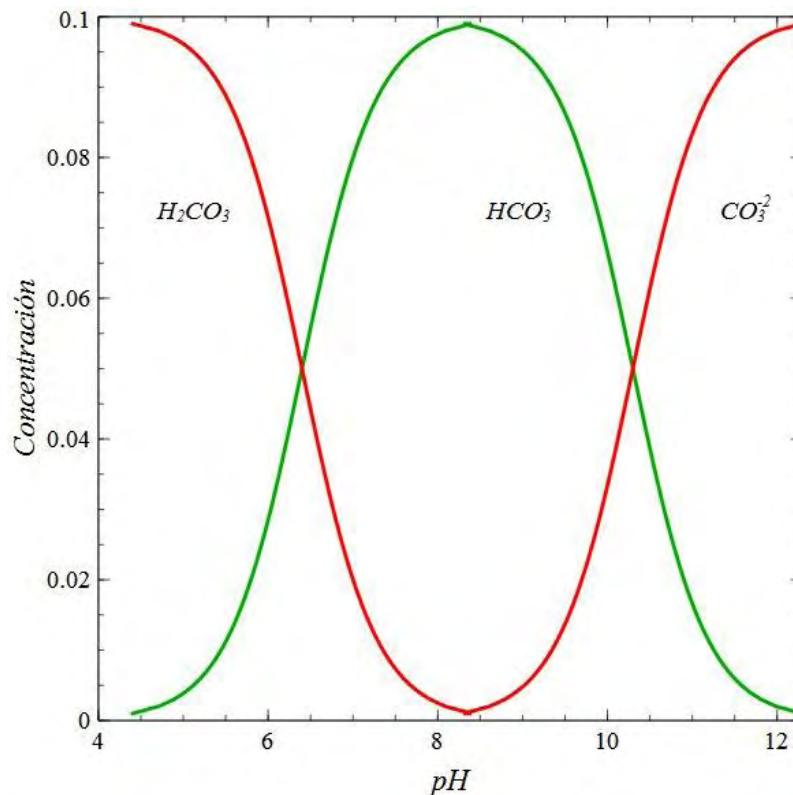


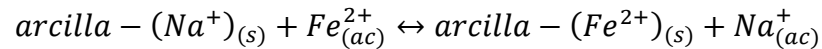
Figura 2.11 Distribución de las especies solubles en un sistema acuoso de carbonato contra pH, para una concentración de 0.1 M.

2.1.5.3 Arcillas

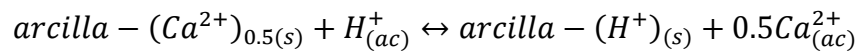
La fuente final de neutralización son los cationes presentes en los sitios de cationes intercambiables de algunas micas, arcillas y materia orgánica. Estos cationes intercambiables

pueden ser reemplazados por los cationes disueltos en los procesos de intemperismo; los iones de H^+ y Fe^{2+} son los cationes que competirán por estos sitios. Los nuevos iones de H^+ y Fe^{2+} generados son removidos de la solución y temporalmente absorbidos dentro de los sitios de cationes intercambiables en la fase sólida, y estas reacciones que ocurren en las arcillas pueden representarse de la siguiente manera:

- Ecuación (xv)

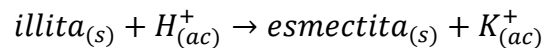


- Ecuación (xvi)



Inclusive algunas arcillas pueden transformarse en estado sólido durante los procesos de lixiviación donde la illita rica en potasio consume H^+ y se puede transformar a una esmectita libre de potasio.

- Ecuación (xvii)



2.1.5.4 Tasas de reacción

La tasa de intemperismo para cada mineral en un jal minero está influenciado por: (a) composición química del mineral, características cristalográficas del cristal, área de la superficie y perfección del cristal; (b) el pH y el CO_2 disuelto en la solución, (c) temperatura, (d) condiciones redox y (e) acceso a agentes de intemperismo. La Tabla 3 muestra la *vida promedio* de algunas especies minerales en años con respecto al intemperismo, y la Tabla 4 muestra la reactividad relativa de algunos grupos minerales en condiciones de un pH de 5.

Tabla 3 Vida promedio de algunas especies minerales a 25°C y pH 5. Tomado y modificado de Lottermoser (2010).

Mineral	Vida promedio (años)	Mineral	Vida promedio (años)
Calcita	0.43	Sanidino	291,000
Wollastonita	79	Albita	575,000
Anortita	112	Prehnita	579,000
Nefelinita	211	Microclina	921,000
Forsterita	2,300	Epidota	923,000
Diopsida	6,800	Muscovita	2,600,000
Enstatita	10,100	Kaolinita	6,000,000
Gibsita	276,000	Cuarzo	34,000,000

Tabla 4 Agrupamiento de minerales en base a su reactividad relativa a un pH 5. Tomado de Dold, 2010.

Grupo Mineral	Reactividad relativa a un pH 5	Minerales típicos
Se disuelven	1.00	Calcita, aragonita, dolomita, magnesita, brucita, halita.
Intemperismo rápido	0.60	Anortita, nefelinita, olivino, granate, jadeita, leucita, espodumeno, diopsida, wollastonita.
Intemperismo intermedio	0.40	Ortosilicatos (epidota, zoisita), silicatos en cadena (enstatita, hiperstena, hornblenda, glaucófano, tremolita, actinolita, antofilita), filosilicatos (serpentinita, crisotilo, clorita, biotita, talco).
Intemperismo lento	0.02	Tectosilicatos (albita, oligoclasa, labradorita), filosilicatos (vermiculita, montmorillonita, caolinita), gibsita.
Intemperismo muy lento	0.01	Feldespatos potásico, muscovita.
Inertes	0.004	Cuarzo, rutilo, circón.

2.1.6 Drenaje ácido de mina

El agua es un recurso esencial para la actividad minera, su extracción mediante agua superficial y acuíferos es necesaria para los procesos de extracción mineral. Cuando el agua utilizada en los procesos de extracción mineral ya no es necesaria, se deposita actualmente en presas de jales donde entra en contacto con especies minerales (por ejemplo sulfuros) y los disuelve. Cuando los sulfuros entran en contacto con el aire y el agua, éstos se oxidan y liberan H^+ lo cual genera el Drenaje Ácido de Mina (DAM). Este fenómeno es el problema ambiental más grande que sufre la actividad minera en materia de calidad de agua, las reacciones involucradas en la oxidación de sulfuros son autocatalíticas por lo cual una vez que el DAM es generado es muy difícil detener el proceso. El DAM en los casos más comunes puede generarse en las primeras décadas después de la oxidación de los sulfuros y así ir en decremento con respecto a la concentración de elementos tóxicos. En el peor de los casos, el DAM puede continuar por miles de años, como por ejemplo, en Río Tinto, España (Lottermoser, 2010).

Caracterizado por un bajo pH y una alta concentración de elementos pesados y otros elementos tóxicos, el DAM puede contaminar severamente aguas superficiales, aguas subterráneas y suelos, y traer consigo problemas a la salud humana e impactos ecológicos (Akciil y Koldas, 2006).

2.1.6.1 Ocurrencia

El DAM es un proceso que ocurre bajo condiciones de pH bajo, el cual genera materiales con alta conductividad eléctrica, altas concentraciones de hierro, aluminio y manganeso, y otros elementos tóxicos. Los procesos involucradas están ilustradas por las reacciones de oxidación de la pirita (FeS_2), mencionadas anteriormente en las ecuaciones (i)-(v). Todas las ecuaciones anteriores con excepción de la ecuación (ii) y (iv), asumen que la oxidación de la pirita es debido a la presencia de oxígeno.

Los factores primarios que determinan la tasa de generación de drenaje ácido de mina son los siguientes:

- pH
- Temperatura

-
- Contenido de oxígeno en la fase gaseosa
 - Concentración de oxígeno en la fase acuosa
 - Grado de saturación en el agua
 - Actividad química del Fe^{3+}
 - Área expuesta de los sulfuros metálicos
 - Energía de activación química requerida para iniciar la generación de ácido
 - Actividad bacteriana

2.1.6.2 Fuente

La minería de algunos yacimientos metálicos (Cu, Pb, Zn, Au, Ni, U, Fe), yacimientos de fosfatos, carbón, entre otros, tienen una potencial exposición a la oxidación de sulfuros y por tanto pueden generar DAM. Las pilas de almacenamiento, presas de jales, terreros y pilas de lixiviación son fuentes potenciales para la generación de este tipo de drenaje, tanto en mina subterránea, tajo abierto, socavones mineros, pozos, paredes de fosa y en pisos de pozos. En estos sitios, las aguas mineras se vuelven ácidas a través de reacciones del agua meteórica o agua subterránea al entrar en contacto con los sulfuros (Figura 2.12).

De esta manera el DAM puede generarse como resultado de diversos procesos (Lottermoser, 2010):

- Entrada de agua a minas subterráneas localizadas por debajo del nivel freático y su salida por medio de bombeo.
- Entrada de agua a pozos y excavaciones superficiales.
- La precipitación meteórica que entra en contacto las paredes de los pozos.
- Infiltración de aguas meteóricas a pilas de almacenamiento, pilas de lixiviación y terreros de desperdicio de rocas.
- Lluvias de escorrentía que interaccionan con superficies mineras, procesados minerales y operaciones metalúrgicas.
- El agua superficial y fluidos de poro en jales mineros, pilas de lixiviación, pilas de almacenamiento, y terreros que pueden infiltrarse y migrar dentro de acuíferos.

- Descargas controladas y no controladas de aguas procesadas en jales mineros, presas de jales, estanques y pilas de lixiviación.

El DAM puede formarse rápidamente con alto contenido de hierro y valores bajos de pH que suelen aparecer en cuestión de semanas o meses. Sin embargo, la generación de DAM es independiente del clima y ha sido encontrado en sitios mineros con climas áridos a tropicales desde el Círculo Ártico hasta el Ecuador (Lottermoser, 2010). Por otra parte, no todas las operaciones mineras están expuestas a la oxidación de sulfuros y la generación del DAM. Por esta razón, la liberación de contaminantes al ambiente no es exclusiva de los procesos de drenaje ácido de mina.

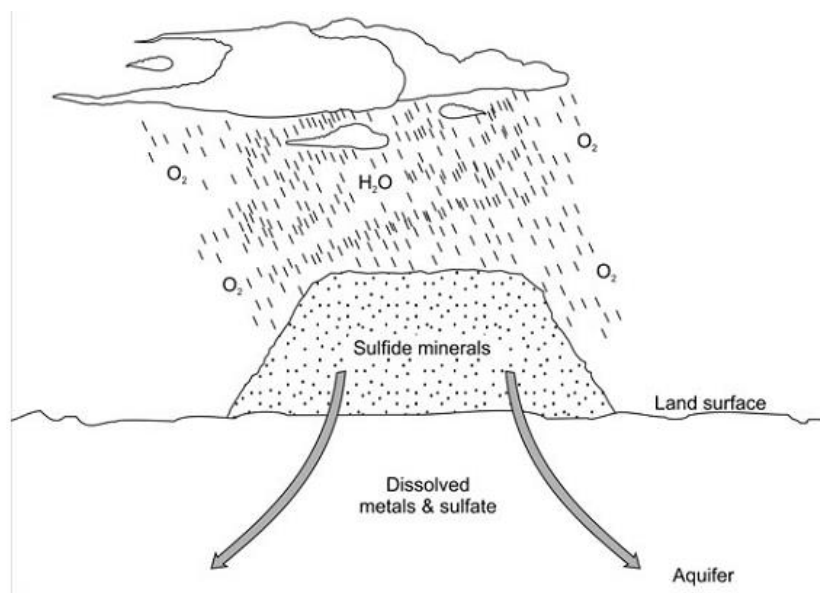


Figura 2.12 Modelo conceptual de la oxidación de sulfuros y el desarrollo de DAM en jales mineros (Tomado de Lottermoser, 2010).

2.1.6.3 Caracterización y clasificación

Los constituyentes disueltos en el agua utilizada en la actividad minera son numerosos, y por lo tanto, estas aguas son altamente variables en composición. Dependiendo del yacimiento minado y de los aditivos químicos utilizados en los procesos hidrometalúrgicos, diferentes elementos y compuestos necesitarán ser determinados para cada sitio minero. Independientemente de los minerales de mena extraídos y las técnicas hidrometalúrgicas aplicadas, los cationes mayores

(Al³⁺, Si⁴⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺) y aniones (Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻) son componentes importantes en cualquier tipo de agua utilizada en sitios mineros.

No existe una composición típica para el agua involucrada en los procesos de generación de DAM, y por lo tanto la clasificación de estas aguas es difícil de emplear. Se han propuesto diversos tipos de clasificaciones para el drenaje ácido de mina donde se incluyen algunos parámetros:

- *Cationes y aniones mayores.* Esta técnica caracteriza el agua superficial y subterránea en base a la concentración de cationes mayores (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺) y aniones mayores (Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻) en un diagrama llamado Piper.
- *pH.* Esquema básico en base al pH y se pueden clasificar en acidas, alcalinas, neutral y otras (Tabla 5)
- *pH y concentraciones de Fe²⁺ y Fe³⁺.*
- *pH vs. Metales combinados.* Es una clasificación que se basa en los valores de pH y el contenido de metales disueltos (Figura 2.13).
- *Alcalinidad vs. Acidez.*
- *Alcalinidad vs. Acidez y concentración de sulfatos.*

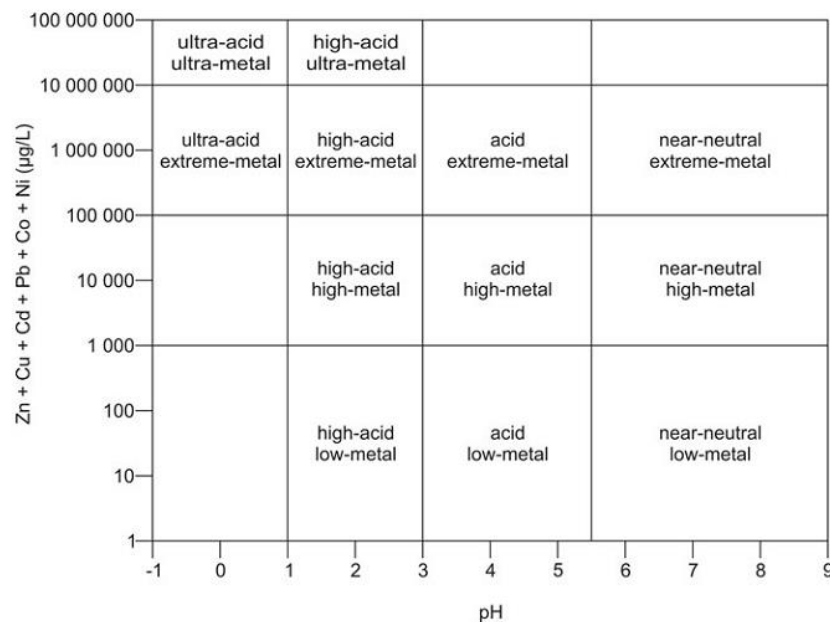


Figura 2.13 Diagrama de clasificación geoquímica de aguas de mina basado en la suma de metales disueltos (Zn, Cu, Cd, Pb, Co, Ni) y pH. Tomado de Ficklin et. al., 1992.

Tabla 5 Clasificación de aguas de minas basado en el pH (Tomado de Lottermoser, 2010).

Clase	Características
<i>Extremadamente ácido</i>	pH<1. Ejemplos extremos de acidez generada a través de reacciones de oxidación de sulfuros e hidrólisis.
<i>Ácido</i>	pH< 5.5. Acidez generada a través de la oxidación de sulfuros ricos en Fe. Comúnmente encontrado en minas de metales base, oro y carbón.
<i>Neutral a alcalino</i>	pH 6-10. Las reacciones de producción de ácido y amortiguadoras se mantienen en balance o se encuentran ausentes sulfuros ricos en Fe. El drenaje se puede volver ácido o alcalino con el tiempo. Altos niveles de alcalinidad generada por la disolución de carbonatos, óxidos alcalinos, hidróxidos y silicatos. Comúnmente encontrado en minas de diamante, metales base, oro, uranio, hierro, carbón y arenas.
<i>Salino</i>	pH altamente variable con la influencia de concentraciones de iones acuosos. Asociado con la minería de carbón, minerales industriales, incluyendo evaporitas, sales de potasa, halita y boratos.

2.2 Sales eflorescentes

El proceso de eflorescencia es muy común en pasivos mineros abandonados o con un control antropogénico en condiciones de drenaje ácido de mina. Se han reportado en diferentes partes del mundo incluyendo México, en condiciones climáticas diferentes pero generalmente coincide que las eflorescencias ocurren en las épocas de sequías, donde la evaporación es mayor que la precipitación.

La eflorescencia es un proceso fisicoquímico donde sales hidratadas o elementos móviles migran hacia la superficie a través de materiales porosos y se establecen en forma de películas delgadas que recubren el medio por donde se transportan. Esto ocurre cuando la presión del vapor de agua del mineral hidratado es mayor que la presión parcial del vapor de agua del aire (Encyclopedia Britannica, 2015). El proceso comprende la disolución de una sal retenida internamente en el agua, u ocasionalmente en otro solvente; el agua con la presencia de esta sal

retenida en solución migra hacia la superficie, después se evapora y al final deja una fina película de sal evaporada (Figura 2.14).

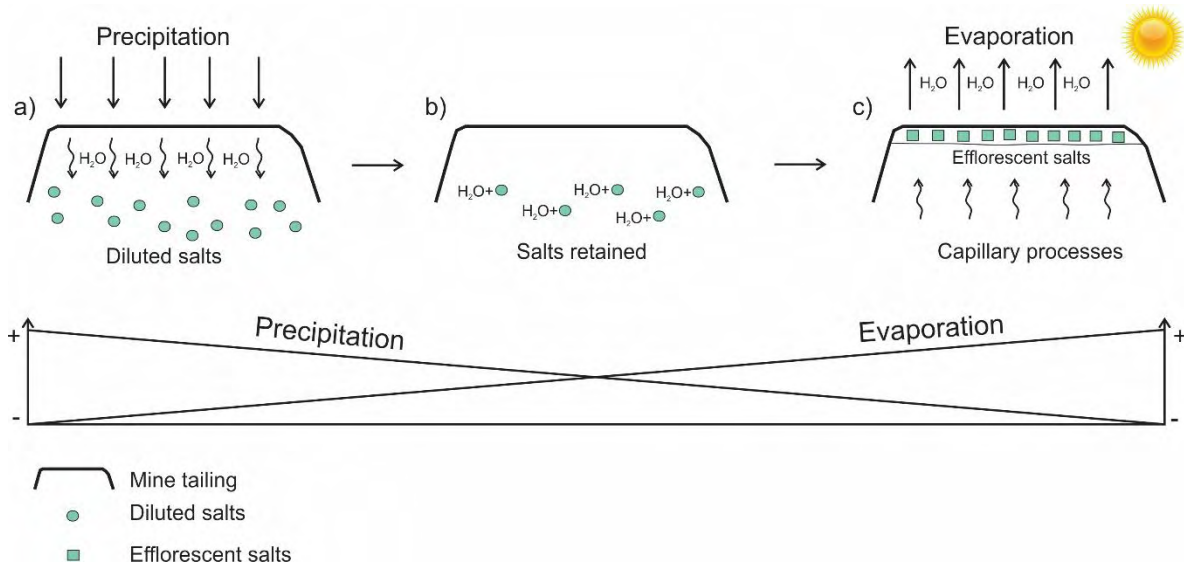


Figura 2.14 Esquema del proceso de eflorescencia, a) en periodos de lluvia la precipitación aporta agua al medio y se percola hasta llegar a donde se encuentran las sales o sulfatos disueltos, b) el agua ya infiltrada retiene los minerales secundarios en solución, c) la evaporación promueve la migración de las sales en solución por la vía capilar hasta llegar a la superficie y cristalizar en forma de eflorescencias.

Este proceso ocurre en muchas condiciones tanto industriales, naturales y antropogénicas, como es el caso de jales mineros. En Estados Unidos, el fenómeno de eflorescencia suele ser un problema en las construcciones, ya que el cemento con el que edifican sus viviendas contiene sulfatos alcalinos (Na_2SO_4 y K_2SO_4) que al momento de migrar vía capilaridad, forman eflorescencias que cristalizan en las paredes de los edificios. Este problema puede llegar a ser costoso a largo plazo si no se atiende con tiempo. Esto puede ocurrir también de manera natural, como por ejemplo, en los salares en zonas desérticas, donde cristalizan una variedad de minerales evaporíticos en dependencia de la química de la cuenca donde se encuentran. En jales mineros, el proceso de eflorescencia está controlado por factores fisicoquímicos y climáticos, y la composición y mineralogía del jal minero (Figura 2.15).

En analogía con el impacto económico que puede llegar a tener el proceso de eflorescencia en construcciones, existe un impacto ambiental y de salud para el humano cuando se forman en jales mineros. Al ser minerales de baja simetría y estabilidad, altamente solubles y con propiedad de sorción, pueden adherir a su estructura elementos potencialmente tóxicos como Pb, Cd, Zn, Cu y

As que a su vez pueden transportarse fácilmente vía aérea e hídrica, dejando estos EPT (elementos potencialmente tóxicos) biodisponibles a los humanos.

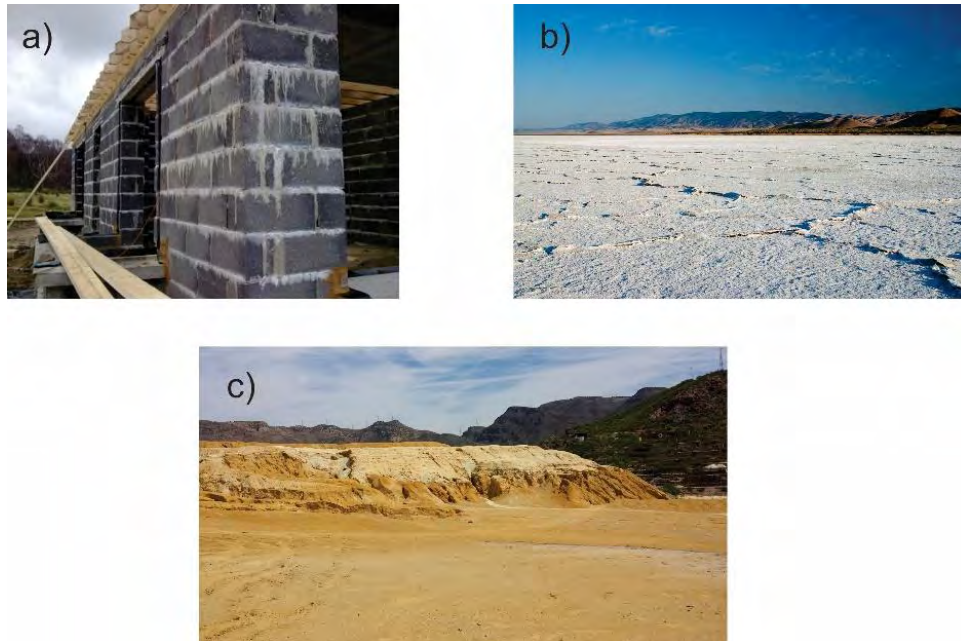


Figura 2.15 a) Eflorescencias presentes en construcciones por el alto contenido de sulfatos alcalinos y potásicos, b) acumulación de evaporitas en la cuenca endorreica de Soda Lake en California EUA, c) sales eflorescentes superficiales en la presa de jales I en Nacozeni de García, Sonora, México.

El intemperismo de sulfuros libera sulfatos, metales, metaloides y otros elementos en la solución acuosa. Esta agua puede entrar en contacto con otros sulfuros y así acelerar el proceso de oxidación (reacciones productoras de ácido), pero a su vez puede entrar en contacto con minerales de ganga que pueden neutralizar el ácido (reacciones de neutralización). De esta manera, este tipo de reacciones generadoras de ácido, neutralizadoras y no generadoras de ácido, liberan de manera significativa cationes y aniones disueltos dentro de la solución y el agua se vuelve salina. Algunos iones se pueden quedar dentro de la solución de forma iónica hasta entrar en contacto con minerales del grupo de los filosilicatos (clorita, talco, illita, esmectita) y ser absorbidos. Los iones restantes tenderán a interactuar con la solución que intemperiza hasta alcanzar nivel de saturación, lo que ocasionará la precipitación de minerales secundarios, como las sales eflorescentes en los jales mineros.

La formación de sales eflorescentes es la forma más común de fijación de elementos dentro de los poros de agua de jales sulfúricos. La precipitación de estas sales no se limita sólo a jales mineros; algunas sales pueden alcanzar niveles de saturación en aguas subterráneas, ríos y en

lixiviados asociados al intemperismo de desperdicios ricos en sulfuros. De esta manera, existe una amplia variedad de sales eflorescentes que precipitan en jales mineros y en ambientes de drenaje ácido de mina.

Se conoce bien que las eflorescencias son de textura fina, en muchos de los casos, con una variación de color dependiendo de su composición química, con apariencia de caliche y que son productos salinos o sulfatados resultados de la evaporación. Sin embargo, las condiciones requeridas para su formación no son simples y se necesitan ciertas condiciones específicas para que el proceso ocurra.

- Primero: se necesita que existan sales solubles en agua en el medio a estudiar (jales mineros, paredes de construcciones, etc.)
- Segundo: la textura del medio debe ser la necesaria para retener las sales en una solución soluble, es decir que los sedimentos donde estas sales se encuentren sean de tamaños de arenas finas hasta arcillas.
- Tercero: debe de existir una vía para que las sales solubles puedan migrar hacia la superficie, después evaporarse al contacto con el aire y finalmente cristalizar para formar la eflorescencia. Es decir el medio debe ser un tanto heterogéneo el cual tenga zonas con texturas más gruesas para que las sales, por capilaridad, puedan movilizarse.

Si algunas de estas tres condiciones no existe, el proceso de eflorescencia no se puede llevar a cabo. Además de estas condiciones, estudios previos demuestran que existen otros parámetros fisicoquímicos y climáticos que condicionan la formación de sales eflorescentes (Dold y Fontboté, 2001). El pH, Eh y saturación de agua en el medio son algunos de los factores fisicoquímicos que promueven la formación de las eflorescencias, sin embargo, el aspecto climático es un parámetro de gran importancia.

En climas templados donde la precipitación es mayor que la evaporación el proceso más común asociado a la oxidación de jales mineros es el drenaje ácido de mina (DAM) o drenaje ácido de roca (DAR), el cual es principal problema ambiental actualmente de la actividad minera global. La

migración y movilidad de elementos en jales mineros ubicados en este tipo de climas ocurre por infiltración hacia aguas subterráneas y mantos acuíferos.

Por otra parte, en climas áridos y semiáridos el DAM es expresado por la presencia de sales eflorescentes de manera superficial, ya que el proceso de formación de dichas sales ocurre vía capilar a través de los poros del material del jal. Generalmente la formación de neominerales salinos y sulfatados en jales mineros en climas áridos son de baja cristalinidad por su formación a temperatura ambiente, por lo cual son susceptibles a la dispersión eólica y con ello hacerse biodisponibles de manera respiratoria y/o digestiva para el ser humano.

2.2.1 Mineralogía secundaria pre-minera y post-minera

El intemperismo de los sulfuros puede ocurrir antes, durante y después de la actividad minera. Por lo tanto se debe de realizar una distinción entre aquellos minerales secundarios formados por procesos naturales con respecto al yacimiento mineral y aquellos formados después de que la actividad minera ha comenzado. La Tabla 6 contiene algunos de los minerales pre- y post-mineros que se pueden encontrar en jales mineros.

Tabla 6 Ejemplos de minerales secundarios pre- y post-mineros (tomado de Alpers et. al., 1994).

1 Sulfatos

1.1 Sulfatos metálicos simples hidratados con cationes metálicos divalentes

Mineral	Fórmula
Poitevinita	$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Grupo de melanterita	
Melanterita	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Boothita	$\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Bieberita	$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Mallardita	$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Grupo de epsomita	
Epsomita	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Morenosita	$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Goslarita	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Grupo de hexahidrita	
Hexahidrita	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Ferrohexahidrita	$\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Chvaleticeita	$\text{MnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Moorhouseita	$\text{CoSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Bianchita	$ZnSO_4 \cdot 6H_2O$
<i>Grupo de la calcantita</i>	
Calcantita	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$
Pentahidrita	$MgSO_4 \cdot 5H_2O$
Siderotil	$FeSO_4 \cdot 5H_2O$
<i>Grupo de la rozenita</i>	
Rozenita	$FeSO_4 \cdot 4H_2O$
Starkeyita	$MgSO_4 \cdot 4H_2O$
Boyleita	$ZnSO_4 \cdot 4H_2O$
<i>Grupo de la kieserita</i>	
Kieserita	$MgSO_4 \cdot H_2O$
Szomolnokita	$FeSO_4 \cdot H_2O$
Gunningita	$ZnSO_4 \cdot H_2O$

1.2 Sulfatos metálicos simples hidratados con cationes metálicos trivalentes

Kornelita	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$
Coquimbita	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$
Alunogen	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$
Romboclasa	$HFe(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$
Butlerita	$FeSO_4(OH) \cdot 2H_2O$

1.3 Sulfatos metálicos hidratados con cationes trivalentes y divalentes mezclados

Römerita	$Fe_3(SO_4)_4 \cdot 14H_2O$
<i>Grupo de la halotriquita</i>	
Halotriquita	$FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$
Pickeringita	$MgAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$
Apjohnita	$MnAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$
Dietriquita	$(Zn, Fe, Mn)Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$
Bilinita	$Fe_3(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$

Grupo de la copiapita

Copiapita	$Fe_5(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$
Ferricopiapita	$Fe_5(SO_4)_6O(OH)_2 \cdot 20H_2O$

1.4 Otros sulfatos e hidroxisulfatos

Anglesita	$PbSO_4$
Barita	$BaSO_4$
Estroncionita	$SrSO_4$
Anhidrita	$CaSO_4$
Bassanita	$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Tenardita	Na_2SO_4
Aftitalita	$NaK_3(SO_4)_2$

Voltaita	$K_2Fe_8Al(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$
Tamarugita	$NaAl(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
Konyaita	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 5H_2O$
Blödita	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$
Löwita	$Na_{12}Mg_7(SO_4)_{13} \cdot 15H_2O$
Eugsterita	$Na_4Ca(SO_4)_3 \cdot 2H_2O$
Syngenita	$K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$
Antlerita	$Cu_3(SO_4)(OH)_4$
Brocantita	$Cu_4(SO_4)(OH)_6 \cdot 2H_2O$

2 Óxidos, hidróxidos y arsenatos

Minerales de Fe

Goethita	$\alpha\text{-FeOOH}$
Lepidocrocita	$\gamma\text{-FeOOH}$
Ferroxihita	$\delta\text{-FeOOH}$
Akaganeita	$\beta\text{-FeOOH}$
Ferrihidrita	$Fe_5HO_8 \cdot 4H_2O$

Minerales de Al

Gibsita	$\gamma\text{-AlO(OH)}$
Diasporo	$\alpha\text{-AlO(OH)}$

Minerales de Cu

Tenorita	CuO
Cuprita	Cu_2O

Minerales de As

Escorodita	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$
Mansfeldita	$Al(AsO_4) \cdot 2H_2O$
Rauentalita	$Ca_3(AsO_4)_2 \cdot 10H_2O$
Arsenolita	As_2O_3
Claudetita	As_2O_3

Minerales de Sb

Cervantita	Sb_2O_4
Valentinita	Sb_2O_3
Senarmontita	Sb_2O_3

3 Carbonatos

Calcita	$CaCO_3$
Magnesita	$MgCO_3$
Siderita	$FeCO_3$
Ankerita	$Ca(Fe, Mg)(CO_3)_2$
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$
Smithsonita	$ZnCO_3$
Otavita	$CdCO_3$
Cerusita	$PbCO_3$

Malaquita	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
Hidrozinca	$\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$
Auricalcita	$(\text{Zn,Cu})(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$

4 Silicatos

Nacrita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Kaolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Planqueita	$\text{Cu}_8\text{Si}_8\text{O}_{22} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Dioptasa	$\text{Cu}_6\text{Si}_6\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

5 Elementos Nativos

Azufre nativo	S
Cobre nativo	Cu

La oxidación de sulfuros antes de la actividad minera puede formar minerales secundarios, por ejemplo, si el yacimiento mineral ha sido expuesto a erosión e intemperismo, las aguas superficiales pueden descender hasta zonas no saturadas y formar minerales secundarios en una capa oxidada superficial. Por otra parte, la oxidación de sulfuros durante y después de la actividad minera también formará minerales secundarios producto de la exposición e intemperismo de los desperdicios mineros a la atmósfera. Estos productos post-mineros ocurren como cementos y masas dentro de los montículos de desperdicios y también como costras que se forman cerca de la superficie del agua. La superficie de minerales precipitados es mejor conocido como “eflorescencia” (Lottermoser, 2011).

La precipitación de minerales secundarios post-mineros toma lugar en respuesta a los siguientes procesos (Lottermoser, 2010):

- Oxidación e hidrólisis de cationes disueltos (Fe^{2+}).
- Hidrólisis de cationes disueltos (Fe^{3+} , Al^{3+}).
- Reacción del drenaje ácido de mina con minerales neutralizadores o aguas alcalinas.
- Mezcla de aguas de drenaje ácido de mina con aguas con pH neutro.
- Oxidación de sulfuros con aire húmedo o seco.

- Concentración elemental del drenaje ácido de mina debido a la evaporación.

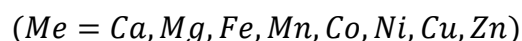
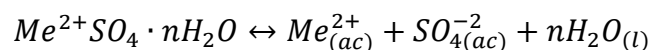
El mecanismo de evaporación es muy importante para la formación de sales eflorescentes. Este proceso concentra aniones y cationes en las aguas de mina hasta que alcanza una saturación mineral, lo que propicia la formación de minerales secundarios. En general los sulfatos son cristalinos, pero el principal problema para identificarlos es por la mezcla con otras fases y su tamaño tan pequeño. En las fases iniciales, los minerales precipitados tienden a ser sub-cristalinos y metaestables que pueden convertirse a minerales más estables conforme el tiempo.

2.2.2 Solubilidad de sales eflorescentes

Algunos minerales secundarios son susceptibles a la disolución, por ejemplo los sulfatos metálicos simples hidratados son muy solubles en agua, mientras que los hidroxisulfatos de hierro y aluminio son relativamente insolubles. Existen numerosos sulfatos secundarios y carbonatos que son pobremente solubles como la barita (BaSO_4), anglesita (PbSO_4), celestita (SrSO_4) y cerusita (PbCO_3). Como resultado, una vez que estos minerales son formados inmovilizarán efectivamente los elementos contenidos en ellos (Lottermoser, 2010).

Los sulfatos metálicos hidratados solubles con cationes divalentes ($\text{Me}^{2+}\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) son los minerales secundarios predominantes. Estos sulfatos se pueden re-disolver en el agua y liberar sus iones de vuelta a la solución:

- Ecuación (xviii)



Por otra parte los sulfatos hidratados pueden deshidratarse para transformarse a especies menos hidratadas o incluso anhidras. Por ejemplo la melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) será el mineral el precipitar primero, cuando se deshidrata forma rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) o szomolnokita ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Inclusive estos sulfatos hidratados con Fe^{2+} pueden oxidarse a sales eflorescentes de Fe^{2+} a Fe^{3+} . Por lo tanto la melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) puede oxidarse a copiapita ($\text{Fe}_5(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$). Los

nuevos minerales secundarios formados son más estables y resistentes a la disolución con respecto a sus precursores.

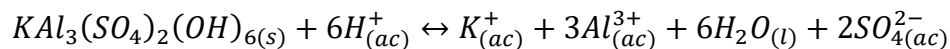
Los minerales secundarios poseen grandes superficies en su estructura que hace que puedan absorber y coprecipitar cantidades significativas de elementos traza. Estos precipitados inmovilizan de manera efectiva elementos en las aguas del DAM y proveen un importante mecanismo de atenuación y desintoxicación natural para estas aguas. La inmovilización de metales es solamente temporal en muchas sales eflorescentes, la presencia de estos minerales secundarios en jales mineros está fuertemente influenciado por el factor climático. En climas húmedos las sales eflorescentes no se acumulan debido a la constante lixiviación; en climas áridos a semi-áridos los minerales secundarios pueden persistir debido a la alta evaporación y la carencia de lluvias.

2.2.3 Consumo y producción de ácido de mina

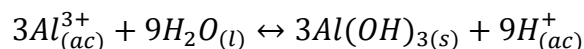
Las sales eflorescentes precipitadas pueden disolverse de nuevo y liberar ácido, esto ocurre particularmente cuando estos minerales están expuestos al agua. Los flujos de agua superficial y de lluvia causaran esta disolución. Las sales sulfatadas se pueden clasificar también como *muy solubles*, *poco solubles* e *insolubles* (Lottermoser, 2010); inclusive también como productoras de ácido, no generadoras de ácido y neutralizadoras de ácido.

Las fases de jarosita se pueden considerar de poca solubilidad ya que su disolución está fuertemente controlada por el pH. Esta disolución se puede llevar a través de dos pasos, por ejemplo la disolución de alunita ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$) y jarosita ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) inicialmente consumen ácido para después hacer precipitar gibsita ($Al(OH)_3$) que ésta última libera ácido.

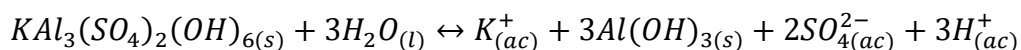
- Ecuación (xix)



- Ecuación (xx)

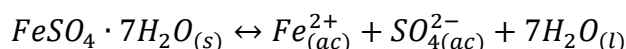


- Ecuación (xxi) = Ecuación (xix) + Ecuación (xx)

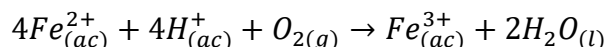


En ambientes de drenaje ácido de mina las sales eflorescentes son particularmente solubles en condiciones oxidantes, especialmente sales de Ca, Mg, Fe²⁺, Fe³⁺ y Mn²⁺. La melanterita puede controlar la acidez en aguas de mina debido a que el decremento en los valores de pH es el principal factor de la disolución del Fe²⁺, lo cual esto puede producir ácido debido al proceso de hidrólisis que forma el Fe³⁺. Las ecuaciones que representan la disolución de la melanterita y la liberación de iones de hidrógeno son las siguientes:

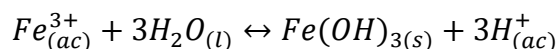
- Ecuación (xxii)



- Ecuación (xxiii)

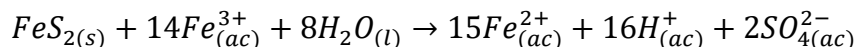


- Ecuación (xxiv)



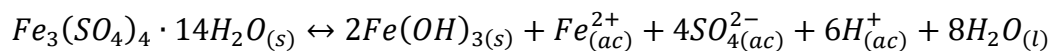
La disolución de la melanterita libera Fe²⁺ el cual puede ser oxidado a Fe³⁺. Para esto, la pirita puede ser oxidada subsecuentemente a Fe³⁺ mediante la siguiente ecuación:

- Ecuación (xxv)

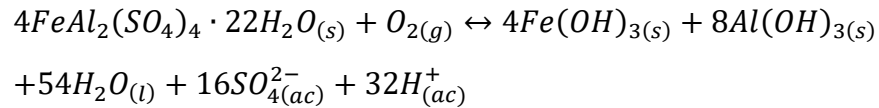


Similarmente, la disolución de römerita (Fe₃(SO₄)₄·14H₂O), halotriquita (FeAl₂(SO₄)₄·22H₂O) y coquimbita (Fe₂(SO₄)₃·9H₂O) producen soluciones ácidas:

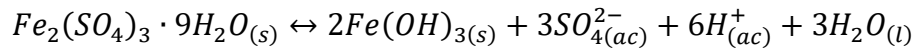
- Ecuación (xxvi)



- Ecuación (xxvii)

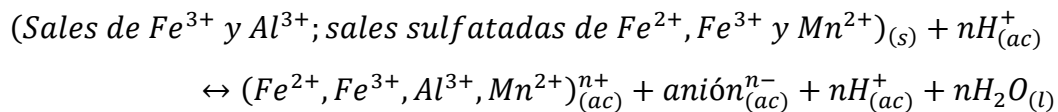


- Ecuación (xxviii)

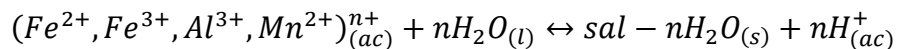


Las reacciones generalizadas para la disolución de sales de Fe^{3+} y Al^{3+} y sales sulfatadas de Fe^{2+} , Fe^{3+} y Mn^{2+} son las siguientes:

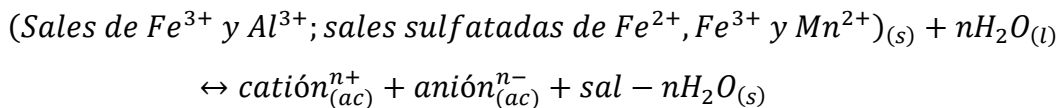
- Ecuación (xxix)



- Ecuación (xxx)



- Ecuación (xxxi) = Ecuación (xxix) + Ecuación (xxx)



2.2.4 Temporalidad de sales eflorescentes

La presencia de sales solubles en las zonas insaturadas de aguas subterráneas en terreros, presas de jales y otros depósitos residuales es importante porque dará lugar a un cambio en la química del DAM. La evaporación, especialmente en climas áridos, causara la precipitación de minerales secundarios los cuales pueden contener, metales, metaloides, sulfatos e hidrógeno. La

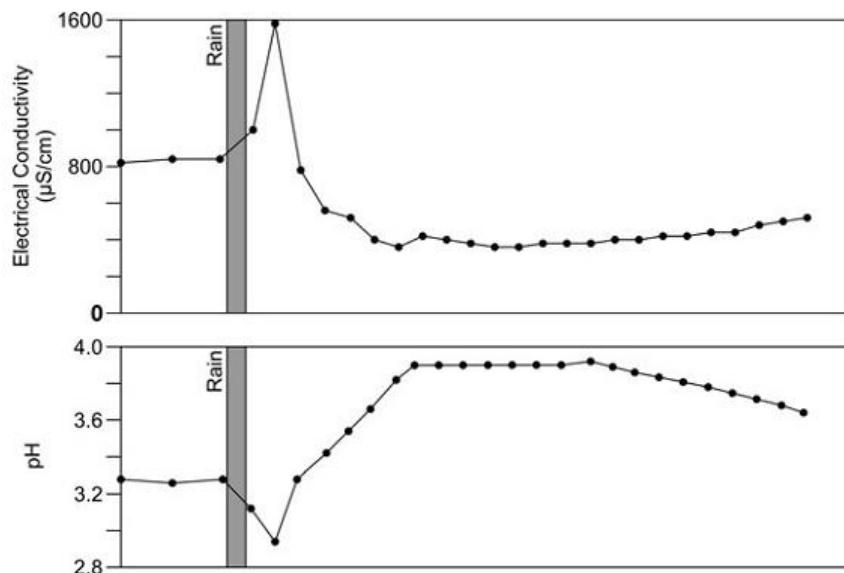


Figura 2.16 Variación temporal de pH y conductividad eléctrica de las aguas de un río asociado con la disolución de sales eflorescentes durante un evento de tormenta. Tomado de Seal & Hammarstrom, 2003.

formación de sales eflorescentes aletargará temporalmente la movilidad de metales y metaloides hasta el siguiente periodo de lluvias.

La rápida disolución de sales solubles e hidrólisis de Fe^{3+} puede ocurrir durante el inicio de temporada de lluvias o al comienzo de la primavera. Esto último ocasionará concentraciones excepcionalmente altas de sulfatos, metales y metaloides así como una fuerte acidez en el agua involucrada durante el evento inicial de lluvia. A tal rápido incremento en concentraciones de los elementos se refiere como el fenómeno de primer lavado (first flush) (Nordstrom, 2009). Existen variaciones temporales de conductividad eléctrica, pH y concentración elemental debido a la disolución de sales eflorescentes en periodos de lluvias y de secas que se pueden observar en las Figuras 2.16 y 2.17.

2.2.5 Recubrimientos de sales eflorescentes

La rápida precipitación de minerales secundarios durante la disolución de sulfuros o carbonatos, pueden recubrir o incluso encapsular minerales productores de ácido o neutralizadores. Dichos recubrimientos hacen que los minerales sean menos susceptibles al continuo intemperismo y disolución; el desarrollo de estas costras suelen ser de grano muy fino y consisten en complejas mezclas de minerales secundarios amorfos y poco cristalinos.

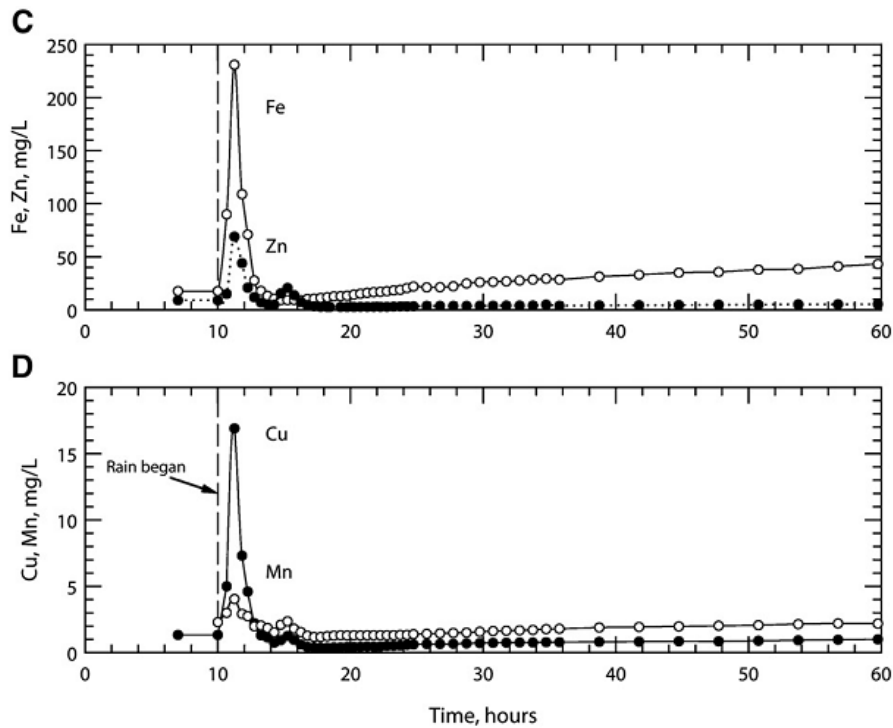


Figura 2.17 Concentraciones de Fe, Zn, Cu y Mn en Contrary Creek durante un evento de tormenta en septiembre de 1978. Tomado de Nordstorm, 2009.

La prolongada precipitación de minerales secundarios en los jales mineros puede ocurrir en la superficie como a profundidades favorables para su formación. Esta continua precipitación causa la formación de capas laterales sub-horizontales de sales eflorescentes que se pueden extender en la zona de evaporación entre los límites de capas oxigenadas y anóxicas (Figura 2.18). Dichas condiciones de formación hacen que la apariencia física de estas capas sea sobresalientes en todo el jal minero. Diferencias en coloración dependiendo de la composición química de las sales eflorescentes resaltan en la superficie del jal, como se observa en la Figura 2.18.

La formación de estos recubrimientos de sales funciona como barrera antioxidante temporal para los minerales que se encuentran en los jales mineros, sin embargo, en las épocas de lluvias estos recubrimientos se disuelven y liberan metales acompañados por iones hidrógeno a la solución.



Figura 2.18 Sales eflorescentes en los jales mineros de Nacozari de García. El recubrimiento de estos sulfatos es de manera horizontal y lateral en la zona de evaporación, el color blanco y verde de las mismas se debe a la presencia de minerales ricos en cobre y magnesio.

2.2.6 Modelos teóricos para el enriquecimiento superficial de sales eflorescentes en base a su dependencia climática

En el trabajo de Dold y Fondbote (2001) se describen dos modelos teóricos para la formación de sales eflorescentes superficiales en jales mineros y el enriquecimiento o movilización de elementos a profundidad en base a su componente climático (Figura 2.19). El factor climático y la composición química de los minerales primarios juegan un papel importante en la composición de los minerales secundarios formados así como también su movilización y eventual removilización.

Estos dos modelos son aplicables para jales mineros ricos en cobre en diferentes condiciones climáticas: para climas templados y para climas áridos a semiáridos. El primer modelo denominado *modelo para climas con dominante precipitación* (precipitation-controlled climates) delimita dos zonas importantes: la zona de oxidación y la zona de neutralización. En la zona de oxidación, los sulfuros comienzan a oxidarse y liberan cationes metálicos y ácido por la actividad del agua de precipitación. Esta oxidación en los sulfuros afecta también a minerales neutralizadores como carbonatos y micas lo cual hace que se liberen metales, como el potasio, al sistema. Este potasio, que principalmente proviene del intemperismo de las micas, es mezclado con el hierro y los iones sulfato liberado por la oxidación de la pirita para formar las primeras fases secundarias que suelen ser goethita, schwertmannita, ferrihidrita y jarosita; siempre tiende a formarse la fase más estable que es la jarosita en dependencia de la disponibilidad de K. Las primeras etapas de oxidación

e hidrólisis hacen que los primeros minerales en formarse sean metaestables, como goethita, ferrihidrita y schwertmannita.

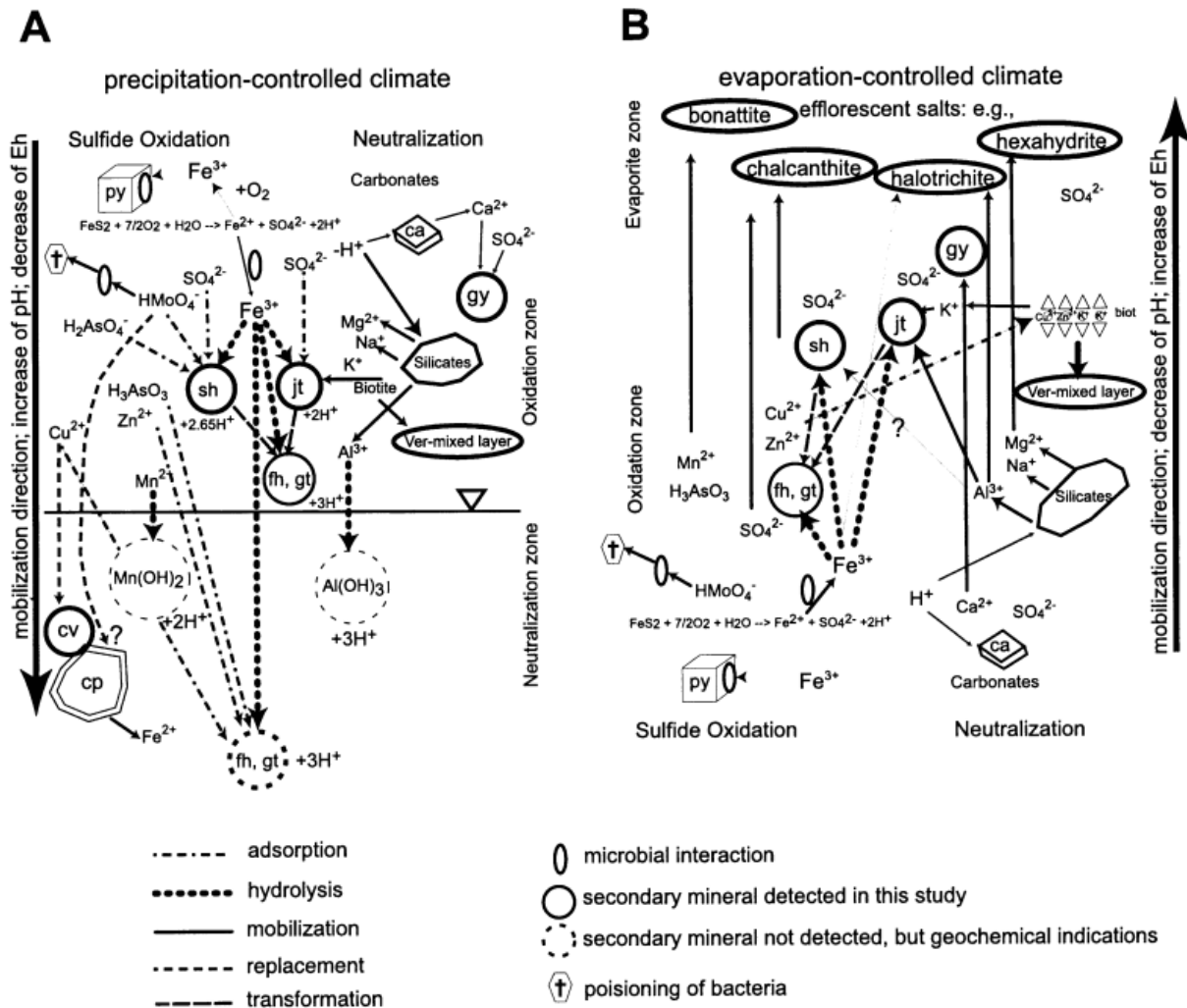


Figura 2.19 Modelos esquemáticos para la movilización de elementos en jales mineros en condiciones con dominio en precipitación (A) y con dominio en evaporación (B). Tomado de Dold y Fontbote, 2001.

Las reacciones químicas involucradas para la formación de estos minerales liberan ácido, y pueden reaccionar con minerales neutralizadores, particularmente carbonatos y silicatos, y liberar cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , K^+ y Na^+ ; además de controlar los niveles de pH. Los cambios en los niveles de pH y la liberación de cationes metálicos promueven la formación de jarosita, yeso y minerales como vermiculita (Dold y Fontboté, 2001). En la zona de neutralización, elementos como el Al y Mn pueden formar gibsita. En esta zona donde aumentan los valores de pH, puede existir un cambio en la solubilidad y la movilización de elementos y los procesos de sorción fijan estos

elementos. También por debajo del nivel freático donde las condiciones reductoras empiezan a dominar, los procesos de reemplazamiento comienzan y la calcopirita se reemplaza por covellita en esta zona.

Conforme las capas inferiores en los jales mineros en climas húmedos empiezan a tener un mayor dominio de neutralización y un control de pH más básico, los metales lixiviados de la zona de oxidación son retenidos. Una vez que el potencial de neutralización es consumido, el material que se encuentra en la zona de neutralización ya no puede ser removido ni movilizado y comienza el desarrollo del DAM.

El segundo modelo denominado *modelo para climas con dominio de evaporación* (evaporation-controlled climates) es más aplicable a este caso de estudio debido a que existe una similitud muy precisa con estos jales mineros. Este modelo consiste en un incremento en la evaporación y un decremento en el tamaño de grano del jal minero con la dirección del flujo de agua, de arriba hacia abajo, lo que hace que la cinemática de la migración y movilización de elementos sea de manera capilar. La movilización de elementos son transferidos a las partes superiores superficiales del jal minero con condiciones oxidantes. En el caso de estudio de Dold y Fondbote, la supersaturación controla la precipitación superficial de sales eflorescentes como bonattita ($\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), calcantita ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), pickeringita ($\text{MgAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$), magnesioaubertita ($\text{Mg,Cu}(\text{SO}_4)_2 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), halotriquita ($\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$), hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Para este estudio se tienen eflorescencias como alpersita ($(\text{Mg,Cu})(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), calcantita ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ferrihidrita ($\text{Fe}_{10}^{3+}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$), jarosita ($\text{KFe}^{3+}3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), jokokuita ($\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), pentahidrita cúprica ($(\text{Mg,Cu})\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ramsbeckita ($(\text{Cu,Zn})_{15}(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{22} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Capítulo 3

Metodología y resultados

3. Metodología y resultados

3.1 Descripción del área de estudio

3.1.1 Características de los jales mineros de Nacozari de García

La Presa de Jales I se encuentra localizada en la zona urbana del pueblo de Nacozari de García, la cual se extiende por un área aproximada de 19 hectáreas (Figura 3.1). Esta presa de jales forma un gran montículo de arenas oxidadas, con un volumen aproximado 1,505,633 m³ y 3,312,392 toneladas (De la O-Villanueva *et. al.*, 2013). Este cuerpo de residuos mineros, al igual que los otros jales alrededor, carecen de cubierta vegetativa lo cual los hace susceptible a la erosión hídrica y eólica. La parte basal de este montículo corresponde a arenas medias y la parte superior a arenas muy finas a limos gruesos. Por otra parte, se observa que la parte inferior es una zona donde se oxidaron los sulfuros y la parte superior forma la zona de evaporación donde se desarrollaron las sales eflorescentes (Fig. 3.2).

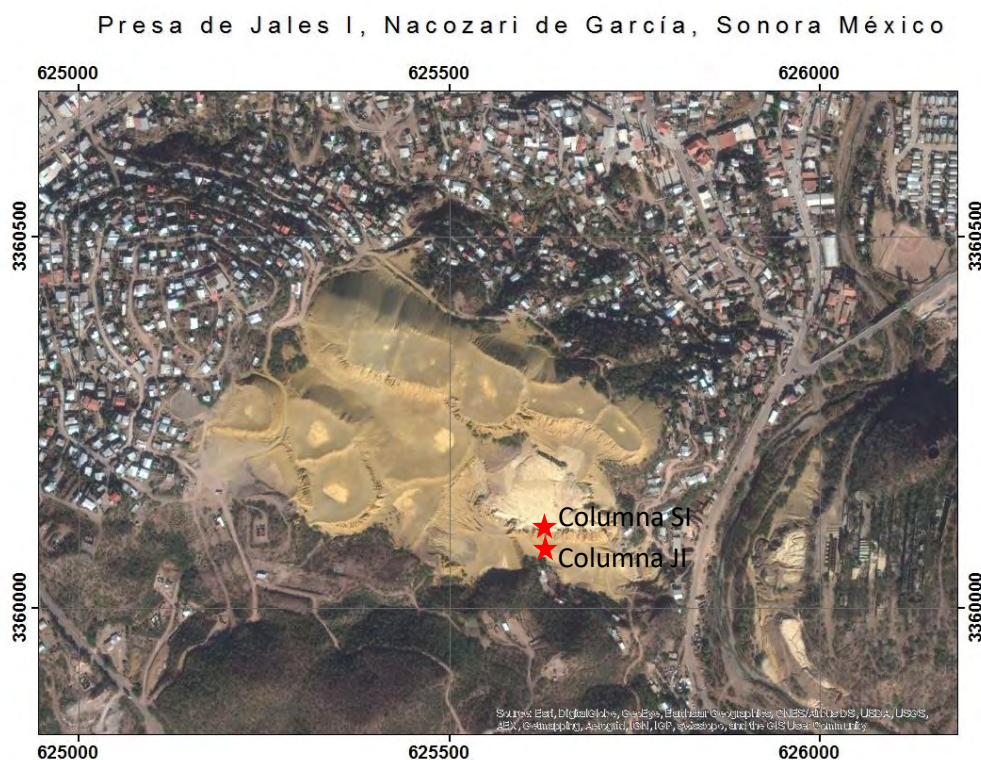


Figura 3.1 Ubicación de la Presa de Jales I de Nacozari de García, Sonora México.

La zona de oxidación se caracteriza por coloraciones rojizas-naranjas debido a minerales ricos en hierro, como la jarosita. Los valores de pH en esta zona van de 3.9 a 4.3, con valores de conductividad eléctrica entre 50 y 700 μs . La zona de evaporación presenta tonalidades de café claro a amarillo, con capas laterales horizontales de sales eflorescentes con coloraciones verdosas a blancas. Estas diferentes tonalidades se deben a las diversas mineralogías presentes en la zona de evaporación. Los rangos de pH para esta zona van de 4.3 a 4.5 y una conductividad eléctrica de 700 a 10.18 μs . Estos valores, sin embargo, cambian con respecto a las temporadas de lluvia y secas.



Figura 3.2 Zonas determinadas en la Presa de Jales I. La zona de evaporación y la zona de oxidación.

Los minerales encontrados en la parte oxidada son: cuarzo (SiO_2), jarosita ($\text{KFe}^{3+}3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), jokokuita ($\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), ortoclasa ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$), rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

3.1.2 Características de las sales eflorescentes

La mineralogía secundaria presente en la zona de evaporación, o sales eflorescentes, ocurren como costras, recubrimientos y capas laterales de algunos centímetros a decímetros de espesor. El tamaño, hábito de los cristales y dureza hace que estos minerales sean muy deleznable y susceptibles a la erosión. Las coloraciones verdosas y blancas se deben a la presencia de Cu, Mg, Ca y otros elementos. Una particularidad observada en campo sobre estos sulfatos es que forman bandas laterales alternadas con capas de color ocre, sin aparente contenido de sales eflorescentes

(Figura 3.3). Todas estas eflorescencias son altamente solubles en agua y es por eso que no siempre se encuentran aflorando. En épocas de lluvia estos minerales se disuelven y liberan cationes y aniones (SO_4^{2-}) a la solución e incrementan la acidez de la misma.



Figura 3.3 Capas de sales eflorescentes alternadas con capas sin sales eflorescentes. Las capas con sales eflorescentes no son penetrativas solo son superficiales.

Los minerales encontrados en las sales solubles son: alpersita $((\text{Mg,Cu})(\text{SO}_4)\cdot 7\text{H}_2\text{O})$, calcantita $(\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O})$, ferrihidrita $(5\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 9\text{H}_2\text{O})$, jarosita $(\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$, pentahidrita cúprica $((\text{Mg,Cu})\text{SO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O})$, rozenita $(\text{FeSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O})$, ramsbeckita $((\text{Cu,Zn})_{15}(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{22}\cdot 6\text{H}_2\text{O})$ y yeso $(\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$.

3.1.3 Muestreo

Se realizaron dos muestreos sistemáticos para la evaluación de granulometría, fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X de los jales estudiados. Las fechas de estos muestreos fueron el 29 de noviembre de 2014 y el 30 de marzo de 2015. Las fechas de muestreo fueron establecidas en



Figura 3.4 Columna JI en los jales mineros de Nacozari de García, Sonora. El espesor muestreado de esta columna fue de 17 m.



Figura 3.5 Columna SI que corresponde a una porción a detalle de la columna JI. El espesor muestreado de esta columna fue de 1 m.

función de la temporada de lluvias y secas para determinar si existe una diferencia geoquímica y mineralógica en los sulfatos secundarios estudiados.

Se evaluaron dos columnas de jales, una de 17 m de altura denominada columna JI (Figura 3.4), y otra de aproximadamente 1 m de espesor denominada columna SI (Figura 3.5). Ésta última columna es parte de la JI y tiene como objetivo mostrar a detalle las características granulométricas y geoquímicas de este material.

Las muestras de la columna JI del primer muestreo fueron obtenidas a cada metro de altura hasta llegar a la altura de 17 m. En el segundo muestreo de la misma columna también se colectaron muestras a cada metro de altura hasta llegar a la altura de 10 m. A partir de este punto, el muestreo fue cada vez más detallado en función de la ocurrencia de horizontes con sales eflorescentes. En la

segunda columna (SI) del primer muestreo, las muestras fueron tomadas a una altura relativa a los horizontes con eflorescencias. Para el primer muestreo se colectaron un total de 8 muestras. Para el segundo muestreo de esta columna se tomaron 13 muestras, debido a la aparición de horizontes neoformados en un lapso de 4 meses. Estos horizontes se muestrearon por debajo de la primera muestra tomada en esta columna.

Las muestras tomadas incluyeron las costras superficiales de sales eflorescentes y, por separado, el material de jal que se encontrada justo detrás de las eflorescencias. Cada muestra de jal tomada fue resguardada en bolsas de polietileno y etiquetadas con su clave correspondiente. Las muestras de sales fueron guardadas en botellas de plástico de 50 ml para evitar su contaminación y deshidratación (Dold, 2003).

3.2 Parámetros fisicoquímicos

3.2.1 Metodología

Las muestras utilizadas para las mediciones de pH y conductividad eléctrica primeramente fueron pesadas en una balanza de precisión marca *AE Adam AAA 250 L* tomando 10 gr por muestra. Cada muestra fue depositada en un vaso de precipitado con 100 ml de agua desionizada y fueron agitadas durante 10 minutos para homogenizar la solución. Después de los 10 minutos de agitación se dejó reposar la solución durante 30 minutos para que el material suspendido se sedimentara lo suficiente y después medir los valores de pH y conductividad eléctrica. El pH fue medido con un medidor de pH marca *LaMotte 5 Series* y un conductímetro de la misma marca. La solución medida posteriormente fue guardada en botellas de polietileno de 60 ml para utilizarla después para las mediciones de cobre soluble con absorción atómica.

3.2.2 Resultados

Las mediciones de pH y conductividad eléctrica para los dos muestreos de noviembre de 2014 y marzo de 2015 se presentan en las Tablas 7-10, y las gráficas correspondientes a estos datos se muestran en las Figuras 3.6-3.9.

Tabla 7 Resultado de pH y conductividad eléctrica para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014.

Muestra	pH	Conductividad Eléctrica	Unidades
Jl-0m	4.31	226	μS
Jl-1m	4.15	168	μS
Jl-2m	4.16	691	μS
Jl-3m	3.92	1076	μS
Jl-4m	4.05	134.3	μS
Jl-5m	3.99	491	μS
Jl-6m	4.11	275	μS
Jl-7m	4.11	120	μS
Jl-8m	4.00	564	μS
Jl-9m	4.12	100.5	μS
Jl-10m	4.33	50	μS
Jl-11m	4.42	699	μS
Jl-12m	4.47	1001	μS
Jl-13m	4.02	8880	μS
Jl-14m	4.17	6190	μS
Jl-15m	4.52	2280	μS
Jl-16m	4.55	1089	μS
Jl-17m	4.18	10180	μS

Tabla 8 Resultados de pH y conductividad eléctrica para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014.

Muestra	pH	Conductividad Eléctrica	Unidades
S-1l-B	4.07	1374	μS
S-2l-A	3.9	239	μS
S-3l-B	3.87	1515	μS
S-4l-B	3.76	2710	μS
S-5l-B	4.15	6150	μS
S-6l-B	4.3	707	μS
S-7l-B	4.17	3800	μS
S-8l-B	4.4	249	μS

Tabla 9 Resultados de pH y conductividad eléctrica para la columna JI del muestreo de marzo de 2015.

Muestra	pH	Conductividad Eléctrica	Unidades
Jl-0m	4.07	227	μS
Jl-1m	3.98	320	μS
Jl-2m	4.02	164.1	μS
Jl-3m	4.05	684	μS
Jl-4m	4.22	79.7	μS

Jl-5m	4.1	271 μ S
Jl-6m	4.07	466 μ S
Jl-7m	4.02	128.8 μ S
Jl-8m	3.99	418 μ S
Jl-9m	4.11	109.6 μ S
Jl-10m	4.4	31.4 μ S
Jl-10m-A	4.57	44.1 μ S
Jl-10m-B	4.1	682 μ S
Jl-11m	4.3	118.5 μ S
Jl-11m-A	4.22	584 μ S
Jl-11m-B	4.14	482 μ S
Jl-12m	4.34	132.4 μ S
Jl-13m	4.14	660 μ S
Jl-13m-A	4.28	350 μ S
Jl-13m-B	4.01	1380 μ S
Jl-13m-C	4.1	365 μ S
Jl-14m	4.07	414 μ S
Jl-14m-A	4.08	433 μ S
Jl-14m-B	4.03	867 μ S
Jl-15m	4.16	434 μ S
Jl-16m	4.2	664 μ S
Jl-17m	4.1	1165 μ S

Tabla 10 Resultados de pH y conductividad eléctrica para la columna SI del muestreo de marzo de 2015.

Muestra	pH	Conductividad Eléctrica	Unidades
S-11-B	3.87	1060	μ S
S-21-B	4.42	108.3	μ S
S-31-B	4.03	955	μ S
S-41-B	4.25	397	μ S
S-51-B	4.2	848	μ S
S-61-B	4.3	722	μ S
S-71-B	3.98	2910	μ S
S-81-B	4.34	260	μ S
S-91-B	4.39	339	μ S
S-101-B	4.52	229	μ S
S-111-B	4.3	1151	μ S
S-121-B	4.53	261	μ S
S-131-B	4.37	1035	μ S
S-141-B	4.62	188.3	μ S

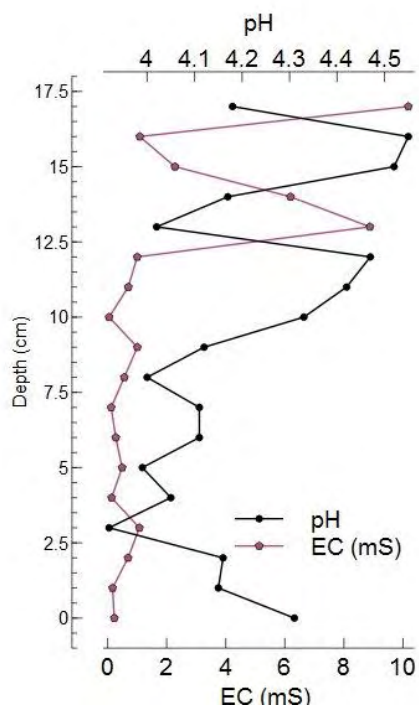


Figura 3.6 Gráfica de pH y conductividad eléctrica de la columna JI del muestreo de noviembre de 2014.

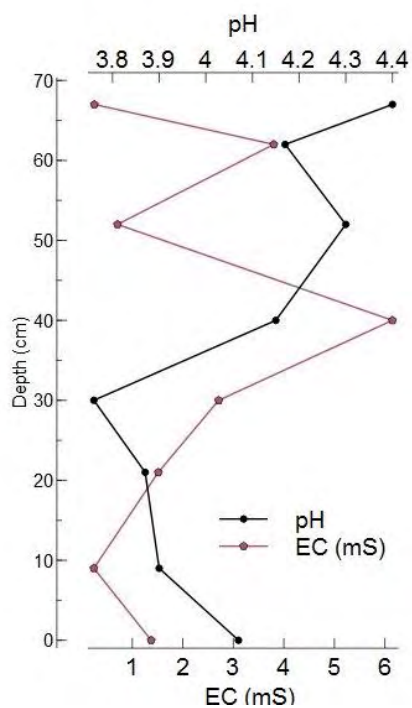


Figura 3.7 Gráfica de pH y conductividad eléctrica de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014.

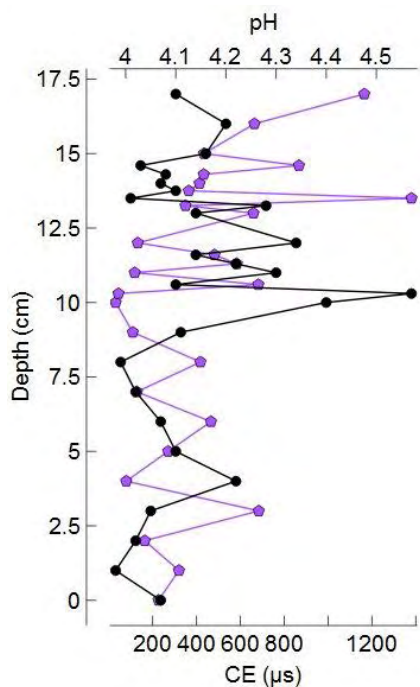


Figura 3.8 Gráfica de pH y conductividad eléctrica de la columna JI del muestreo de marzo de 2015.

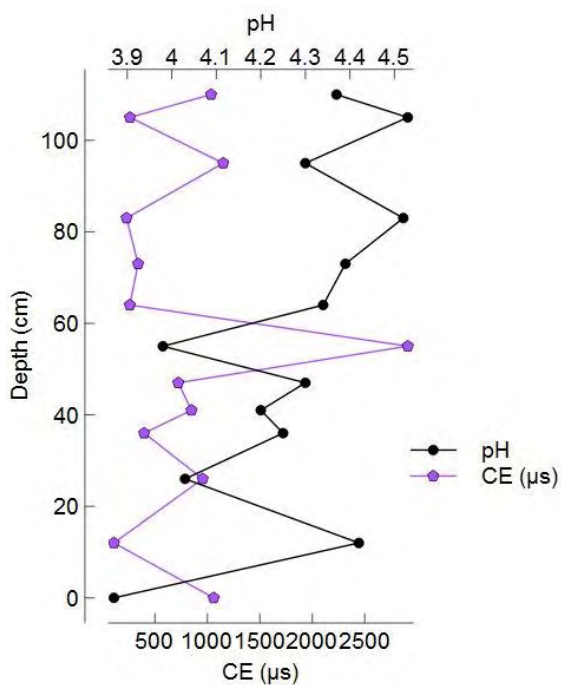


Figura 3.9 Gráfica de pH y conductividad eléctrica de la columna SI del muestreo de marzo de 2015.

3.3 Granulometría

3.3.1 Metodología

Las muestras de jal tomadas previamente en campo fueron secadas en un horno marca *Hafo Series 1600* a temperatura ambiente de 35° C hasta que quedaran completamente secas (Figura 3.10). Después de secar las muestras, se procedió al tamizado de las mismas. En esta etapa, las muestra se pesaron en una báscula de precisión mecánica (Figura 3.11) y una báscula de precisión electrónica marca *Ohaus E 400* para conocer el peso inicial y efectuar los cálculos granulométricos necesarios. Una vez pesada la muestra se realizó el proceso de tamizado.

Los tamices utilizados para este estudio se describen en la Tabla 11. El material retenido en la base de la pila de tamices era considerado como una fracción inferior a 44 μm (<44 μm).

Tabla 11 Relación de tamices utilizados en este estudio. Tomado de USGS (<http://pubs.usgs.gov/of/2000/of00-304/htmldocs/chap04/>).

ASTM No. (U.S. Standard)	Fracción (μm)	Textura
35	500	Arenas medias
60	250	Arenas finas
120	125	Arenas muy finas
230	62	Limo grueso
325	44	Limo grueso

Las muestras una vez dentro de la pila de tamices se colocan en un agitador eléctrico (rotap) marca H&P Equipment modelo RX-86 (Figura 3.12) con un tiempo de agitación de 10 minutos con el fin de separar la muestra por fracciones. Después de agitar la muestra, se obtuvieron fracciones que posteriormente fueron pesadas para calcular el porcentaje equivalente a la muestra total. Las fracciones obtenidas son guardadas nuevamente y de ellas se tomó en promedio 10 g de material para hacer el análisis de FRX posterior. Cada vez que se utilizaban los tamices, se lavaban y secaban para evitar la contaminación entre cada medición. Se utilizaba una tina ultrasónica marca Cole-Parmer modelo 8894 (Figura 3.13) para retirar las partículas retenidas en las mallas con un tiempo

de reposo dentro de la tina de 10 minutos, posteriormente eran secadas con aire comprimido para apresurar el proceso.



Figura 3.10 Horno marca Hafo Series 1600, las muestras se secaron a temperatura ambiente de 35° C.



Figura 3.11 Báscula de precisión utilizada para la medición del peso de las muestras a tamizar. Se calcula el peso inicial y el peso por cada fracción obtenida.



Figura 3.12 Rotap marca H&P Equipment modelo RX-86 utilizado para la agitación y separación por fracciones del material.



Figura 3.13 Tina ultrasónica marca Cole-Parmer modelo 8894, es utilizada para retirar las partículas retenidas en las mallas para tamizar.

3.3.2 Resultados

Se obtuvieron los datos texturales para las columnas JI y SI de los muestreos de noviembre de 2014 y marzo de 2015, los cuales se incluyen en sus tablas correspondientes, con los cálculos

granulométricos para su clasificación. La Tabla 12 incluye los datos texturales para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014 y la Tabla 13 para la columna SI del mismo periodo de muestreo. La Tabla 14 contiene los datos de la columna JI del muestreo de marzo de 2015 y la Tabla 15 los de la columna SI del mismo segundo muestreo.

En las Figuras 3.14 y 3.15 se representa esquemáticamente la información textural de las columnas JI y SI del muestreo de noviembre de 2014, respectivamente, y las Figuras 3.16 y 3.17 muestran la información para las columnas JI y SI del segundo grupo de muestras.

Tabla 12 Datos texturales para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014.

Muestra	Fecha de toma	Peso total (g)	500 μm (g)	250 μm (g)	125 μm (g)	62 μm (g)	44 μm (g)	<44 μm (g)	Suma	Perdida	% 500 μm	% 250 μm	% 125 μm	% 62 μm	% 44 μm	% <44 μm	Suma	Clasificación
JI-0m	29/11/2014	509	308.42	100.83	60.43	17.54	3.84	2.18	493.24	15.76	62.53	20.44	12.25	3.56	0.78	0.44	100	Arena media-Arena fina
JI-1m	29/11/2014	516.6	325.13	103.06	63.63	18	4.23	2.54	516.59	0.01	62.94	19.95	12.32	3.48	0.82	0.49	100	Arena media-Arena fina
JI-2m	29/11/2014	617	384.08	116.14	70	23.86	5.44	2.82	602.34	14.66	63.76	19.28	11.62	3.96	0.90	0.47	100	Arena media-Arena fina
JI-3m	29/11/2014	632.2	383.99	121.06	74.96	19.08	5.02	3.1	607.21	24.99	63.24	19.94	12.34	3.14	0.83	0.51	100	Arena media-Arena fina
JI-4m	29/11/2014	583.4	364.97	107.75	62.46	18.76	5.06	1.52	560.52	22.88	65.11	19.22	11.14	3.35	0.90	0.27	100	Arena media-Arena fina
JI-5m	29/11/2014	541	327.85	101.75	64.41	17.77	4.14	1.05	516.97	24.03	63.42	19.68	12.46	3.44	0.80	0.20	100	Arena media-Arena fina
JI-6m	29/11/2014	651.9	411.89	122.57	66.46	17.84	4.94	1.34	625.04	26.86	65.90	19.61	10.63	2.85	0.79	0.21	100	Arena media-Arena fina
JI-7m	29/11/2014	602.1	376.64	112.21	64.43	18.01	4.35	1.86	577.5	24.6	65.22	19.43	11.16	3.12	0.75	0.32	100	Arena media-Arena fina
JI-8m	29/11/2014	623.1	386.37	120.1	67.8	18.51	4.31	2.89	599.98	23.12	64.40	20.02	11.30	3.09	0.72	0.48	100	Arena media-Arena fina
JI-9m	29/11/2014	710.3	383.58	124.11	104.31	38.14	14.54	11.04	675.72	34.58	56.77	18.37	15.44	5.64	2.15	1.63	100	Arena media-Arena fina
JI-10m	29/11/2014	584.7	0	22.25	376.97	129.11	23.33	19.1	570.76	13.94	0.00	3.90	66.05	22.62	4.09	3.35	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-11m	29/11/2014	613.6	0	65.41	307.88	135.83	33.05	29.97	572.14	41.46	0.00	11.43	53.81	23.74	5.78	5.24	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-12m	29/11/2014	544.6	0	19.2	181.41	173.39	55.47	78.75	508.22	36.38	0.00	3.78	35.70	34.12	10.91	15.50	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-13m	29/11/2014	432.55	0	58.51	164.67	115.62	34.49	35.72	409.01	23.54	0.00	14.31	40.26	28.27	8.43	8.73	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-14m	29/11/2014	499.3	0	49.33	138.1	126.19	58.33	92.48	464.43	34.87	0.00	10.62	29.74	27.17	12.56	19.91	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-15m	29/11/2014	443.55	13.66	41.6	96.11	154.81	78.28	47.38	431.84	11.71	3.16	9.63	22.26	35.85	18.13	10.97	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-16m	29/11/2014	492.6	0	52.13	202.16	146.55	40.04	35.37	476.25	16.35	0.00	10.95	42.45	30.77	8.41	7.43	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-17m	29/11/2014	474.4	0	71.48	177.99	121.47	39.17	51.29	461.4	13	0.00	15.49	38.58	26.33	8.49	11.12	100	Arena muy fina-Limo grueso

Tabla 13 Datos texturales para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014.

Muestra	Fecha de toma	Peso total (g)	500 μm (g)	250 μm (g)	125 μm (g)	62 μm (g)	44 μm (g)	<44 μm (g)	Suma	Perdida	% 500 μm	% 250 μm	% 125 μm	% 62 μm	% 44 μm	% <44 μm	Suma	Clasificación
S-1I-B	29/11/2014	409.0	51.5	106.8	108.6	72.9	41.5	12.2	393.5	15.5	13.1	27.1	27.6	18.5	10.5	3.1	100.0	Arena fina-Arena media
S-2I-A	29/11/2014	615.0	0.0	54.7	316.5	154.7	49.5	35.8	611.2	3.8	0.0	8.9	51.8	25.3	8.1	5.9	100.0	Arena fina-Arena muy fina
S-3I-B	29/11/2014	605.8	0.0	72.6	151.3	263.4	84.6	33.6	605.5	0.3	0.0	12.0	25.0	43.5	14.0	5.5	100.0	Arena muy fina-Arena fina
S-4I-B	29/11/2014	506.7	0.0	74.3	235.3	134.6	49.7	10.0	503.9	2.8	0.0	14.7	46.7	26.7	9.9	2.0	100.0	Arena fina-Arena muy fina
S-5I-B	29/11/2014	507.1	0.0	96.5	92.6	143.1	106.3	58.7	497.2	9.9	0.0	19.4	18.6	28.8	21.4	11.8	100.0	Arena muy fina-Limo grueso
S-6I-B	29/11/2014	540.0	0.0	32.5	207.6	217.9	71.2	9.6	538.8	1.2	0.0	6.0	38.5	40.4	13.2	1.8	100.0	Arena muy fina-Arena fina
S-7I-B	29/11/2014	506.5	0.0	130.6	165.0	111.7	49.5	20.5	477.3	29.2	0.0	27.4	34.6	23.4	10.4	4.3	100.0	Arena fina-Arena media
S-8I-B	29/11/2014	477.4	0.0	15.5	44.7	257.5	69.5	89.5	476.7	0.8	0.0	3.3	9.4	54.0	14.6	18.8	100.0	Arena muy fina-Limo grueso

Tabla 14 Datos texturales para la columna JI del muestreo de marzo de 2015.

Muestra	Fecha de toma	Peso total (g)	500 µm (g)	250 µm (g)	125 µm (g)	62 µm (g)	44 µm (g)	<44 µm (g)	Suma	Perdida	% 500 µm	% 250 µm	% 125 µm	% 62 µm	% 44 µm	% <44 µm	Suma	Clasificación
JI-0m	30/03/2015	276.0	167.0	53.0	33.4	12.3	4.6	4.8	275.1	0.9	60.7	19.3	12.1	4.5	1.7	1.8	100	Arena media-Arena fina
JI-1m	30/03/2015	258.0	148.8	53.6	34.3	12.5	4.0	4.5	257.5	0.5	57.8	20.8	13.3	4.9	1.5	1.7	100	Arena media-Arena fina
JI-2m	30/03/2015	265.0	159.1	54.2	30.4	10.6	4.1	4.5	262.9	2.1	60.5	20.6	11.6	4.0	1.6	1.7	100	Arena media-Arena fina
JI-3m	30/03/2015	239.0	137.8	47.5	30.0	11.9	5.2	3.4	235.7	3.3	58.4	20.2	12.7	5.0	2.2	1.5	100	Arena media-Arena fina
JI-4m	30/03/2015	197.0	115.6	39.2	24.2	9.2	4.7	3.2	196.0	1.0	59.0	20.0	12.4	4.7	2.4	1.6	100	Arena media-Arena fina
JI-5m	30/03/2015	215.0	130.8	40.9	24.7	8.5	4.8	3.5	213.2	1.8	61.3	19.2	11.6	4.0	2.3	1.7	100	Arena media-Arena fina
JI-6m	30/03/2015	209.0	123.0	38.2	24.4	8.5	5.8	2.7	202.5	6.5	60.7	18.8	12.1	4.2	2.9	1.3	100	Arena media-Arena fina
JI-7m	30/03/2015	256.0	150.0	51.3	32.9	12.1	6.2	2.6	255.1	0.9	58.8	20.1	12.9	4.8	2.4	1.0	100	Arena media-Arena fina
JI-8m	30/03/2015	255.0	144.2	53.1	35.5	13.4	5.5	3.0	254.6	0.4	56.6	20.9	13.9	5.2	2.2	1.2	100	Arena media-Arena fina
JI-9m	30/03/2015	260.0	152.5	48.6	32.8	13.6	6.9	3.1	257.4	2.6	59.2	18.9	12.8	5.3	2.7	1.2	100	Arena media-Arena fina
JI-10m	30/03/2015	183.0	0.0	6.3	90.0	65.7	13.4	6.1	181.5	1.5	0.0	3.5	49.6	36.2	7.4	3.4	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-10m-A	30/03/2015	195.0	0.0	6.5	92.2	70.9	16.0	8.8	194.4	0.6	0.0	3.3	47.4	36.5	8.2	4.5	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-10m-B	30/03/2015	241.0	0.0	16.0	17.3	94.9	98.7	14.0	240.9	0.1	0.0	6.6	7.2	39.4	41.0	5.8	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-11m	30/03/2015	225.0	0.0	14.7	93.4	62.1	35.2	11.3	216.8	8.2	0.0	6.8	43.1	28.6	16.2	5.2	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-11m-A	30/03/2015	190.0	0.0	26.4	93.9	47.9	14.0	6.6	188.7	1.3	0.0	14.0	49.8	25.4	7.4	3.5	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-11m-B	30/03/2015	160.0	0.0	11.9	49.2	46.5	32.9	9.0	149.5	10.5	0.0	8.0	32.9	31.1	22.0	6.0	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-12m	30/03/2015	169.0	0.0	3.8	52.4	67.8	34.6	9.6	168.2	0.8	0.0	2.3	31.2	40.3	20.5	5.7	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-13m	30/03/2015	208.0	0.0	24.4	76.5	64.9	31.3	10.1	207.2	0.8	0.0	11.8	36.9	31.3	15.1	4.9	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-13m-A	30/03/2015	180.0	0.0	11.1	53.3	53.5	46.7	10.8	175.3	4.7	0.0	6.3	30.4	30.5	26.7	6.1	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-13m-B	30/03/2015	140.0	0.0	24.4	23.9	33.4	46.5	11.4	139.5	0.6	0.0	17.5	17.1	23.9	33.3	8.1	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-13m-C	30/03/2015	134.0	0.0	20.3	38.3	16.6	47.4	11.0	133.6	0.4	0.0	15.2	28.7	12.4	35.5	8.3	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-14m	30/03/2015	159.0	0.0	26.1	36.1	37.6	51.1	7.3	158.2	0.8	0.0	16.5	22.8	23.8	32.3	4.6	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-14m-A	30/03/2015	138.0	0.0	22.6	10.7	21.8	65.3	16.0	136.3	1.7	0.0	16.5	7.8	16.0	47.9	11.8	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-14m-B	30/03/2015	142.0	0.0	32.5	41.1	67.2	0.0	0.0	140.8	1.2	0.0	23.1	29.2	47.8	0.0	0.0	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-15m	30/03/2015	205.0	0.0	37.7	52.1	33.1	63.7	17.3	204.1	0.9	0.0	18.5	25.6	16.2	31.2	8.5	100	Limo grueso-Arena muy fina
JI-16m	30/03/2015	184.0	0.0	40.8	72.8	5.5	48.1	8.0	175.1	8.9	0.0	23.3	41.6	3.1	27.5	4.5	100	Arena muy fina-Limo grueso
JI-17m	30/03/2015	160.0	0.0	23.9	48.7	36.3	38.5	11.7	159.1	0.9	0.0	15.0	30.6	22.8	24.2	7.4	100	Arena muy fina-Limo grueso

Tabla 15 Datos texturales para la columna SI del muestreo de marzo de 2015.

Muestra	Fecha de toma	Peso total (g)	500 μm (g)	250 μm (g)	125 μm (g)	62 μm (g)	44 μm (g)	<44 μm (g)	Suma	Perdida	% 500 μm	% 250 μm	% 125 μm	% 62 μm	% 44 μm	% <44 μm	Suma	Clasificación
S-11-B	30/03/2015	174	0	38.5	48.0	9.8	67.9	9.3	173.4	0.7	0.0	22.2	27.7	5.6	39.1	5.4	100	Limo grueso-Arena muy fina
S-21-B	30/03/2015	194	0	29.0	90.2	16.4	48.7	9.4	193.6	0.4	0.0	15.0	46.6	8.5	25.1	4.8	100	Arena muy fina-Limo grueso
S-31-B	30/03/2015	166	0	31.6	52.1	30.8	41.2	8.7	164.3	1.7	0.0	19.2	31.7	18.7	25.1	5.3	100	Arena muy fina-Limo grueso
S-41-B	30/03/2015	190.09	0	7.9	57.9	65.1	46.4	12.2	189.6	0.5	0.0	4.2	30.5	34.3	24.5	6.4	100	Limo grueso-Arena muy fina
S-51-B	30/03/2015	200	0	34.1	62.2	45.7	39.9	9.6	191.4	8.6	0.0	17.8	32.5	23.9	20.8	5.0	100	Arena muy fina-Limo grueso
S-61-B	30/03/2015	184.63	0	39.4	78.3	38.7	16.6	6.0	179.1	5.5	0.0	22.0	43.7	21.6	9.3	3.4	100	Arena muy fina-Limo grueso
S-71-B	30/03/2015	187	0	69.0	67.6	24.9	13.1	3.0	177.5	9.5	0.0	38.8	38.1	14.0	7.4	1.7	100	Arena media-Arena fina
S-81-B	30/03/2015	203	0	26.3	80.3	48.8	31.7	11.4	198.6	4.5	0.0	13.2	40.4	24.6	16.0	5.8	100	Arena muy fina-Limo grueso
S-91-B	30/03/2015	198	0	34.4	44.9	42.3	54.6	11.4	187.6	10.4	0.0	18.3	23.9	22.6	29.1	6.1	100	Limo grueso-Arena muy fina
S-101-B	30/03/2015	164.79	0	6.6	36.4	28.3	66.9	12.4	150.4	14.4	0.0	4.4	24.2	18.8	44.4	8.2	100	Limo grueso-Arena muy fina
S-111-B	30/03/2015	196	0	41.8	67.0	35.0	38.5	6.6	188.9	7.1	0.0	22.1	35.5	18.5	20.4	3.5	100	Arena muy fina-Limo grueso
S-121-B	30/03/2015	163.94	0	13.9	35.7	9.2	89.1	12.1	160.0	4.0	0.0	8.7	22.3	5.7	55.7	7.6	100	Limo grueso-Arena muy fina
S-131-B	30/03/2015	176	0	33.2	36.2	48.4	40.6	6.3	164.6	11.4	0.0	20.1	22.0	29.4	24.7	3.9	100	Limo grueso-Arena muy fina

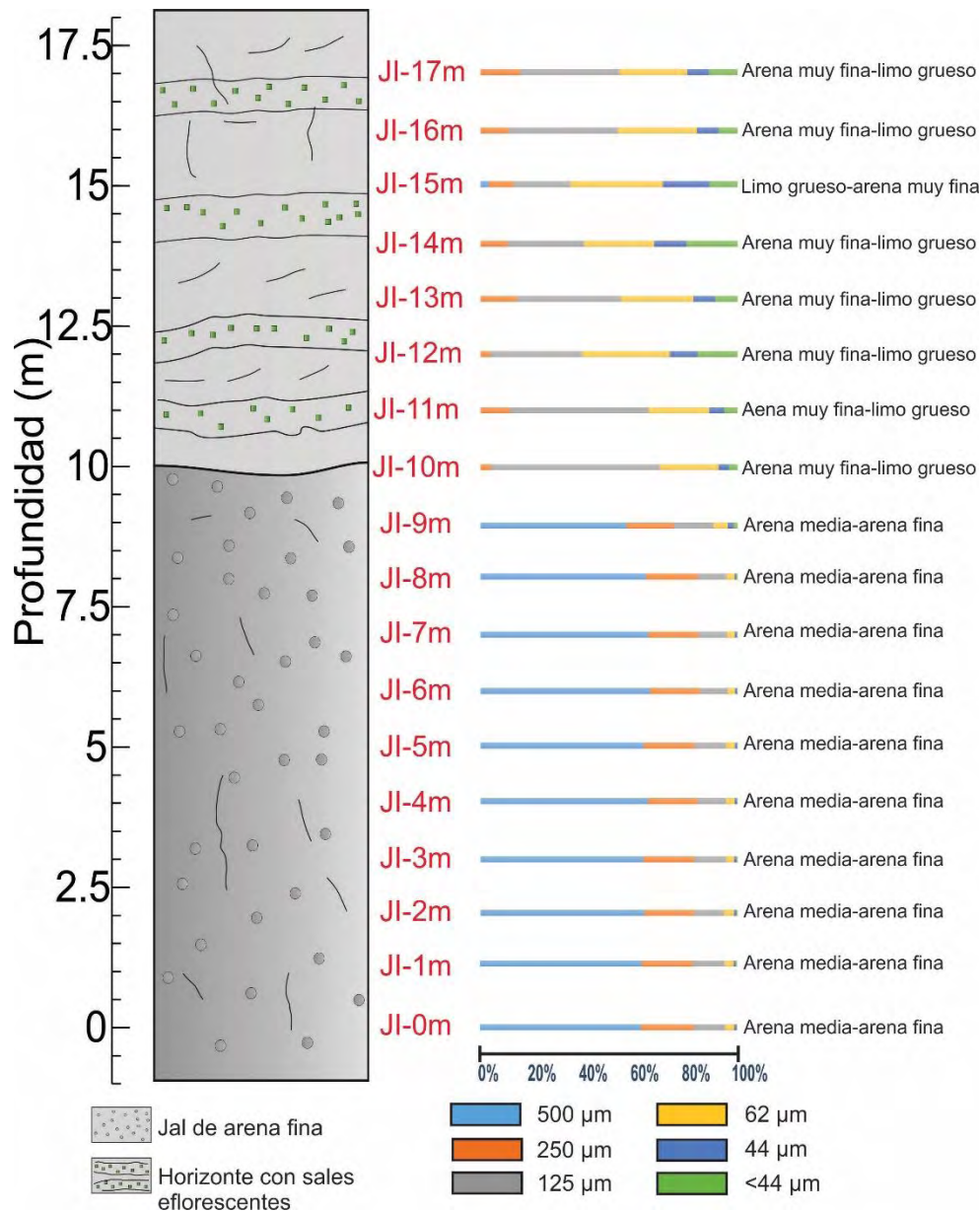


Figura 3.14 Columna granulométrica esquemática de la sección JI para el muestreo de noviembre de 2014.

En la Figura 3.14, correspondiente a la columna JI del primer muestreo, se puede observar que existe un cambio textural importante entre los 9 m y 10 m de altura, y el régimen de arenas medianas (500 μ m) cambia a arenas muy finas (120 -230 μ m) hasta limos gruesos. Este cambio textural es visible en campo ya que la parte basal de la pila de jales es de color rojiza-naranja, mientras que por encima de la parte baja los jales se tornan a tonos de café claro-amarillentos y con la presencia de sales eflorescentes.

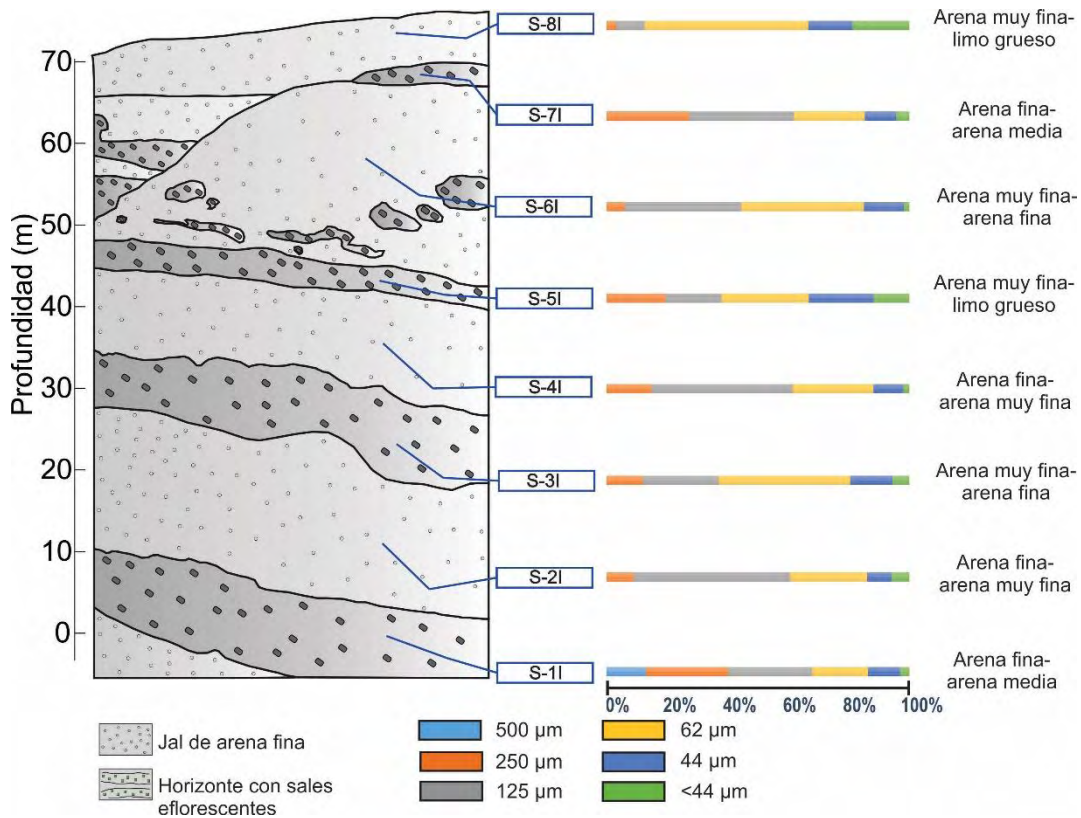


Figura 3.15 Columna granulométrica esquemática de la sección SI para el muestreo de noviembre de 2014.

En la Figura 3.15 se puede observar que en la columna SI del muestreo de noviembre de 2014, la variación textural aparentemente no sigue un patrón continuo. Los cambios texturales a pequeña escala parecen no coincidir mucho con la alternancia de horizontes con sales eflorescentes y con los niveles libres de eflorescencias.

En la Figura 3.16 se observa que la columna JI para el segundo muestreo aún conserva el patrón de textura para la parte basal de los 0 m a los 9 m, persisten las texturas de arenas medias a arenas finas. A partir de los 10 m de altura comienza más variabilidad textural con patrones intercalados de arenas muy finas y limos gruesos. Estos cambios pueden deberse a que el muestreo

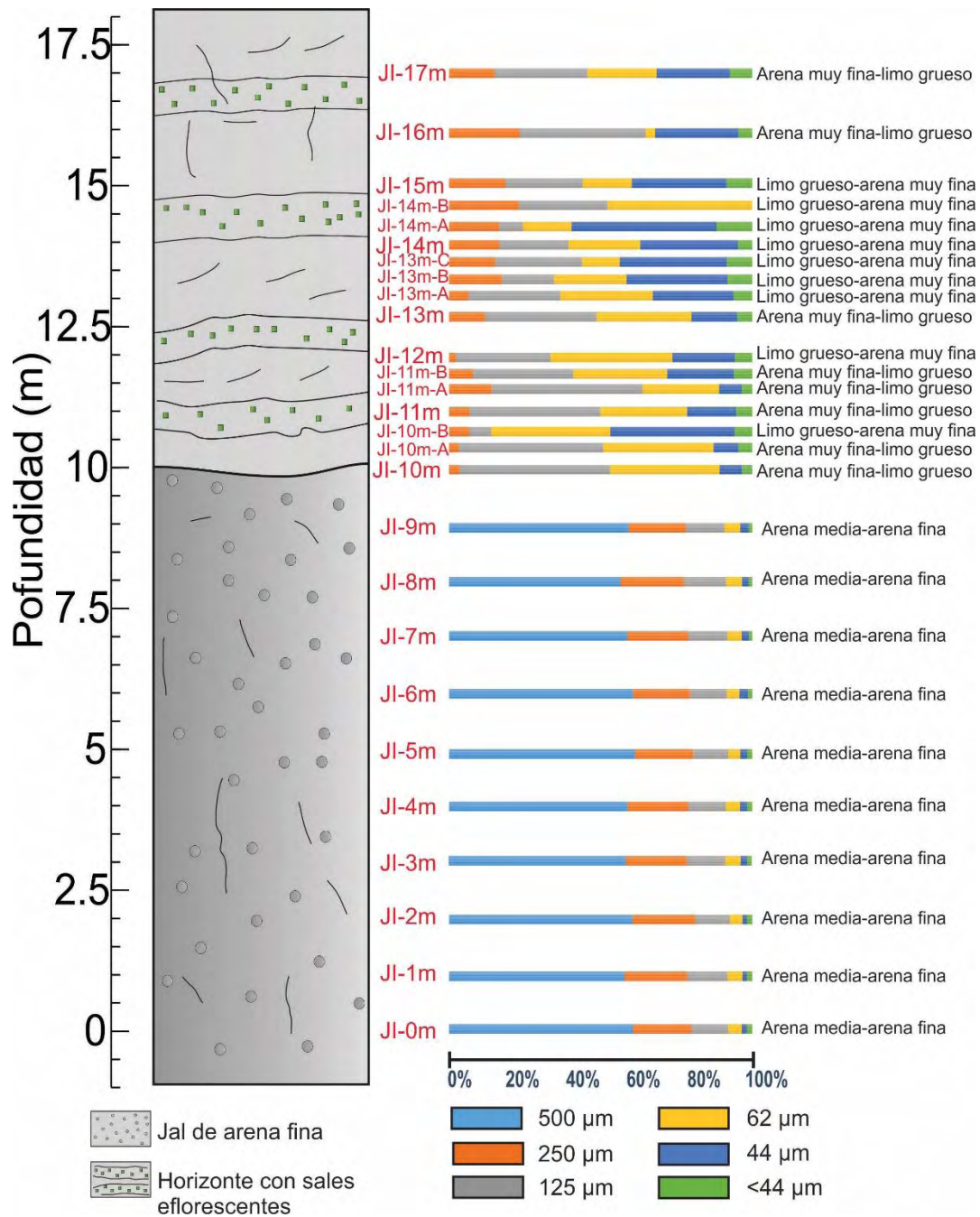


Figura 3.16 Columna granulométrica esquemática de la sección JI para el muestreo de marzo de 2015.

de marzo de 2015 fue más detallado a partir de los 10 m de altura y de esta manera se reflejan características texturales a pequeña escala.

En la columna SI del segundo muestreo (Figura 3.17) se observa que existe una mayor variabilidad con respecto a la misma sección pero del primer muestreo debido a una alternancia más

marcada de arenas muy finas a limos gruesos. En esta sección de marzo de 2015, la muestra S-7I-B es correlacionable con la muestra S-11-B del muestreo de noviembre de 2014. A partir de este punto existe un cambio textural hacia la cima, presentando intercalaciones de horizontes de arenas

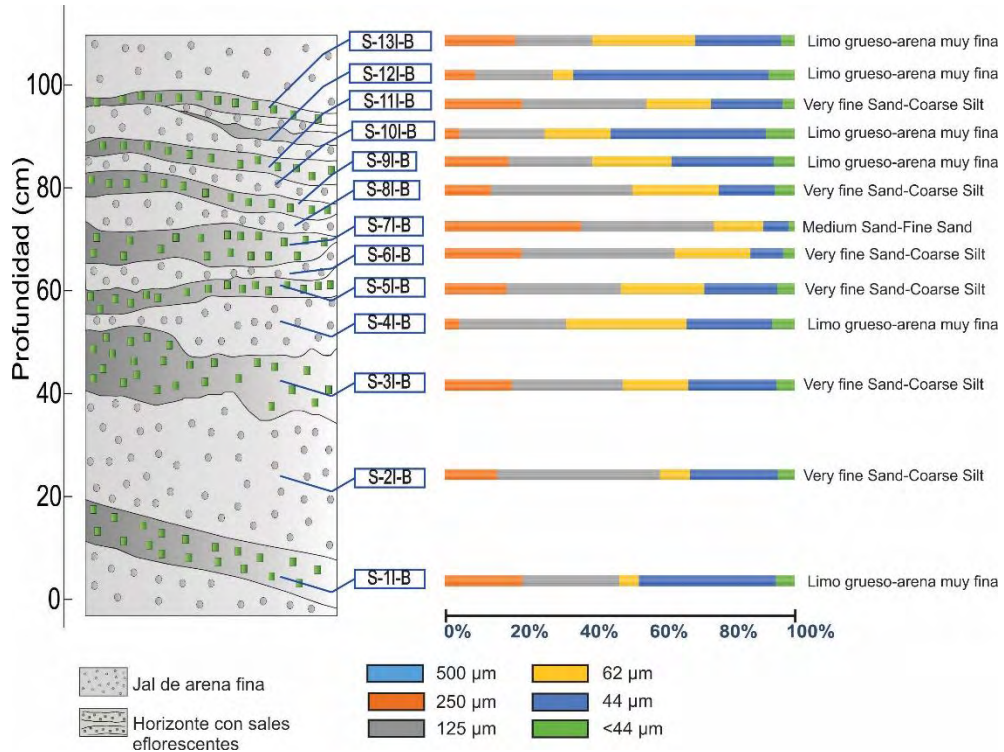


Figura 3.17 Columna granulométrica esquemática de la sección SI para el muestreo de marzo de 2015.

muy finas a limos gruesos.

3.4 Difracción de Rayos X

3.4.1 Metodología

Las muestras fueron analizadas como “muestra total” utilizando la técnica de difracción de rayos X (DRX), utilizando un difractómetro *PANalytical Empyrean* (Figura 3.18) equipado con un filtro de Ni, un monocromador de radiación de rayos X de $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54056 \text{ \AA}$) y un detector



Figura 3.18 Difractómetro PANalytical Empyrean con un monocromador de $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54056 \text{ \AA}$) utilizado para este estudio.

PIXcel3D. La configuración de escaneo fue $0.003^\circ 2\theta$ por paso, con un tiempo de integración de 40 s por paso con un rango de 2θ de 5° a 70° . La interpretación de los picos de difracción se realizó utilizando el software *HighScore Plus v. 4.0*.

Como primer paso la muestra se redujo en un mortero de ágata hasta obtener el tamaño que el difractómetro requiere para realizar las mediciones. Después, el polvo obtenido es depositado en un porta muestras de aluminio (fracciones no orientadas) de doble carga para el equipo de difracción, previamente limpiado (Figura 3.19). De manera consecutiva se hace lo mismo hasta

obtener una pila de porta muestras con la clave de la muestra escrita en cada uno de ellos. Después, los portamuestras se montan en una pila incluida en el difractor, la cual cuenta con un brazo automatizado que va introduciendo y sacando las muestras cuando el análisis concluye para cada una de ellas.

Finalmente, los datos obtenidos de las muestras analizadas por el difractor son enviados a una computadora donde son interpretados por el software *HighScore Plus*. Cabe mencionar que algunos cristales de eflorescencias fueron separados manualmente y vistos en lupa para caracterizarlos con la técnica de DRX, ya que al ser fases mezcladas este procedimiento fue



Figura 3.19 Porta muestras especial para el equipo de difracción. El polvo obtenido de la molturación es vertido en los porta muestras y se va aplanando hasta obtener su forma circular.

adecuado para poder identificarlas por separado. Todos los grupos de difracción y los difractogramas de las muestras se presentan en la sección de resultados.

3.4.2 Resultados

A continuación se presentan los grupos de difracción obtenidos en este estudio, y en la Tabla 16 se enlistan los minerales encontrados en cada grupo de difracción como minerales seguros, posibles y probables. Cada uno de los grupos de difracción determinados se basan en características cristalográficas y picos de difracción similares entre cada muestra. En la Tabla 17 se incorpora además la información de los picos de difracción más importantes para cada mineral encontrado en las muestras de jal y eflorescencias.

Tabla 16 Minerales identificados por difracción de rayos X (DRX). (Información tomada de <http://www.mindat.org/> y <http://webmineral.com/>)

Nombre del Mineral	Formula Química	Grupo	Paragénesis	Picos principales de DRX (Å)		
Alpersita	(Mg,Cu)[SO ₄] · 7H ₂ O	Sulfato	Se forma por las aguas de drenaje ácido de mina (DAM) con ensambles mineralógicos zonados en áreas con una humedad relativa de 65% y una T= 4°C. Al deshidratarse forma la Pentahidrita cúprica.	4.85	3.779	4.44
Calcantita	CuSO ₄ · 5H ₂ O	Sulfato	Es un mineral secundario soluble formado en climas áridos o en depósitos de cobre de rápida oxidación. Usualmente es un mineral post-industria minera.	4.73	3.71	3.99
Cuarzo	SiO ₂	Tectosilicato	Mineral que se forma en diversas condiciones geológicas. Puede estar presente en casi todas las rocas y sus condiciones de formación son muy amplias.	3.342	4.257	1.817
Ferrihidrita	5Fe ₂ O ₃ · 9H ₂ O	Óxido	Es un mineral secundario formado en condiciones de oxidación, se forma por la rápida oxidación o hidrólisis. Es un nanomineral metaestable precursor de otros minerales como la hematita	2.45	1.97	2.25
Jarosita	KFe ³⁺ ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Sulfato	Mineral secundario formado durante condiciones de intemperismo en climas áridos. Se puede formar en zonas de oxidación en depósitos de sulfuros o también por la reacción de ácido sulfúrico derivado de la oxidación de sulfuros como la pirita.	3.08	3.11	2.292
Jokokuita	MnSO ₄ · 5H ₂ O	Sulfato	Eflorescencia que se encuentra en zonas oxidadas en sitios mineros. Aparentemente se deposita a partir del DAM a 25° C.	5.84	2.72	4.98
Muscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Filosilicato	Es un mineral muy común en el grupo de las micas y es encontrado en una diversa cantidad y tipo de rocas.	10.01	3.35	2.56
Ortoclasa	K(AlSi ₃ O ₈)	Tectosilicato	Mineral del grupo de los feldespatos muy común en rocas graníticas, sienitas, rocas metamórficas de alto grado y rocas félsicas extrusivas.	3.31	3.77	4.22
Pentahidrita cúprica	(Mg, Cu)SO ₄ · 5H ₂ O	Sulfato	Es un mineral hidratado producto de la deshidratación de la alpersita, se forma en condiciones oxidantes en suelos mineros o por aguas de drenaje ácido de mina. Aparentemente tóxico.	4.824	3.704	2.691
Rozenita	FeSO ₄ · 4H ₂ O	Sulfato	Es un mineral común producto de la alteración de pirita, marcasita, pirrotita, etc. Es un mineral secundario formado por debajo de los 21° C y en condiciones de baja humedad directamente del mineral melanterita libre de Cu.	4.47	5.46	3.97
Ramsbeckita	(Cu,Zn) ₁₅ (SO ₄) ₄ (OH) ₂₂ · 6H ₂ O	Sulfato	Mineral poco usual formado por la oxidación de jales y terreros producto de la zona de oxidación del supergénico.	7.09	3.549	1.776
Yeso	CaSO ₄ · 2H ₂ O	Sulfato	Es el sulfato más común, generalmente se encuentra en depósitos evaporíticos, en fumarolas y en ocasiones en zonas de oxidación en depósitos de sulfuros.	7.63	4.28	3.07

Tabla 17 Agrupamiento de muestras en cuatro grupos, se presentan los minerales seguros, posibles y probables.

Grupos	Muestras	Minerales seguros	Minerales posibles	Minerales probables
Grupo 1	S-1I-B-291114 S-2I-A-291114 S-2I-B-291114 S-3I-B-291114 S-4I-A-291114 S-4I-A-300315 S-4I-B-291114 S-6I-A-300315 S-8I-A-300315 S-10I-A-300315 JI-0m-291114 JI-5m-291114 JI-10m-291114 JIS-10m-A-300315 JIS-11m-A-300315 JIS-13m-A-300315	Cuarzo, muscovita, yeso, ortoclasa, jokokuita	Jarosita, ramsbeckita	
Grupo 2	S-9II-A-300315 S-13II-A-300315 JIS-13m-B-300315	Cuarzo, yeso, calcantita, pentahidrita cúprica, alpersita, ortoclasa, muscovita	Ramsbeckita, jarosita, rozenita, ferrihidrita	Bonattita, szomolnokita
Grupo 3	S-1II-A-300315 JIS-10m-B-300315 JIS-11m-B-300315 JIS-14m-B-300315	Cuarzo, yeso, calcantita, pentahidrita cúprica, alpersita, ortoclasa, muscovita	Ramsbeckita, jarosita, rozenita, alpersita	Boothita
Grupo 4	S-1I-A-291114 S-3I-A-291114 S-3I-A-300315 S-5I-A-300315 S-7I-A-300315 S-9I-A-300315 S-1II-291114 S-3II-291114 S-5II-291114 S-5II-A-300315	Cuarzo, calcantita, yeso, pentahidrita cúprica, muscovita, ortoclasa	Ramsbeckita	

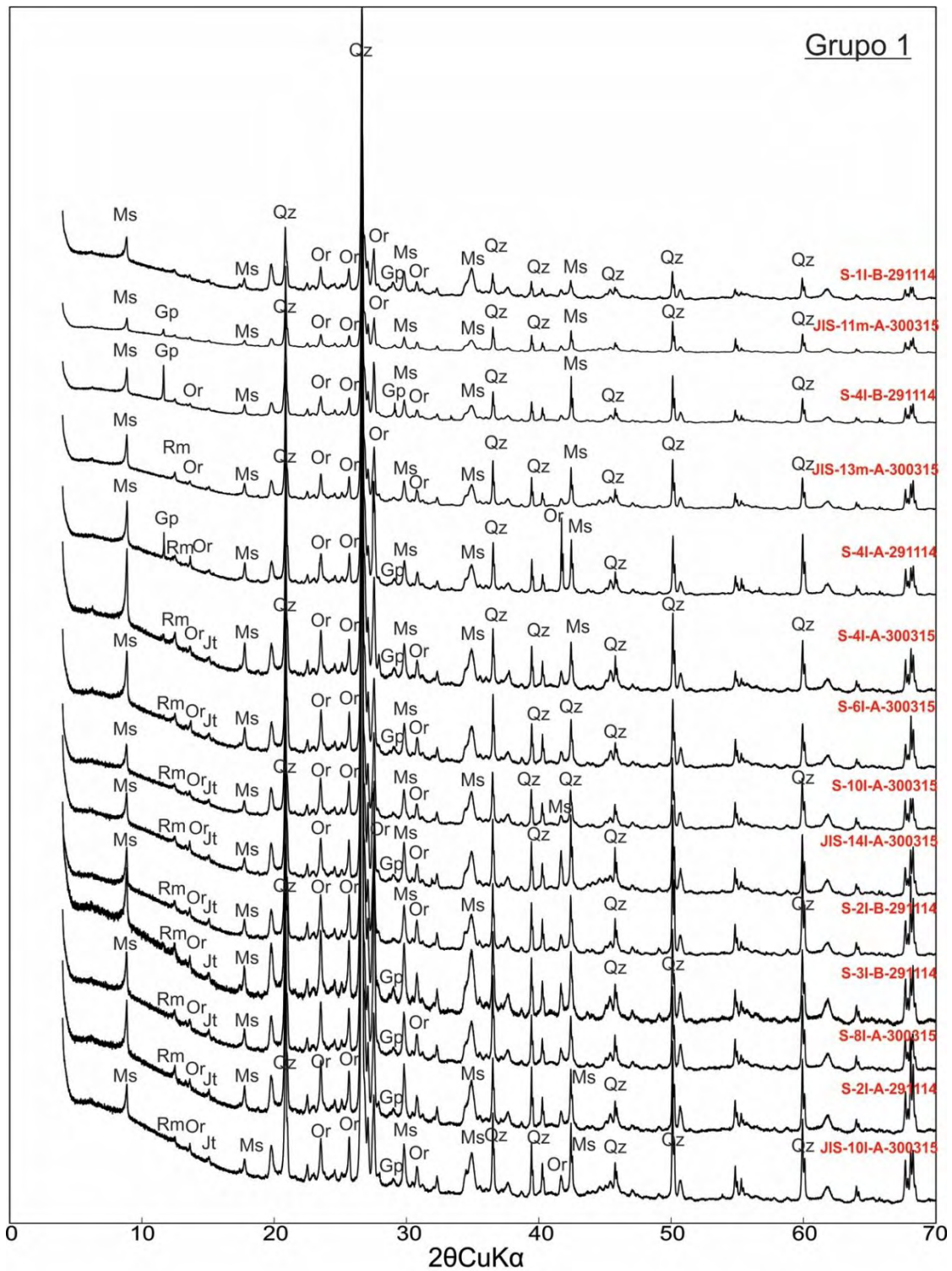


Figura 3.20 Grupo 1 de difracción de rayos X. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo, Jt= jarosita.

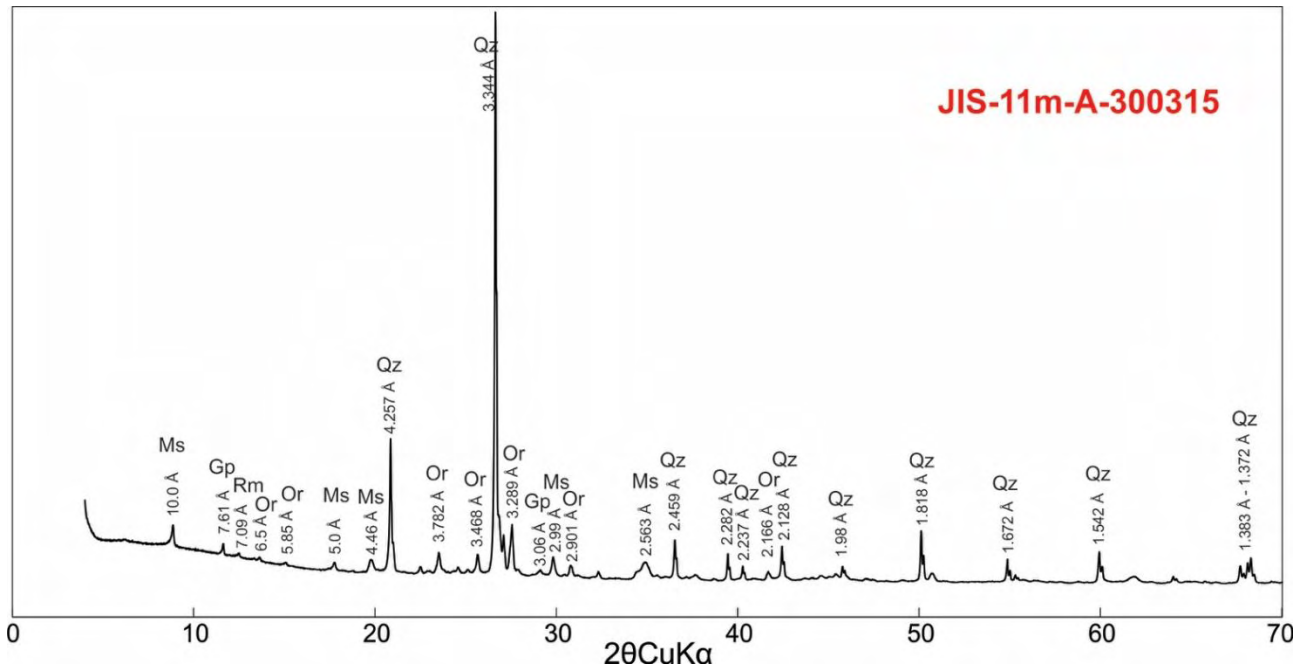


Figura 3.21 Muestra JIS-11m-A-300315 representativa del grupo de difracción 1. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo.

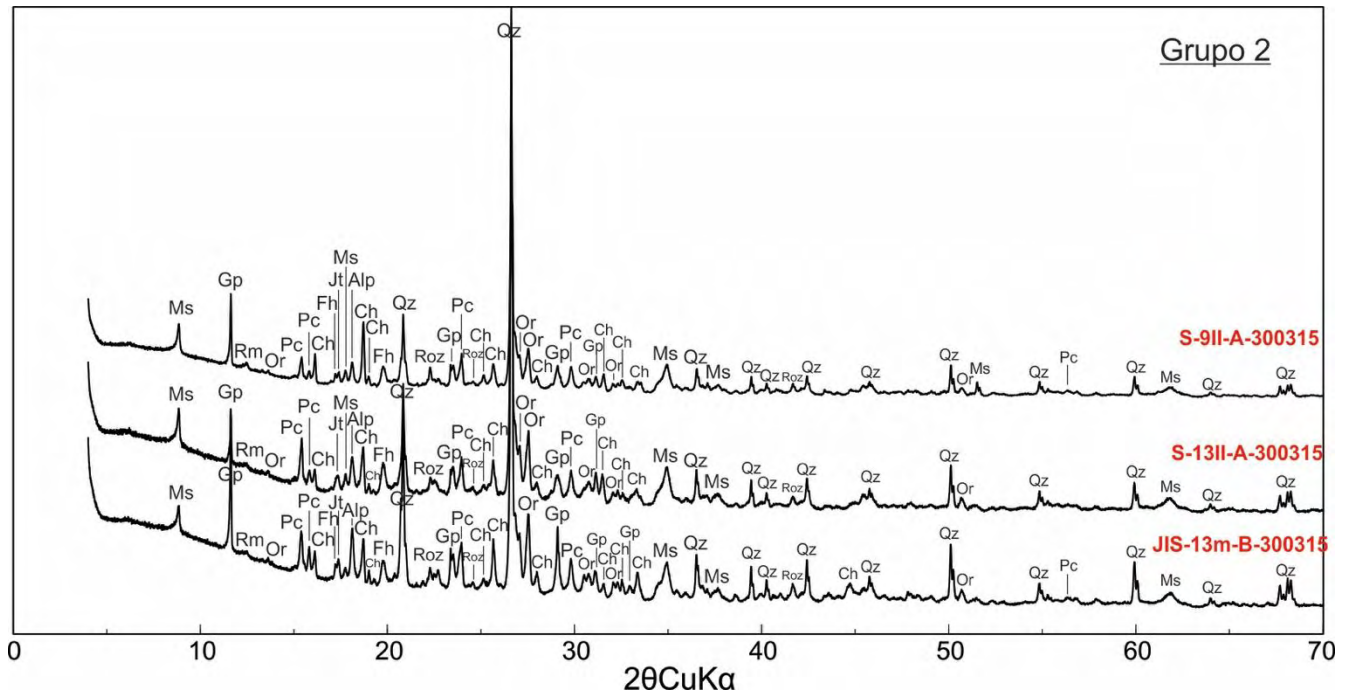


Figura 3.22 Grupo 2 de difracción de rayos X. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Fh= ferrihidrita, Jt= jarosita, Alp= alpersita, Qz= cuarzo, Roz= rozenita.

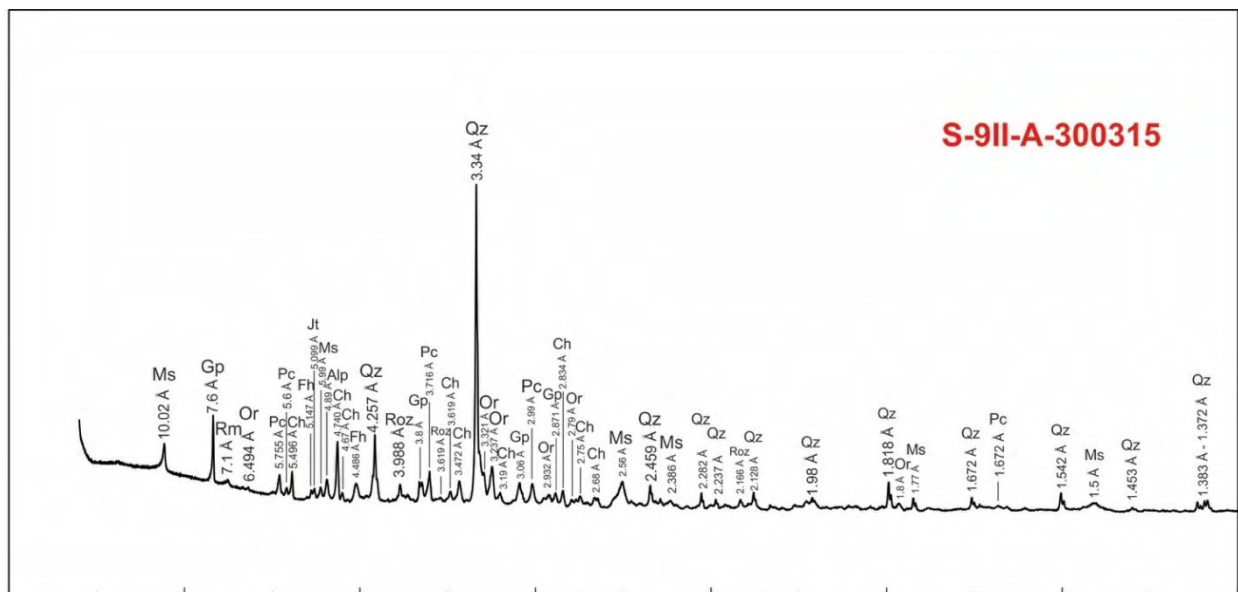


Figura 2.23 Muestra S-9II-A-300315 representativa del grupo 2 de DRX. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Fh= ferrihidrita, Jt= jarosita, Alp= alpersita, Qz= cuarzo, Roz= rozenita.

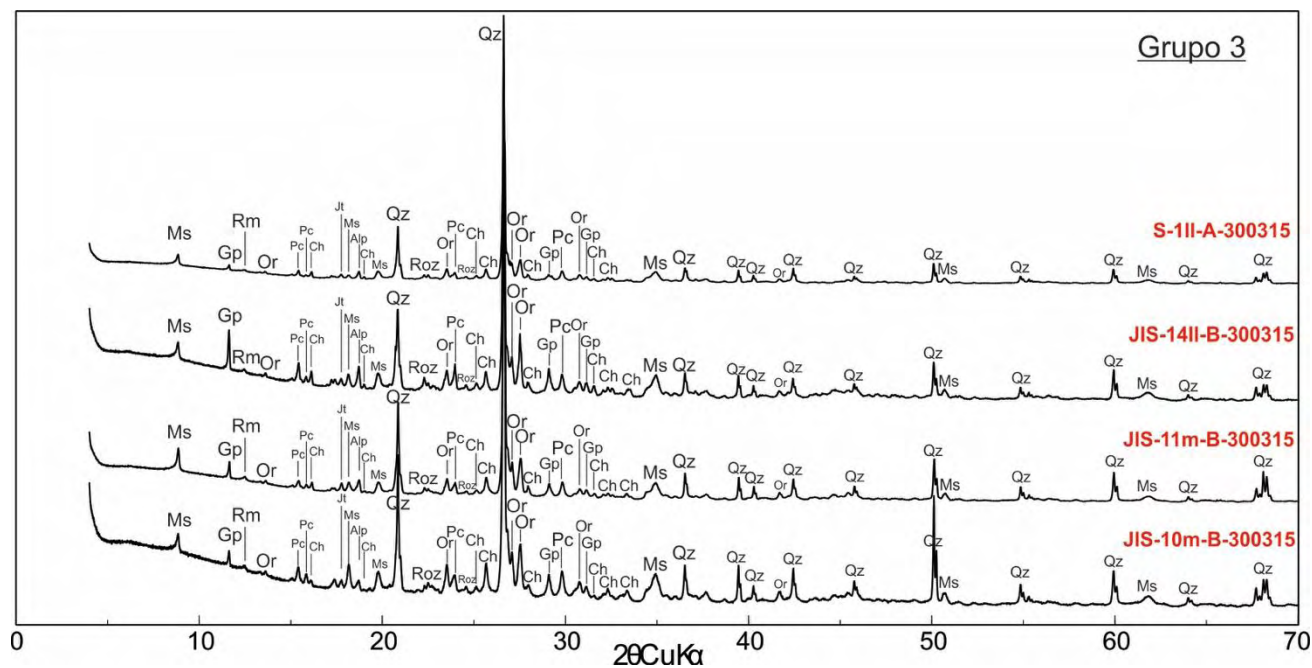


Figura 3.24 Grupo 3 de difracción de rayos X. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Jt= jarosita, Alp= alpersita, Qz= cuarzo, Roz= rozenita.

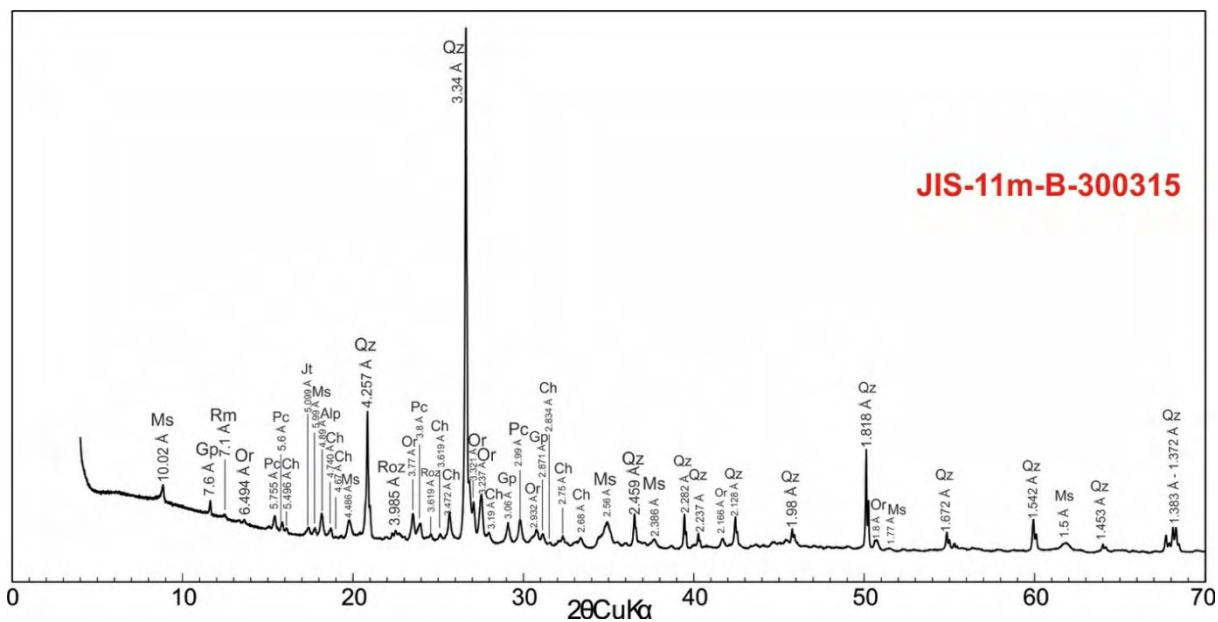


Figura 3.25 Muestra JIS-11m-B-300315 representativa del grupo 3 de DRX. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Jt= jarosita, Alp= alpersita, Qz= cuarzo, Roz= rozenita.

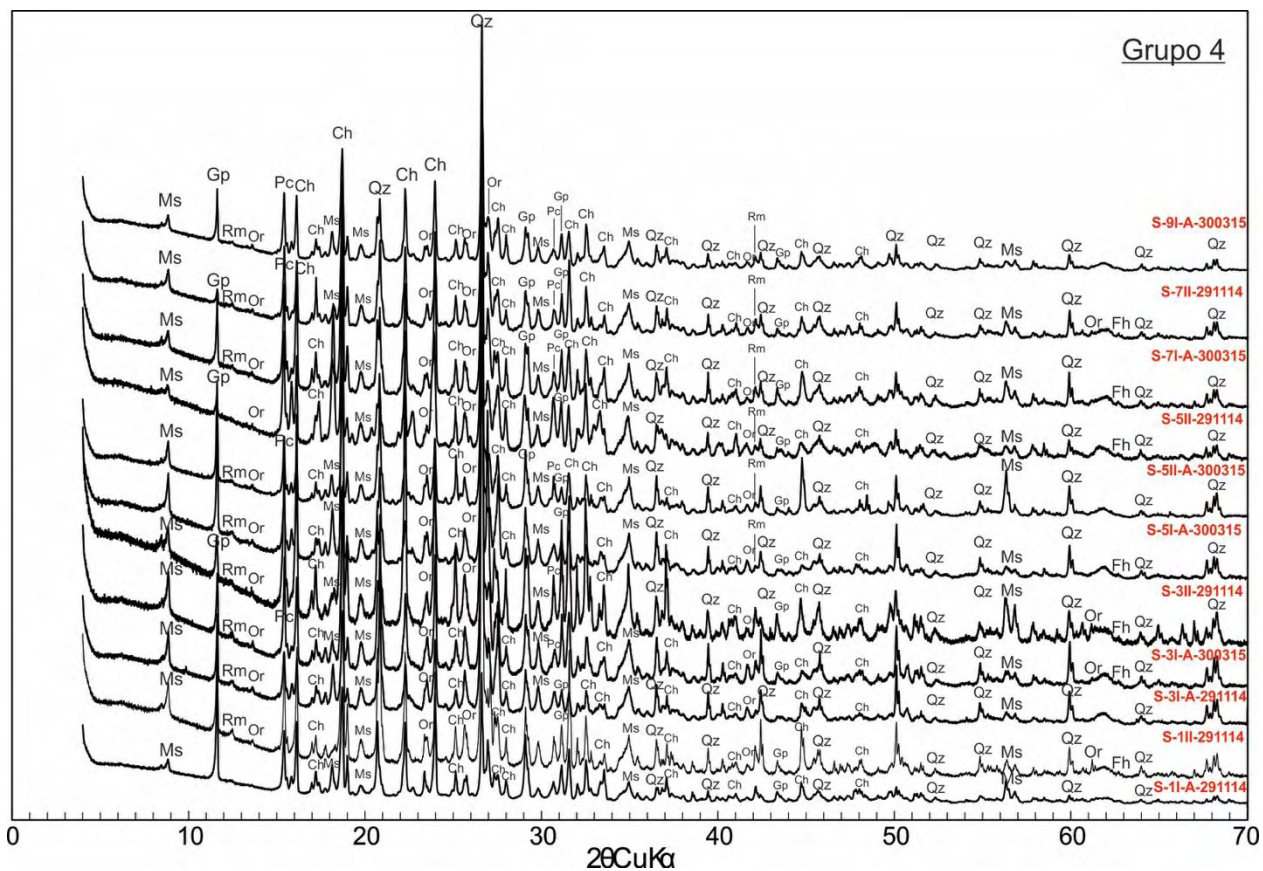


Figura 3.26 Grupo 4 de difracción de rayos X. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Qz= cuarzo.

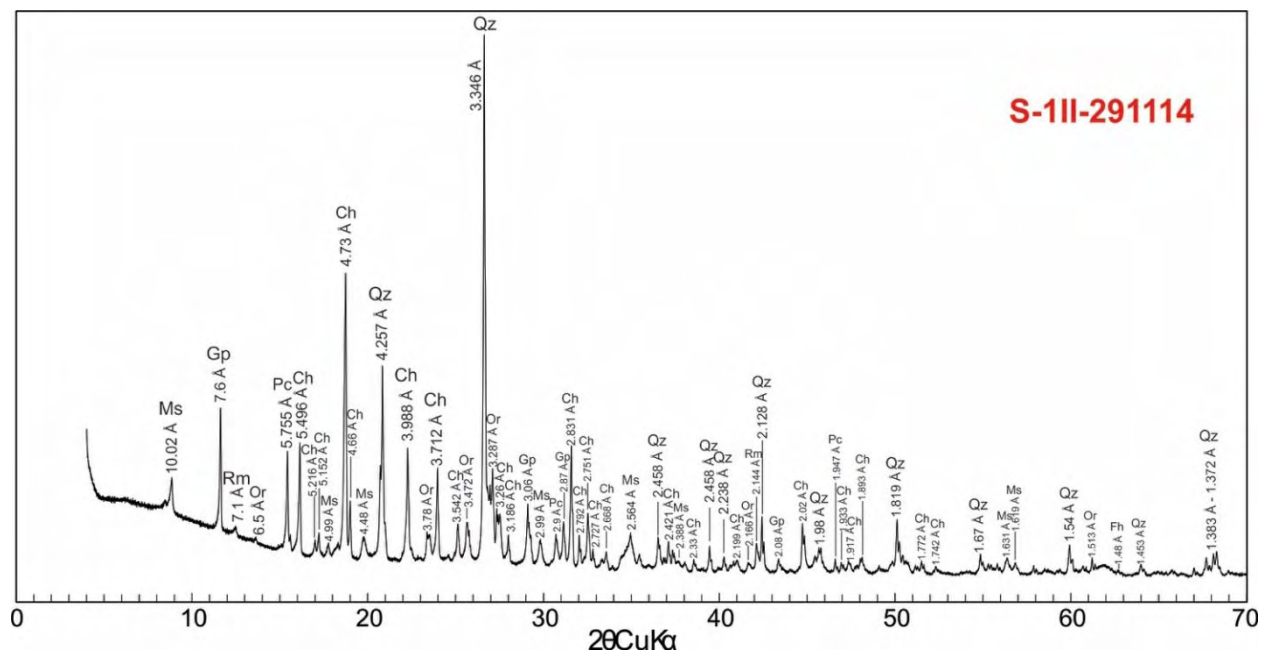


Figura 3.27 Muestra S-III-291114 representativa del grupo 4 de DRX. Ms= muscovita, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Or= ortoclasa, Pc= pentahidrita cúprica, Ch= calcantita, Qz= cuarzo.

Las muestras con la nomenclatura S-II corresponden a otra columna donde el objetivo principal era analizarlas por DRX ya que eran las mejor preservadas y con mejor cristalinidad. A estas muestras no se les aplicó el análisis granulométrico ni de FRX.

Se hicieron análisis a tres muestras representativas de jal de la parte basal de la columna JI que presentan una coloración rojiza a naranja debido a la presencia de jarosita. Además aparece una fase mineral del grupo de las calcantitas llamada jokokuita, la cual es una eflorescencia de sulfato de manganeso hidratado que solo aparece en esta parte basal.

Las muestras analizadas de la parte basal son las JI-0m-29114, JI-5m-29114 y JI-10m-29114, las cuales tienen similitudes mineralógicas con la presencia de cuarzo, muscovita, jarosita, ortoclasa y jokokuita.

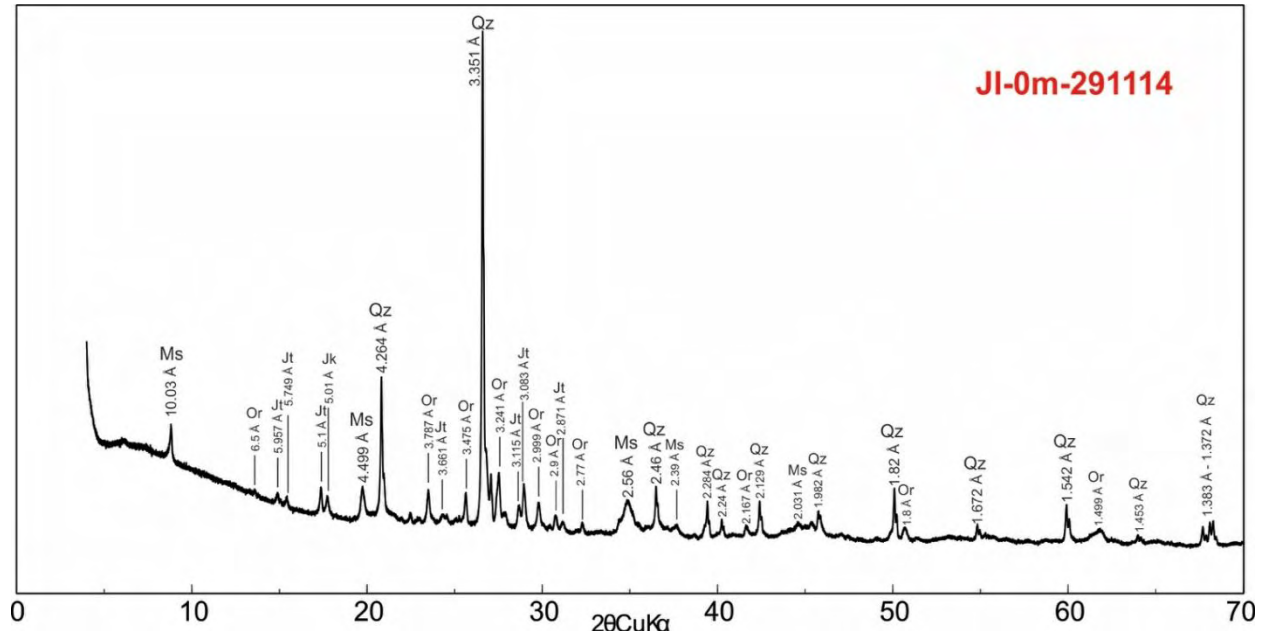


Figura 3.28 Muestra JI-0m-29114 que forma parte de la zona basal de la sección JI. Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo, Jt= jarosita, Jk= jokokuita.

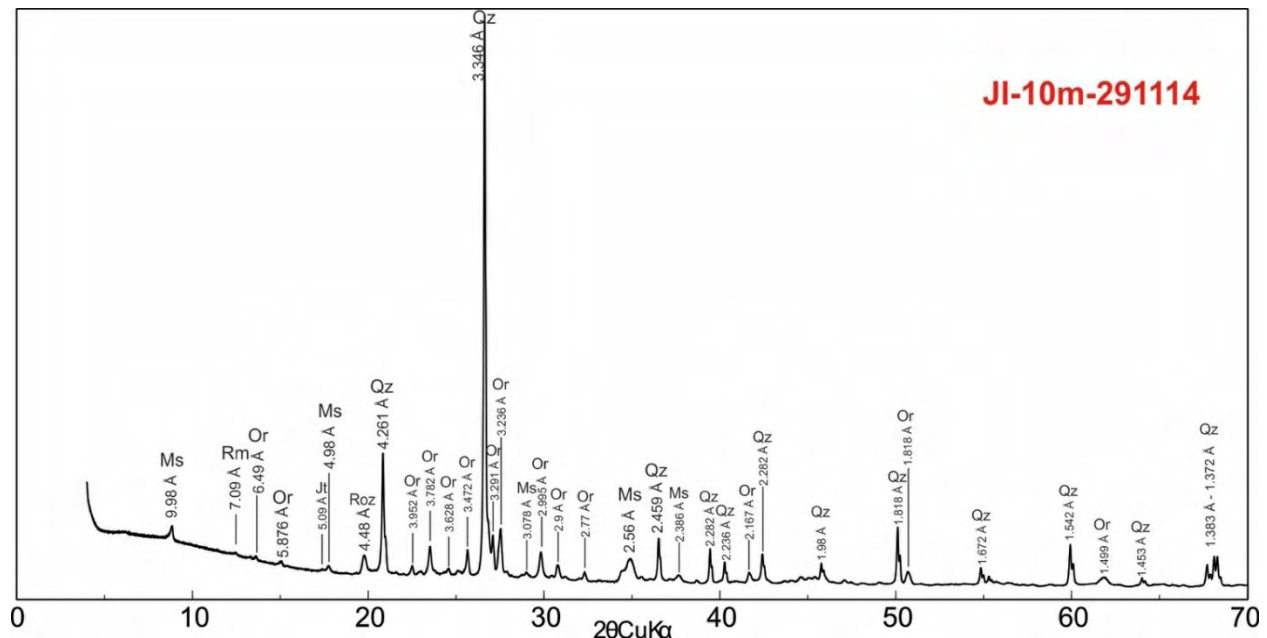


Figura 3.29 Muestra JI-5m-29114 que forma parte de la zona basal de la sección JI. Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo, Jt= jarosita, Jk= jokokuita.

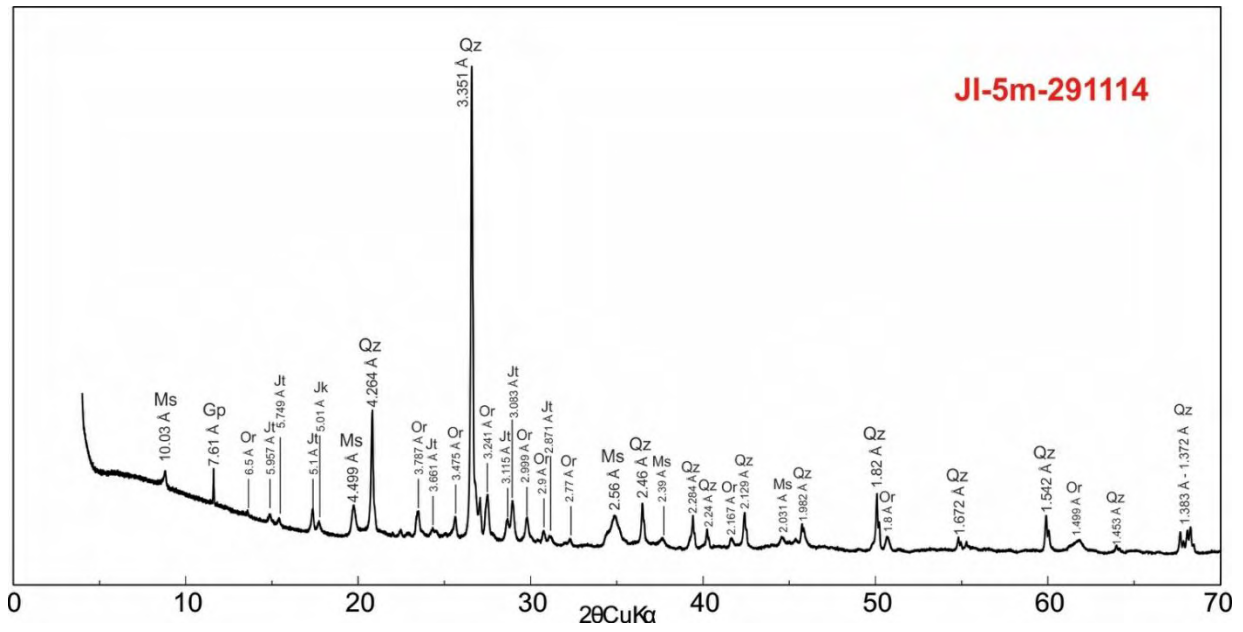


Figura 3.30 Muestra JI-10m-291114 que forma parte de la zona basal de la sección JI. Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Qz= cuarzo, Jt= jarosita, Jk= jokokuita.

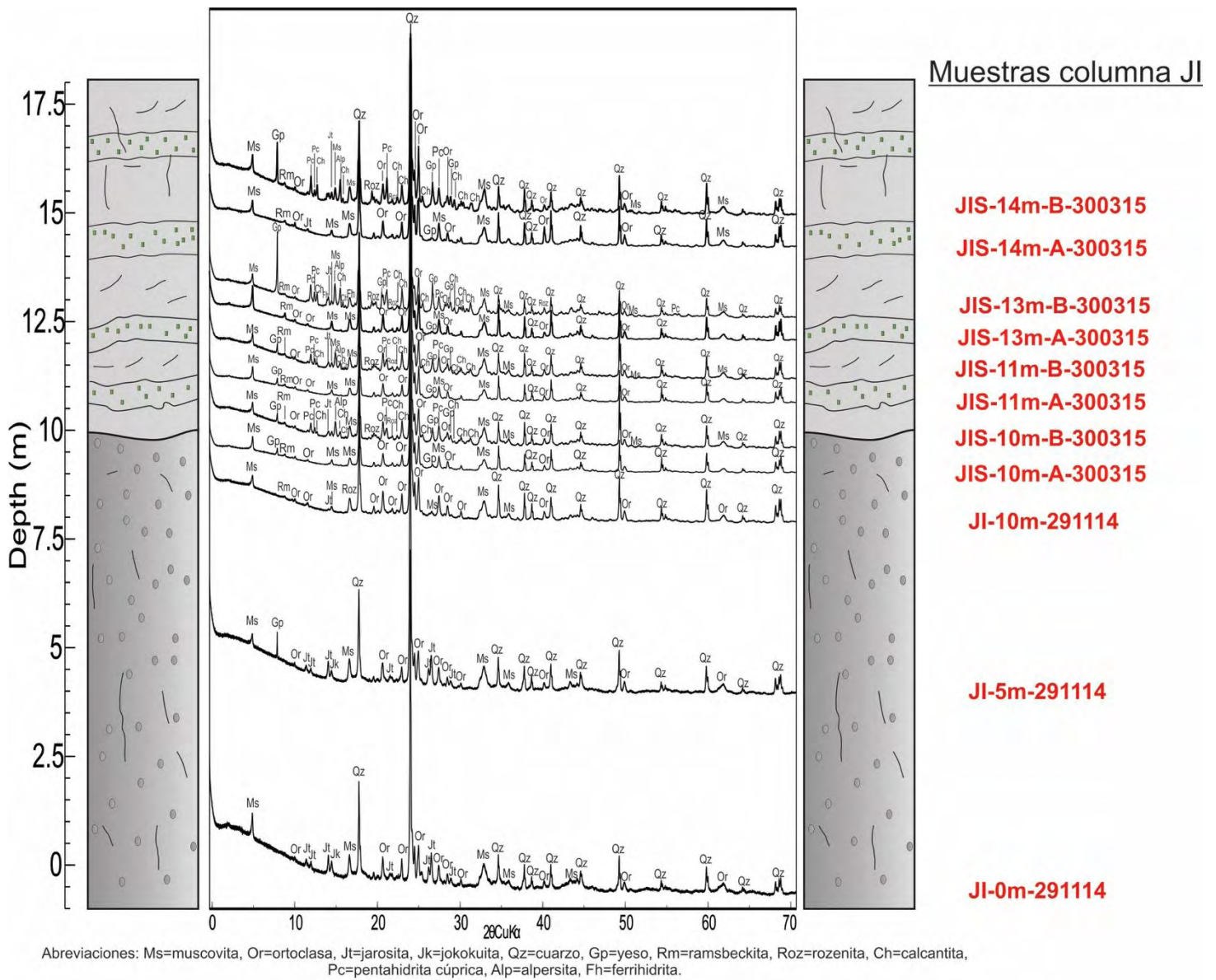


Figura 3.31 Columna de difracción de rayos X para la sección JI, se representa la columna esquemática a los costados con un límite marcado a la altura de 10 m que divide la parte basal de arenas medias y la parte superior de arenas muy finas a limos gruesos.

Cada uno de los difractogramas obtenidos fueron agrupados en columnas, las correspondientes a las columnas JI y SI para poder ver los minerales que aparecen y desaparecen con respecto a la altura y con las condiciones fisicoquímicas del medio. Las Figuras 3.31 y 3.32 representan las columnas JI y SI respectivamente y se anexa una tabla que explica la ocurrencia de los minerales en cada una de las muestras con respecto a la altura.

Tabla 18 Variabilidad mineralógica de la columna JI con respecto a la altura. X= mineral presente, Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Jt= jarosita, Jk= jokokuita, Qz= cuarzo, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Roz= rozenita, Ch= calcantita, Pc= pentahidrita cúprica, Alp= alpersita, Fh= ferrihidrita.

Columna JI													
Altura (m)	Muestra	Ms	Or	Jt	Jk	Qz	Gp	Rm	Roz	Ch	Pc	Alp	Fh
14.8	JIS-14m-B-300315	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
14.4	JIS-14m-A-300315	X	X			X		X					
13.6	JIS-13m-B-300315	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
13.3	JIS-13m-A-300315	X	X			X		X					
11.8	JIS-11m-B-300315	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
11.4	JIS-11m-A-300315	X	X			X	X	X					
10.8	JIS-10m-B-300315	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
10.4	JIS-10m-A-300315	X	X			X	X	X					
10	JI-10m-291114	X	X	X	X	X		X	X				
5	JI-5m-291114	X	X	X	X	X	X						
0	JI-0m-291114	X	X	X	X	X							

Tabla 19 Variabilidad mineralógica de la columna JI con respecto a la altura. X= mineral presente, Ms= muscovita, Or= ortoclasa, Jt= jarosita, Qz= cuarzo, Gp= yeso, Rm= ramsbeckita, Ch= calcantita, Pc= pentahidrita cúprica, Fh= ferrihidrita.

Columna JI													
Altura (cm)	Muestra	Ms	Or	Jt	Jk	Qz	Gp	Rm	Roz	Ch	Pc	Alp	Fh
83	S-10I-A-300315	X	X	X		X		X					
73	S-9I-A-300315	X	X			X	X	X		X	X		
64	S-8I-A-300315	X	X	X		X		X					
55	S-7I-A-300315	X	X			X	X	X		X	X		X
47	S-6I-A-300315	X	X	X		X		X					
41	S-5I-A-300315	X	X			X	X	X		X	X		X
36	S-4I-A-300315	X	X	X		X	X	X					
26	S-3I-A-300315	X	X			X	X	X		X	X		X
12	S-2I-A-300315	X	X	X		X		X					
0	S-1I-A-300315	X	X			X	X	X		X	X		

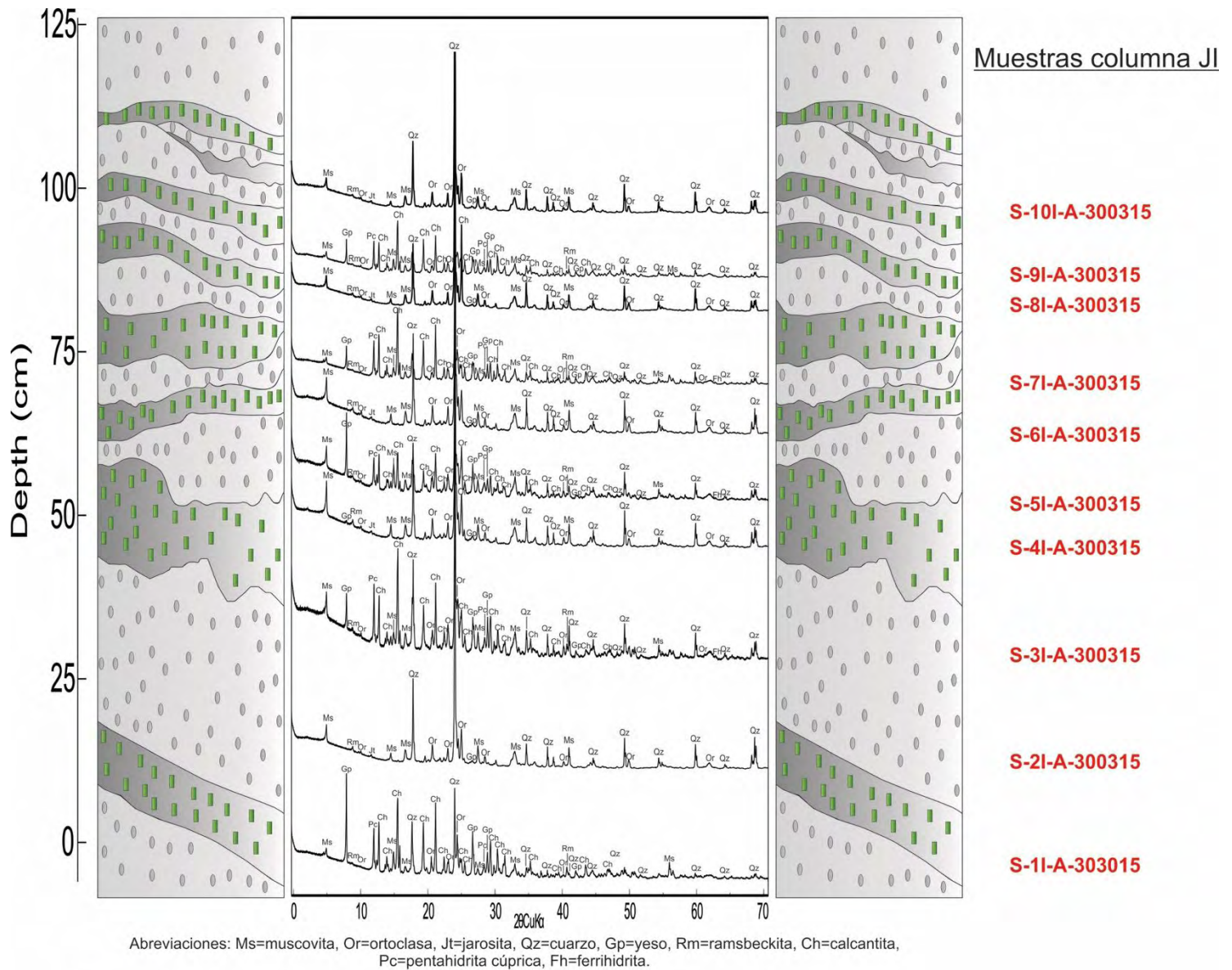


Figura 3.32 Columna de difracción de rayos X para la sección SI, se representa la columna esquemática a los costados, los tonos grises claros representan jales sin sales eflorescentes y los tonos más oscuros con rectángulos verdes representan horizontes con sales eflorescentes.

3.5 Fluorescencia de Rayos X

3.5.1 Metodología

De todas las muestras que fueron tamizadas se obtuvo una porción para el análisis de FRX, y cada muestra fue subdividida en base a la fracción granulométrica obtenida (Tabla 1). Cada muestra fue colocada en bolsas de polietileno de 2x2 cm y fueron etiquetadas (Figura 3.33). Este procedimiento se hizo para las columnas JI, SI y las costras de sales eflorescentes de la columna SI.

Para este estudio se utilizó un espectrómetro portátil de fluorescencia de rayos X marca *Thermo Scientific modelo Niton FXL 950 FM-XRF Analyzer*, equipado con un tubo de Ag de 50 kV (Figura 3.34), con el cual se analizaron un total de 378 muestras. Las muestras fueron analizadas mediante el método *Test All Geo*. El tiempo de medición para cada muestra fue 90 s por triplicado, con un total de 3 filtros con un tiempo de medición de 30 s para cada filtro. Los estándares utilizados para este estudio fue el Montana Soil 2710a para el primer muestreo, y el Montana Soil 2710a, el CCPRP TILL-4PP y el CRM-SA-C (Sandy Soil) para el segundo muestreo.



Figura 3.33 Muestras para FRX subdivididas por fracciones obtenidas en el análisis granulométrico.



Figura 3.34 Equipo de FRX portátil marca Thermo Scientific modelo Niton FXL 950 FM-XRF Analyzer. La muestra es montada en el analizador para ser irradiada por rayos X.

Los valores de referencia de los certificados se enlistan en un anexo al final. Una vez obtenidos los resultados de los análisis de FRX se hicieron las gráficas correspondientes para cada columna estudiada y graficas que representan las concentraciones elementales con respecto a la profundidad. Se presentan además los cálculos de RSD y %D para cada estándar utilizado.

3.5.2 Resultados

En el anexo se presentan los valores de referencia de los certificados utilizados en los análisis de FRX. La Figura 3.35 muestra los valores de %D (Exactitud) para todos los elementos detectados y validados para el estándar Montana Soil 2710a. Se toman como elementos confiables aquellos que sus valores de %D están en el rango de $\pm 20\%$, solo se graficaron los elementos que caen en ese rango. Para el primer muestreo se tomaron como confiables los siguientes elementos: Zr, Sr, U, Rb, Pb, As, Zn, W, Cu, Fe, Mn, V, Ti, Ca y K. Las Figuras 3.36-3.38 presentan los valores de %D para los elementos detectados y validados para los estándares Montana Soil 2710a, CCPRP TILL-4PP y CRM-SA-C (Sandy Soil). Los elementos confiables para el segundo muestro fueron: Zr, Sr, U, Pb, Zn, Cu, Fe, V, Ti, K, Mo, As, Mn, Ca, Te, Sn, Nb, Bi, Se, Ni, Cd y Ag.

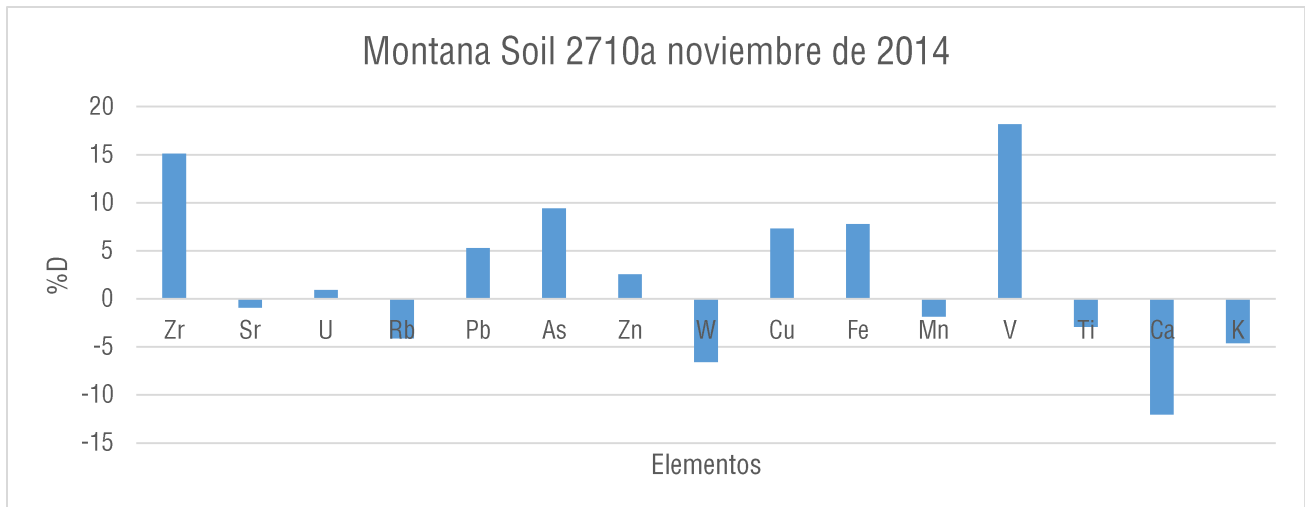


Figura 3.35 Elementos confiables para el estándar Montana Soil 2710a del muestreo de noviembre de 2014. Se grafican solo los elementos que se encuentran en el rango de %D de $\pm 20\%$.

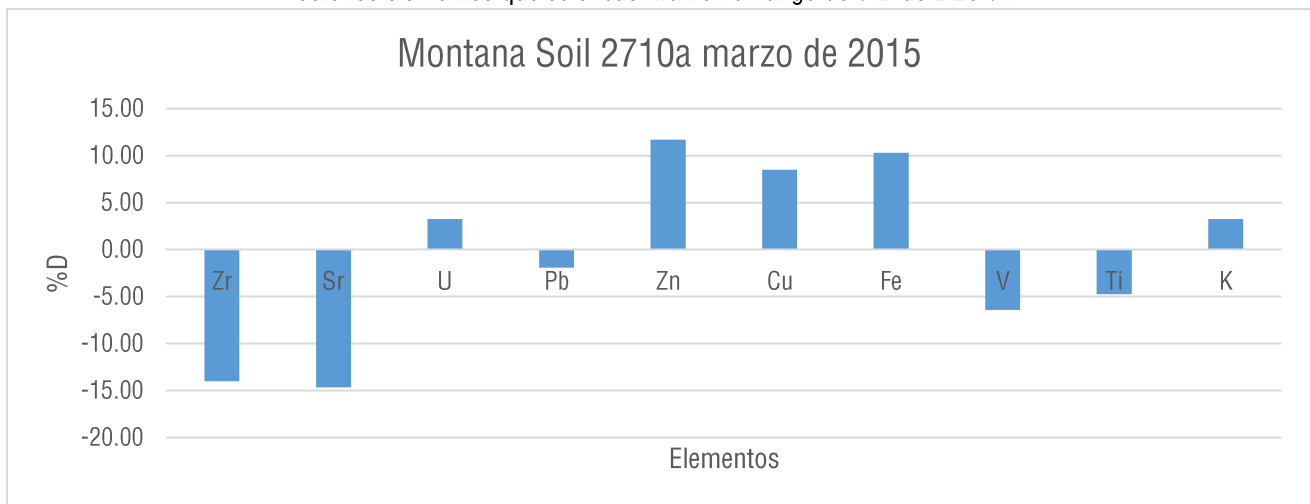


Figura 3.36 Elementos confiables para el estándar Montana Soil 2710a del muestreo de marzo de 2015. Se grafican solo los elementos que se encuentran en el rango de %D de $\pm 20\%$.

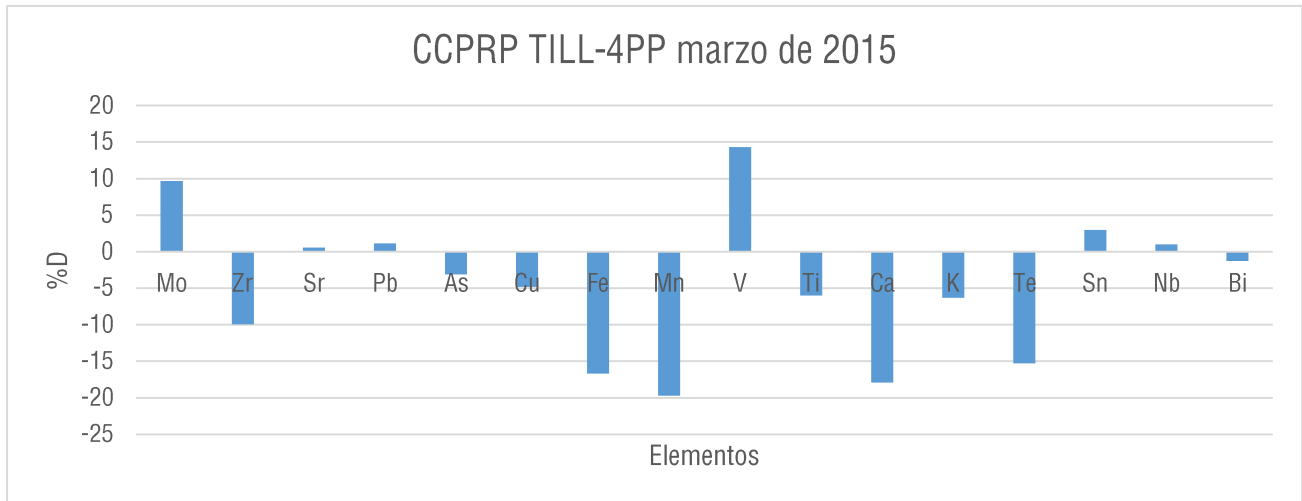


Figura 3.37 Elementos confiables para el estándar CCPRP TILL-4PP del muestreo de marzo de 2015. Se grafican solo los elementos que se encuentran en el rango de %D de ± 20 %.

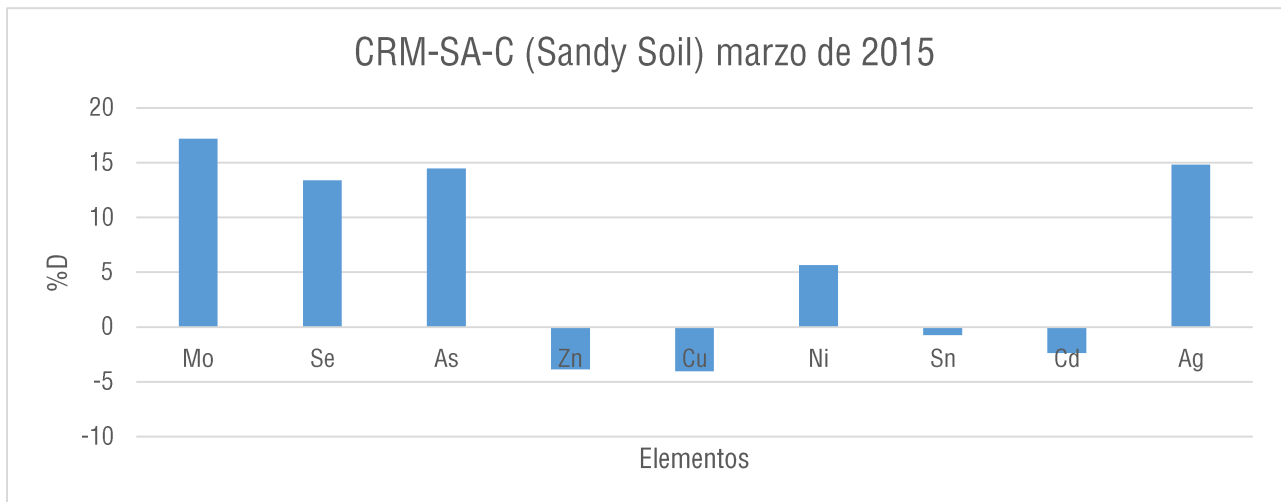


Figura 3.38 Elementos confiables para el estándar CRM-SA-C (Sandy Soil) del muestreo de marzo de 2015. Se grafican solo los elementos que se encuentran en el rango de %D de ± 20 %.

La desviación estándar relativa fue calculada mediante la fórmula siguiente:

$$RSD = \frac{DS}{CP} \times 100$$

Donde:

RSD = Desviación estándar relativa

DS = Desviación estándar de la concentración del analito

CP = Concentración promedio medida

La ecuación del porcentaje de diferencia se calculó de la siguiente manera:

$$\%D = \frac{(C_s - C_k)}{C_k} \times 100$$

Donde:

%D = Porcentaje de diferencia

C_k = Concentración del certificado (valor de referencia)

C_s = Concentración medida del estándar por el equipo

3.5.2.1 Muestreo de noviembre de 2014

A continuación se presentan las Figuras 3.39-3.41 correspondientes a las concentraciones elementales con respecto a la profundidad de la columna JI del muestreo de noviembre de 2014. Se muestra las concentraciones por cada fracción obtenida de los elementos validados por el estándar Montana Soil 2710a con respecto a la profundidad.

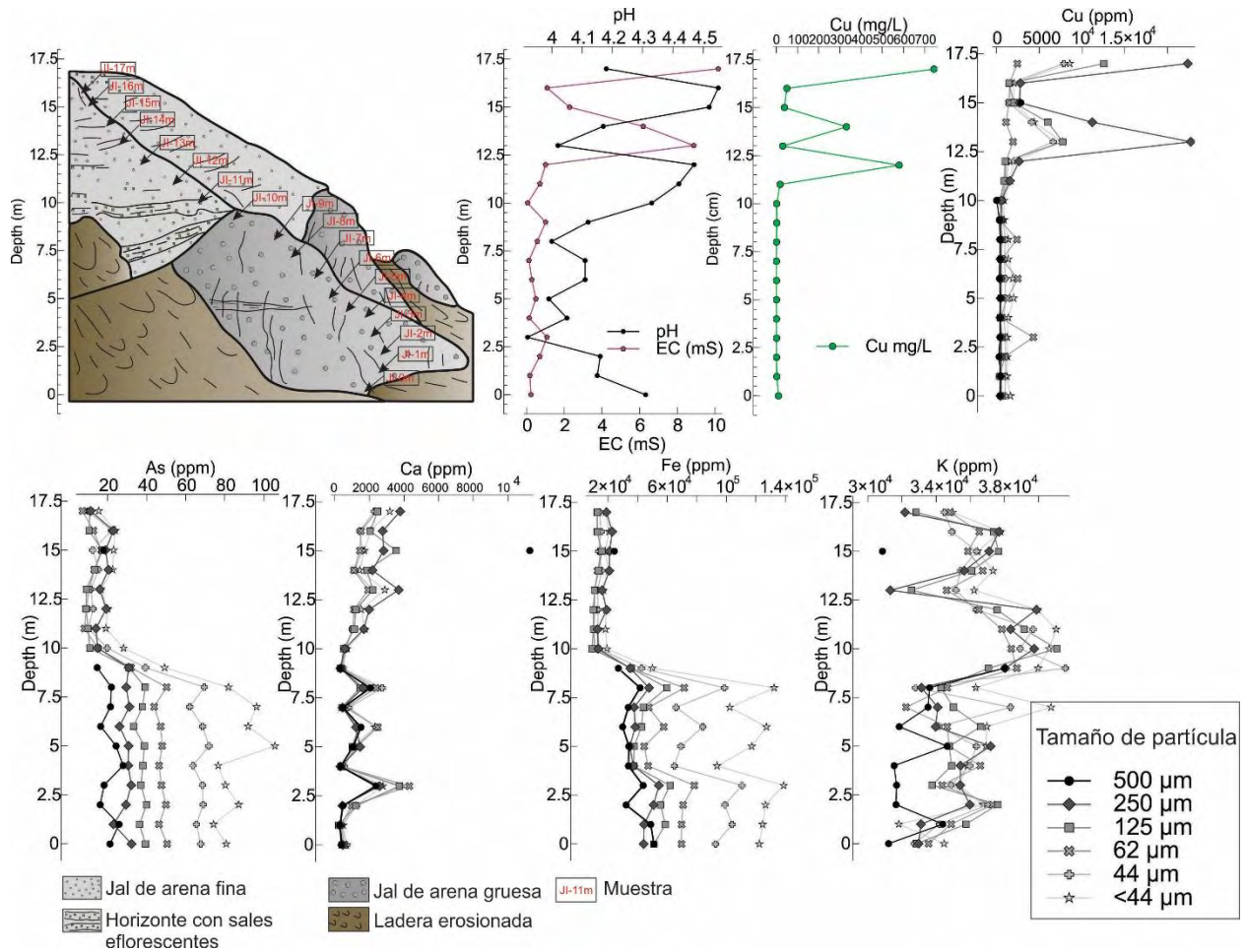


Figura 3.39 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica, Cu= cobre, As= arsénico, Ca= calcio, Fe= hierro, K= potasio.

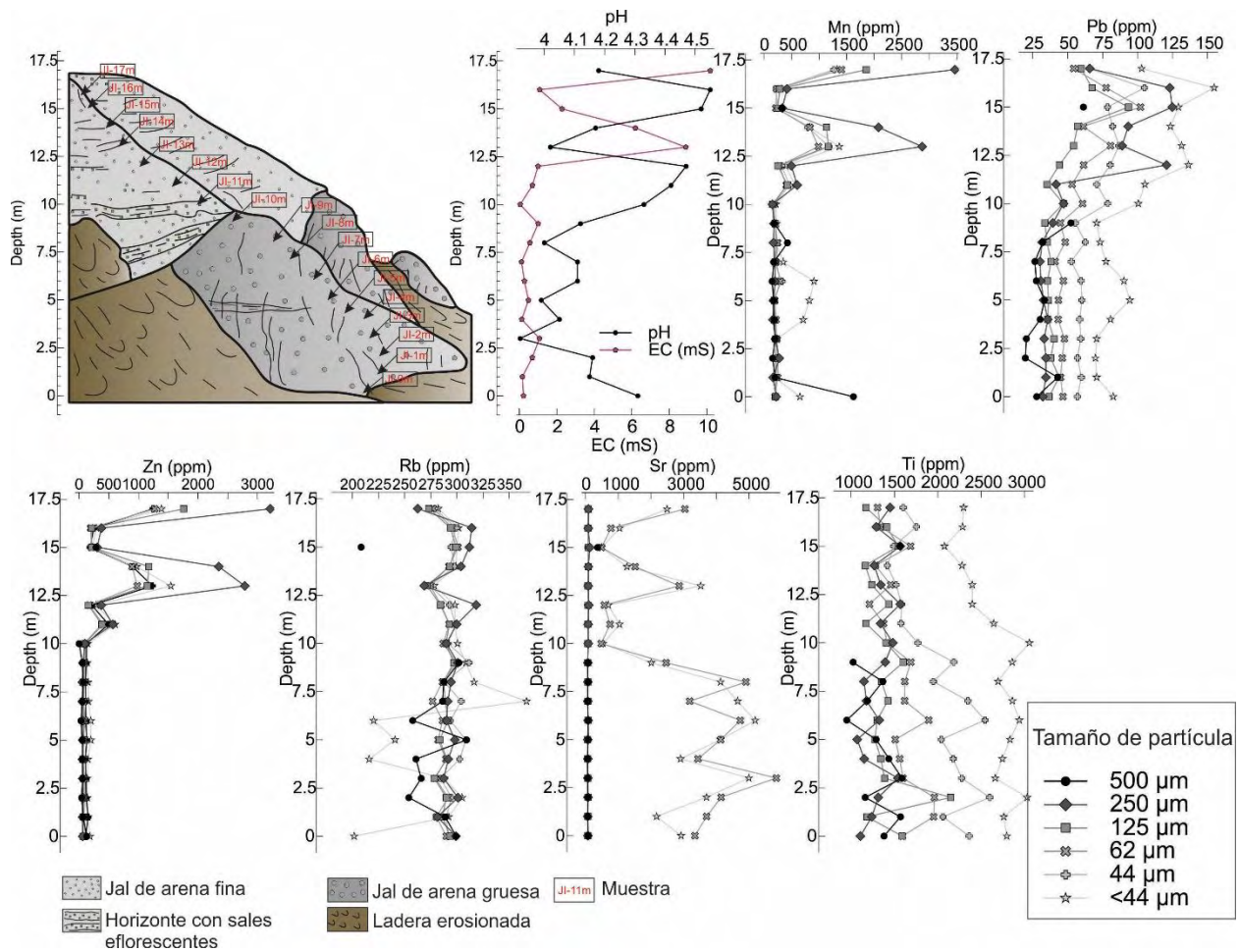


Figura 3.40 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. Mn= manganeso, Pb= plomo, Zn= zinc, Rb= rubidio, Sr= estroncio, Ti= titanio.

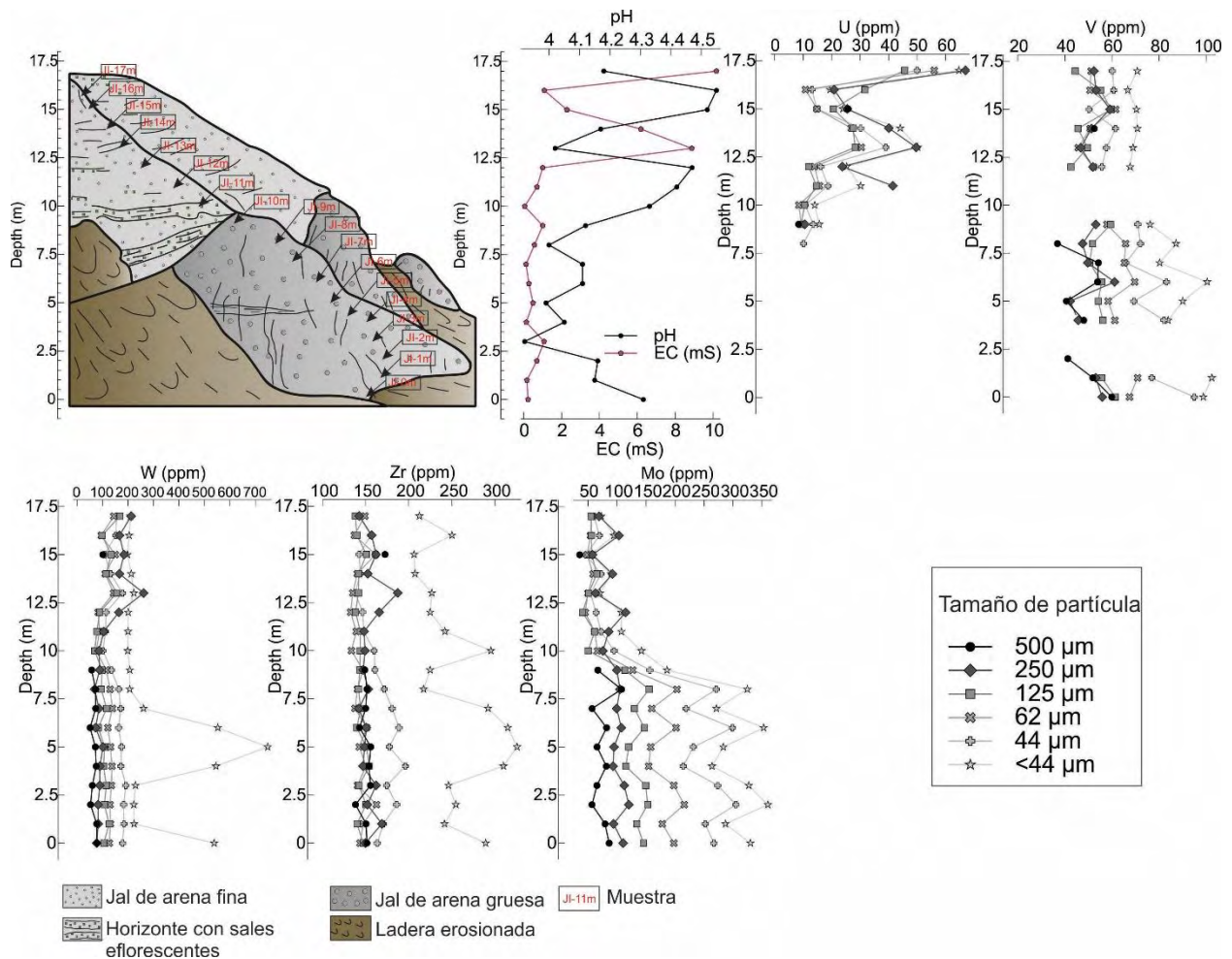


Figura 3.41 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. U= uranio, V= vanadio, W= tungsteno, Zr= zirconio, Mo= molibdeno.

Las Figuras 3.42-3.44 representan las concentraciones elementales de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014 realizados por medio del análisis de FRX. Se muestran los valores obtenidos por los elementos validados por el estándar Montana Soil 2710a por cada fracción obtenida por el estudio de granulometría.

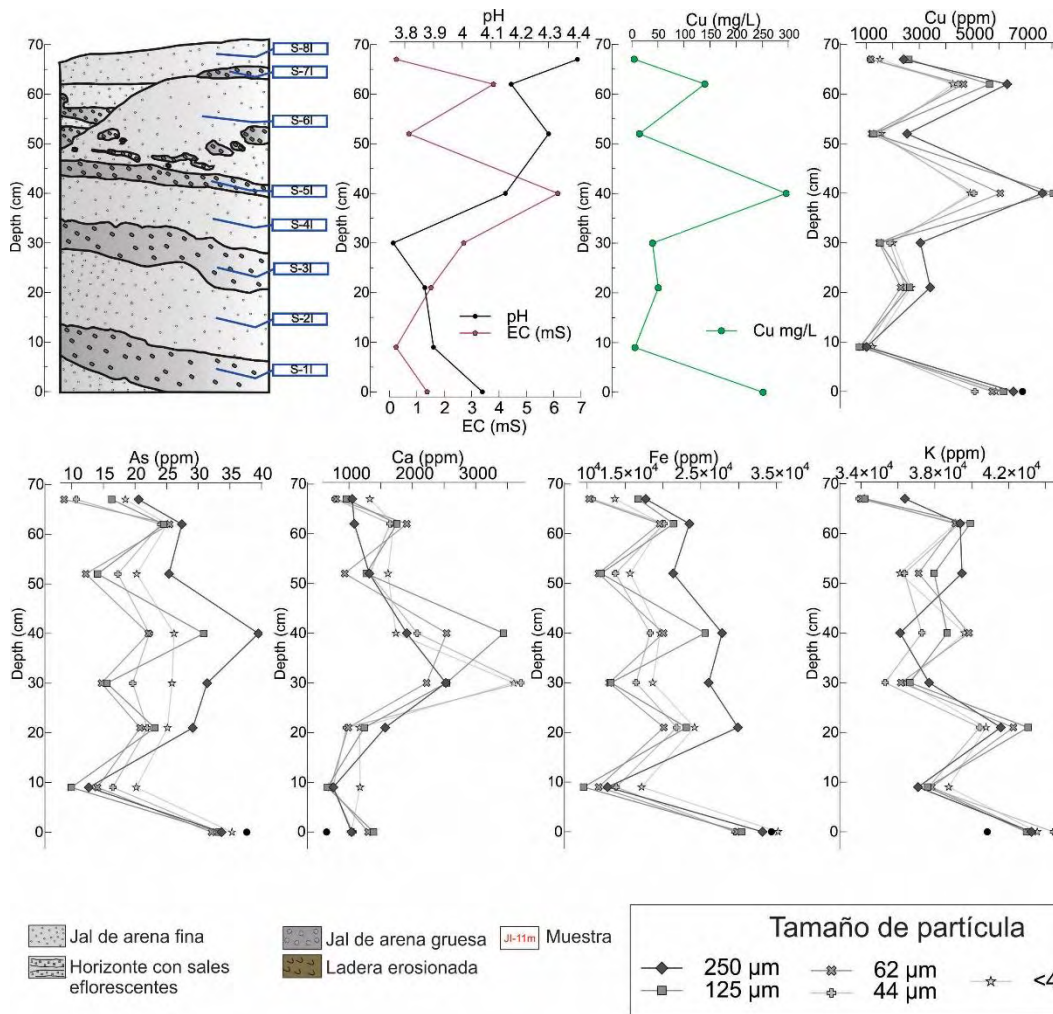


Figura 3.42 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. Cu= cobre, As= arsénico, Ca= calcio, Fe= hierro, K= potasio.

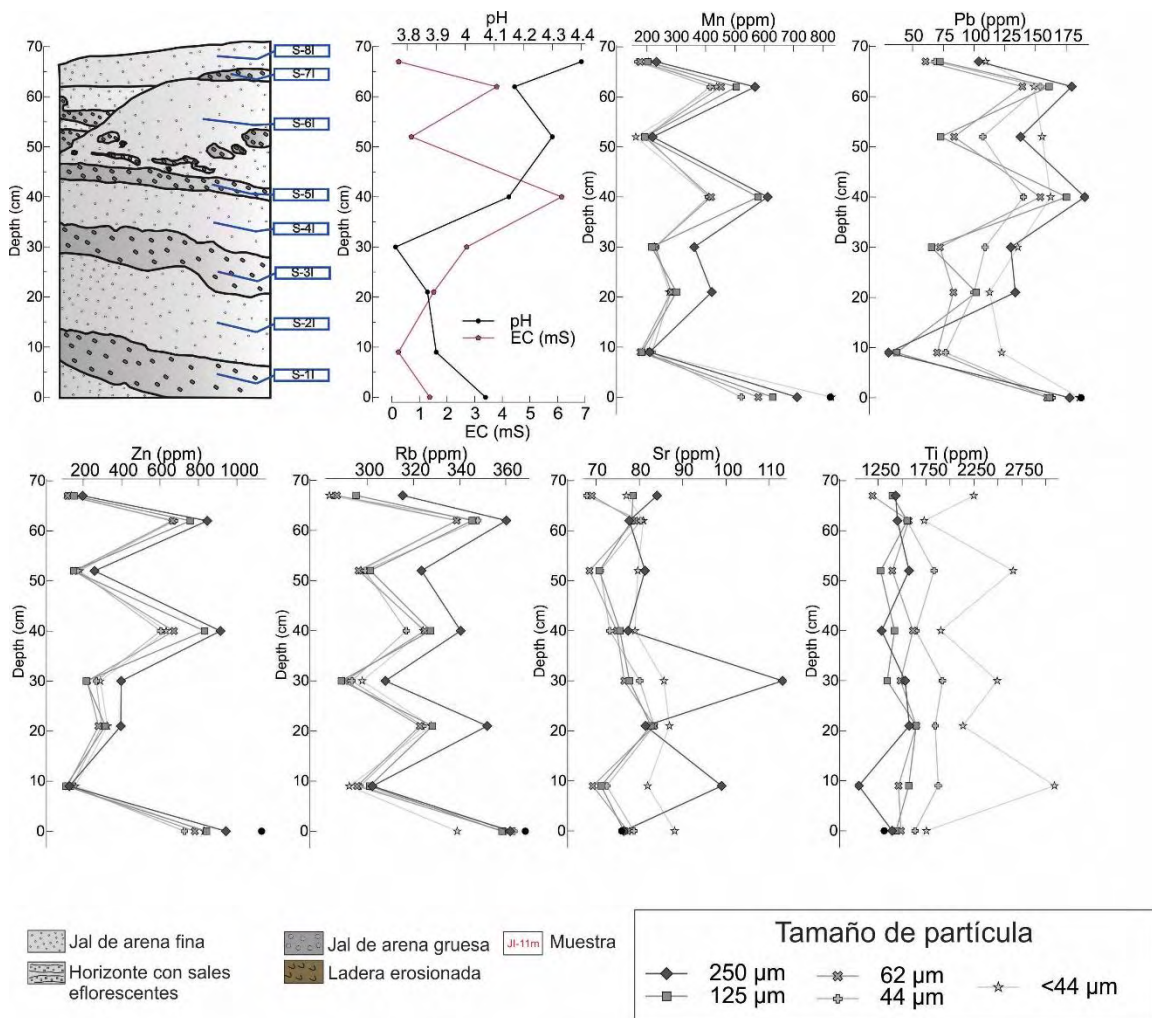


Figura 3.43 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. Mn= manganeso, Pb= plomo, Zn= zinc, Rb= rubidio, Sr= estroncio, Ti= titanio.

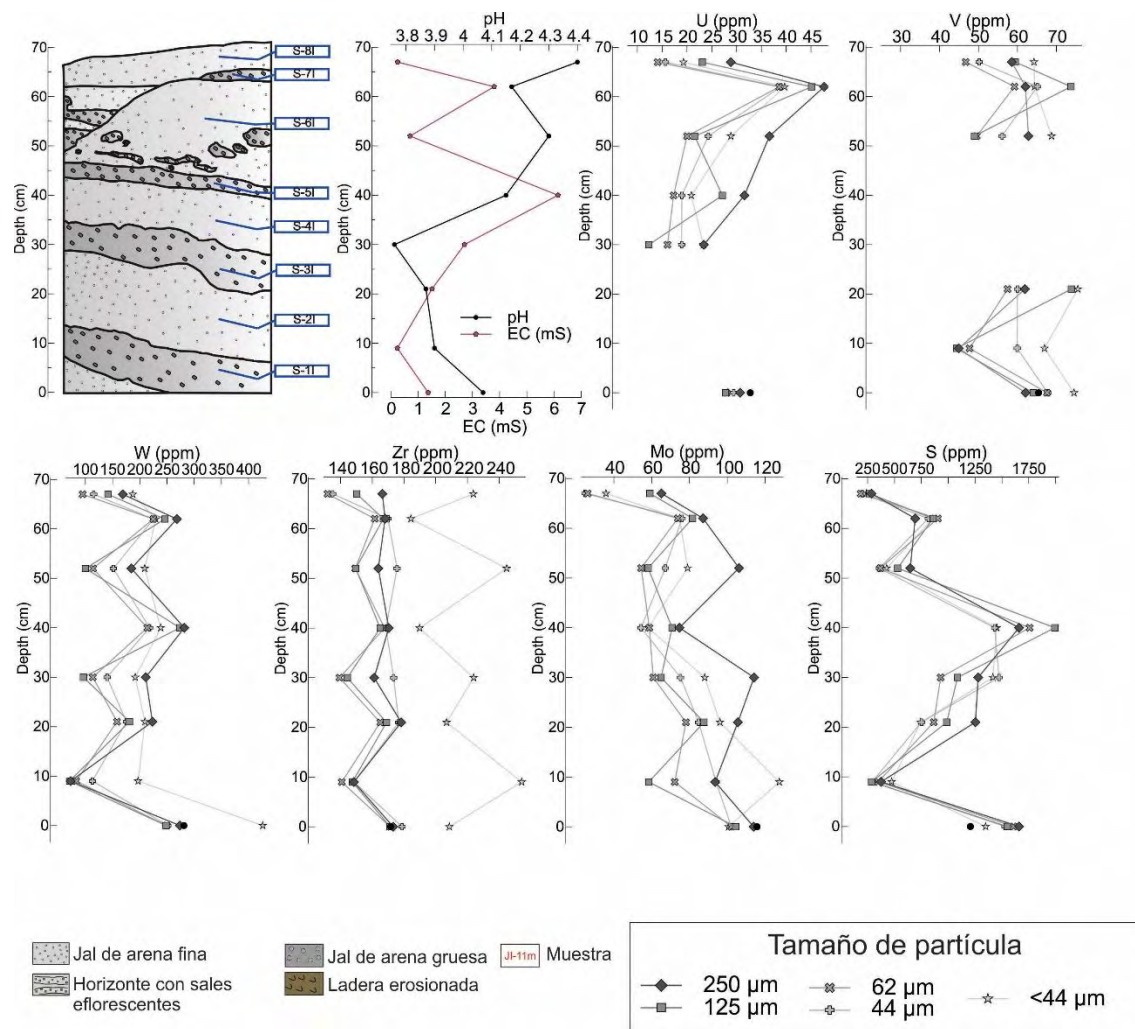


Figura 3.44 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de noviembre de 2014. EC= conductividad eléctrica. U= uranio, V= vanadio, W= tungsteno, Zr= zirconio, Mo= molibdeno, S= azufre.

La Figura 3.45 representa las concentraciones de sales eflorescentes y costras sin sales eflorescentes de la sección SI del muestreo de noviembre de 2014. Los elementos analizados son: Pb, As, Zr, Sr, Rb, V, Cu, Zn, Fe, Mn, Ca, K y Ti. Se grafican también los datos de pH y conductividad eléctrica (CE) en mili siemens (ms).

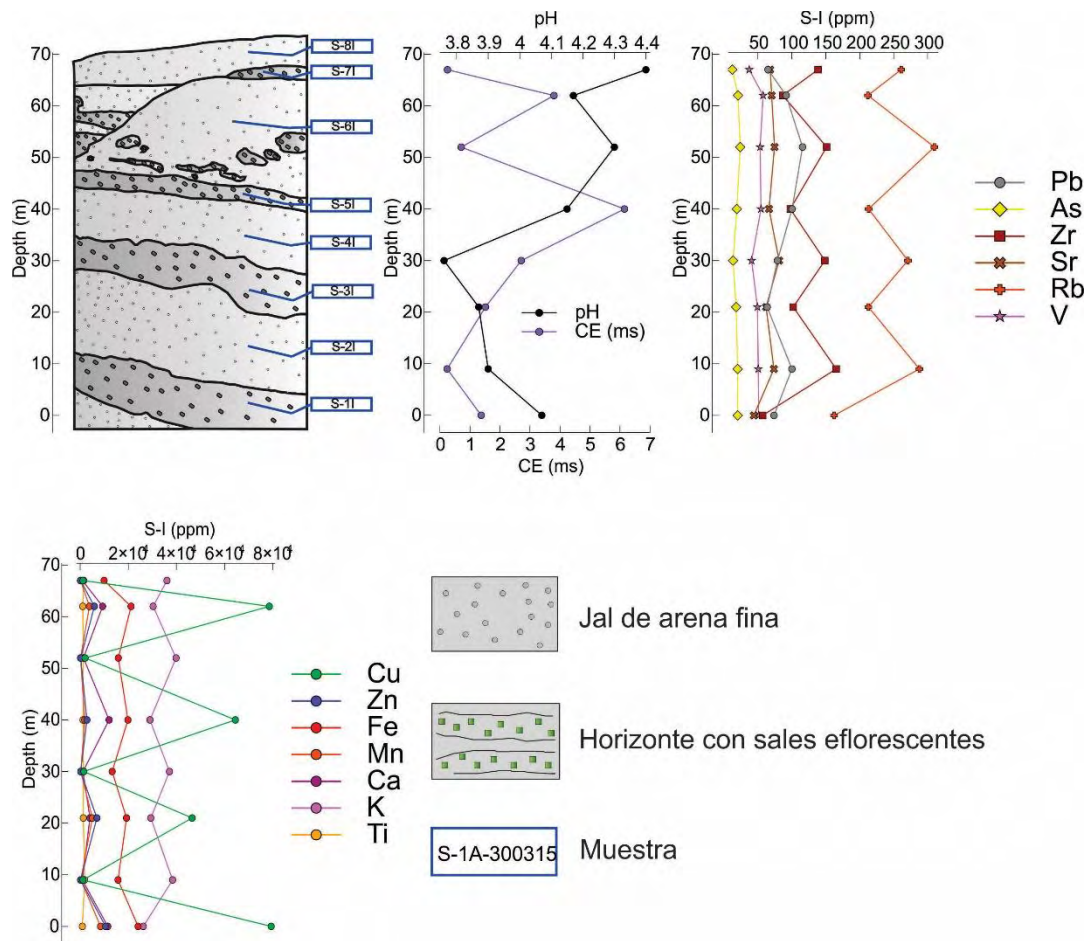


Figura 3.45 Concentración elemental de sales eflorescentes de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014.

3.5.2.2 Muestreo de marzo de 2015

Las Figuras 3.46-3.49 representan las concentraciones elementales de la columna JI del muestreo de marzo de 2015 donde los elementos analizados fueron Cu, As, Ca, Fe, K, Mn, Pb, Zn, Rb, Sr, Ti, U, V, Zr, Mo, Ag, Nb, Th, Bi, Cd, Ni, Sn y Te. Se muestran también los valores de pH y conductividad eléctrica en micro siemens (μS).

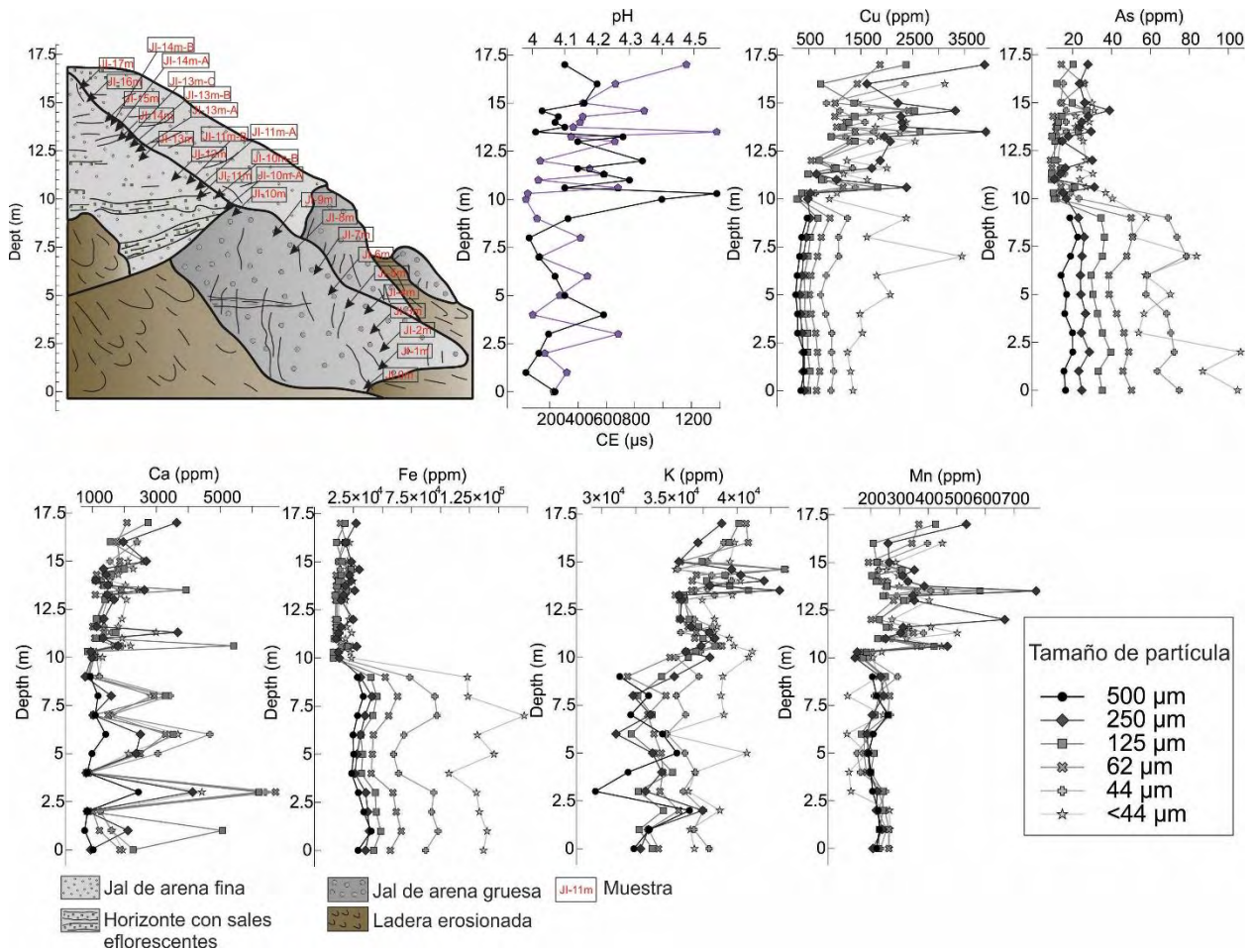


Figura 3.46 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, Cu= cobre, As= arsénico, Ca= calcio, Fe= hierro, K= potasio, Mn= manganeso.

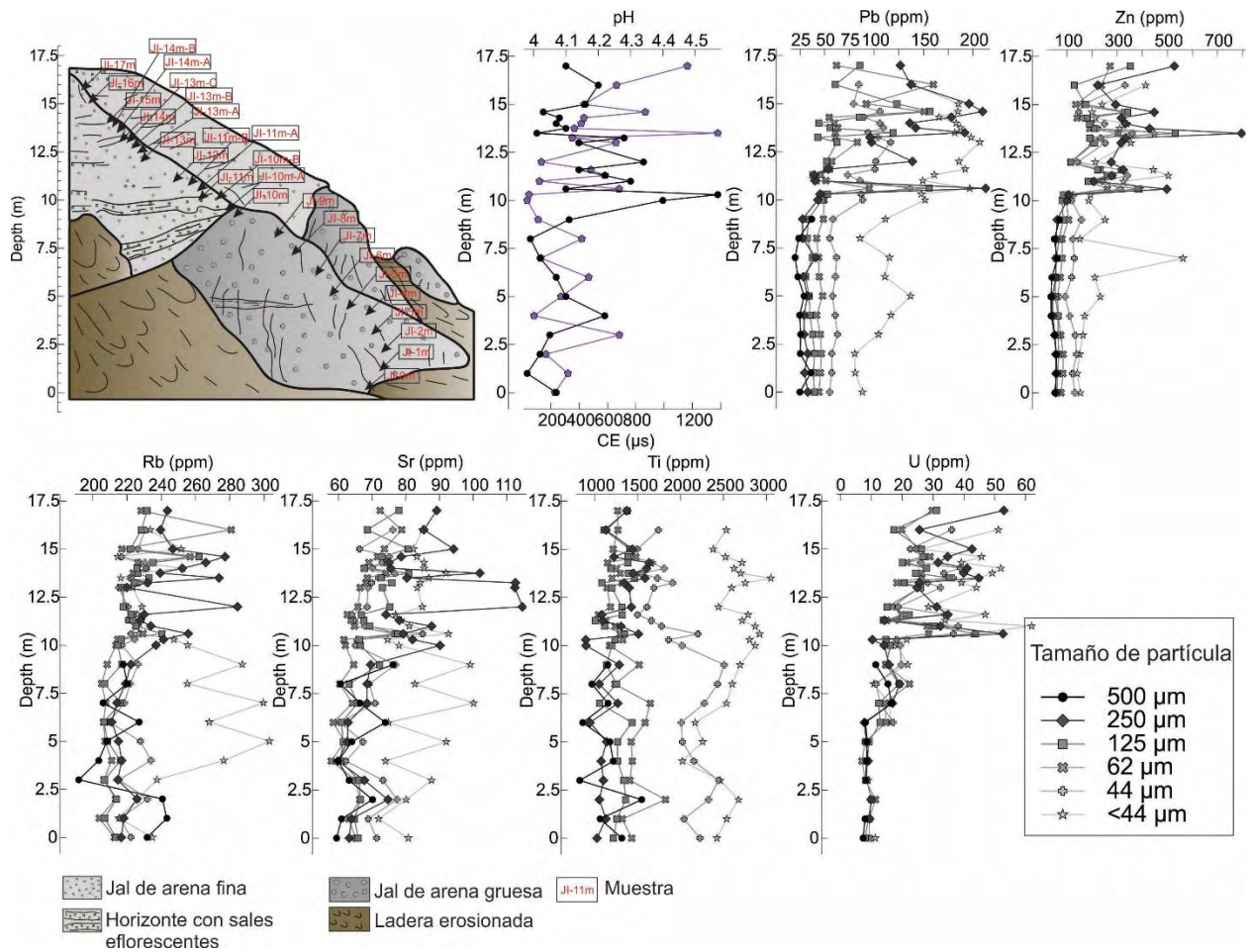


Figura 3.47 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica. Pb= plomo, Zn= zinc, Rb= rubidio, Sr= estroncio, Ti= titanio, U= Uranio.

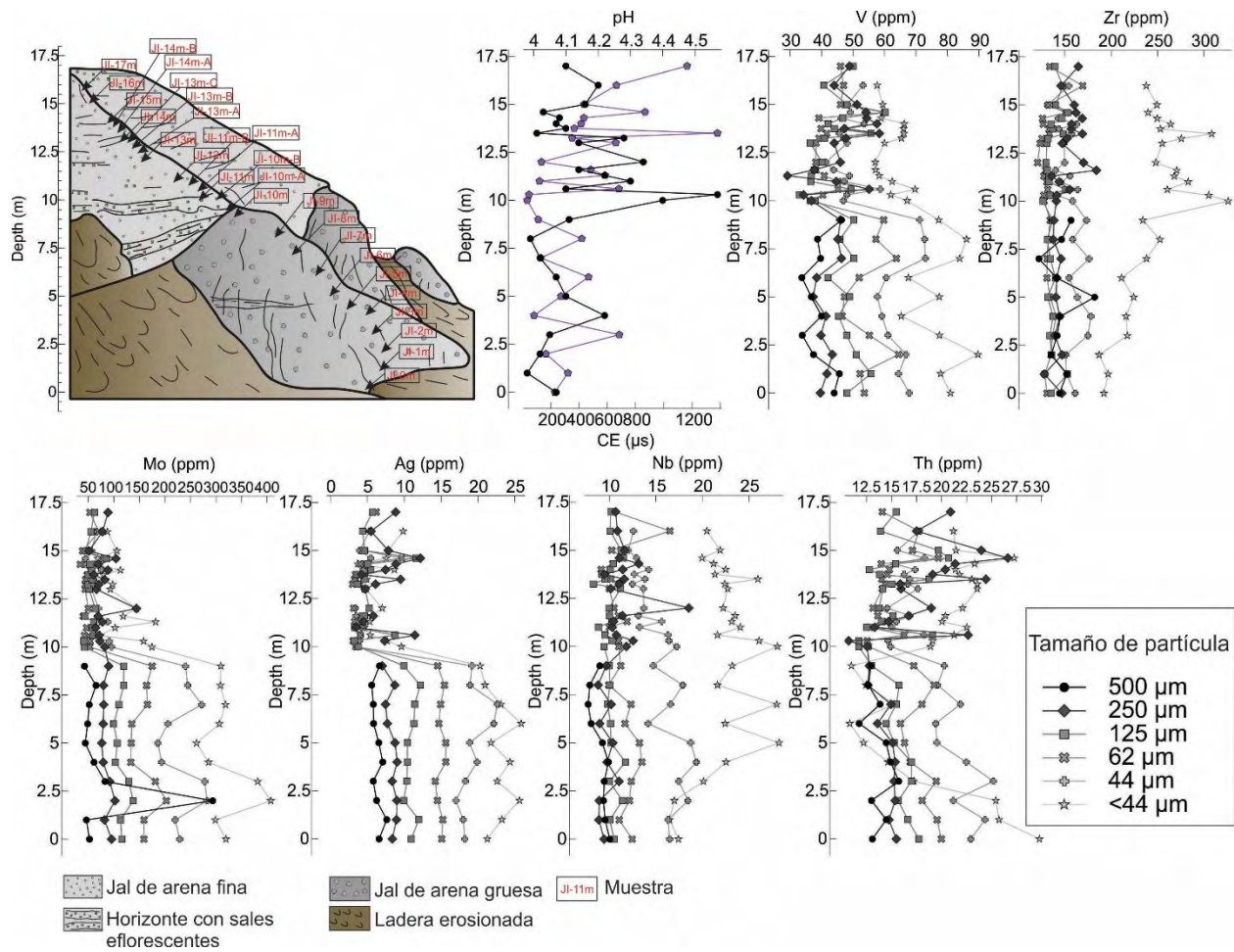


Figura 3.48 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna Jl del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica. V= vanadio, Zr= zirconio, Mo= molibdeno, Ag= plata, Nb= niobio, Th= torio.

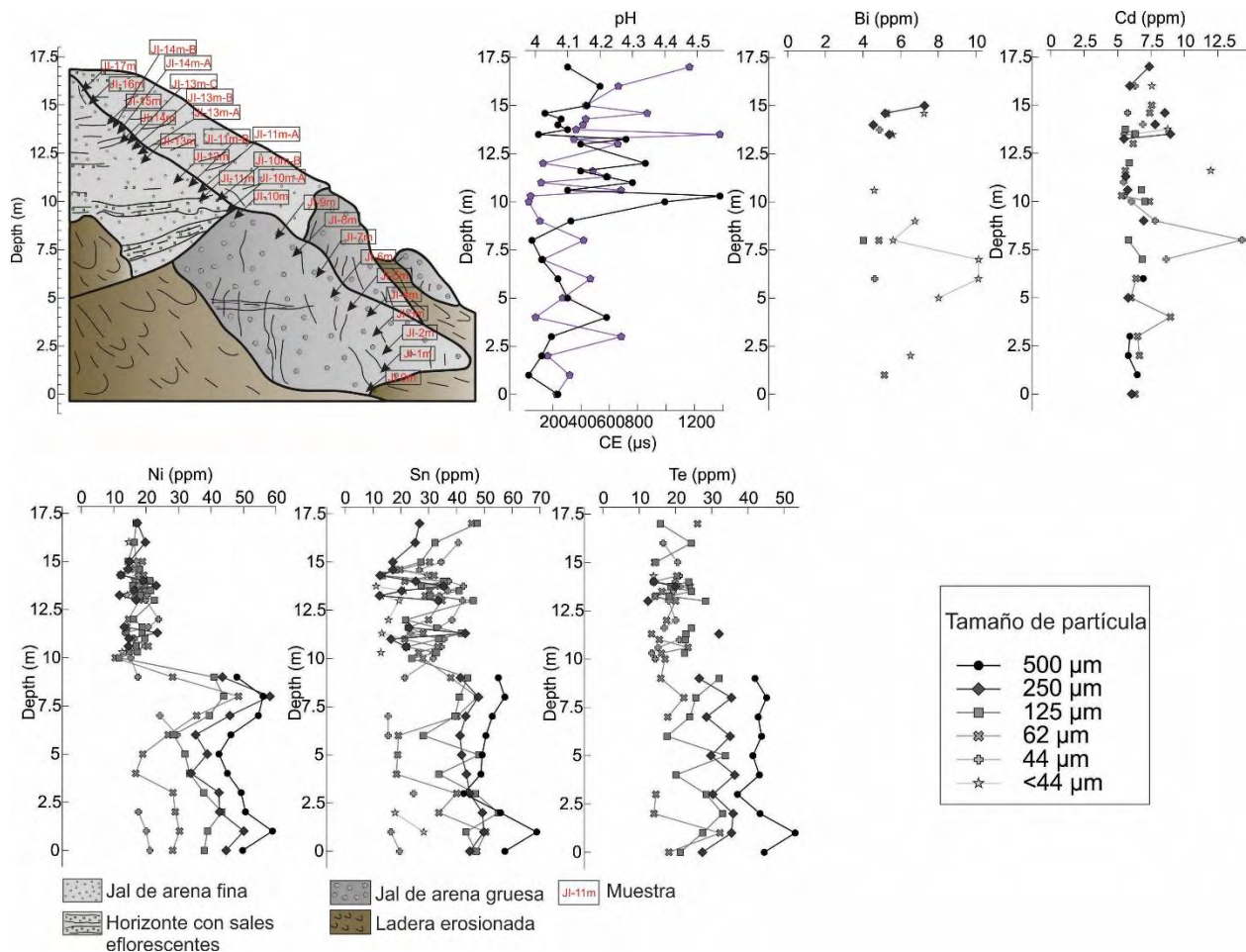


Figura 3.49 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna JI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica. V= vanadio, Zr= zirconio, Mo= molibdeno, Ag= plata, Nb= niobio, Th= torio.

Las Figuras 3.50-3.53 representan las concentraciones elementales de la columna SI del muestreo de marzo de 2015 donde los elementos analizados fueron Cu, As, Ca, Fe, K, Mn, Pb, Zn, Rb, Sr, Ti, U, V, Zr, Mo, Ag, Nb, Th, Bi, Cd, Ni, Sn y Te. Se muestran también los valores de pH y conductividad eléctrica en micro siemens (μS).

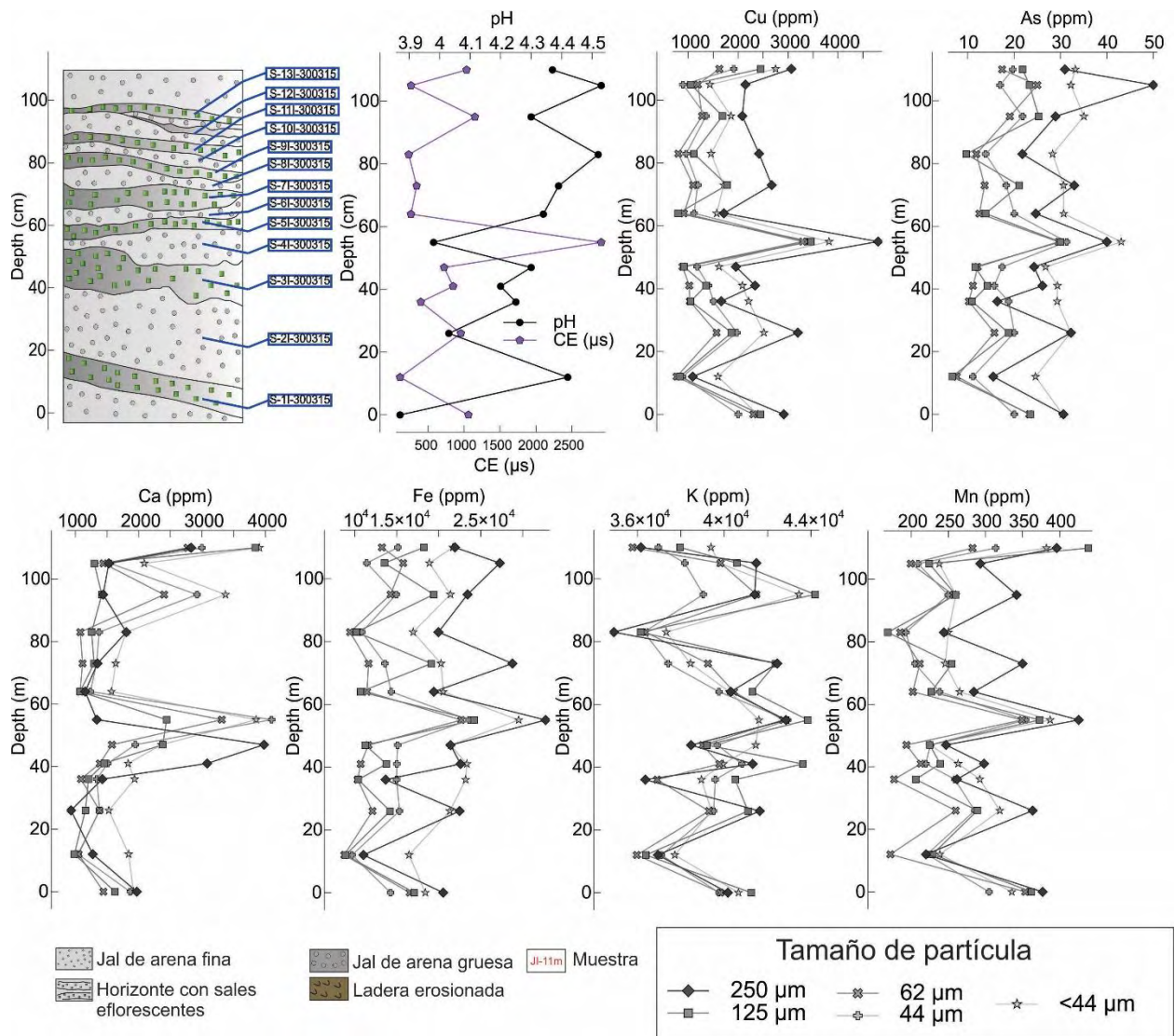


Figura 3.50 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, Cu= cobre, As= arsénico, Ca= calcio, Fe= hierro, K= potasio, Mn= manganeso.

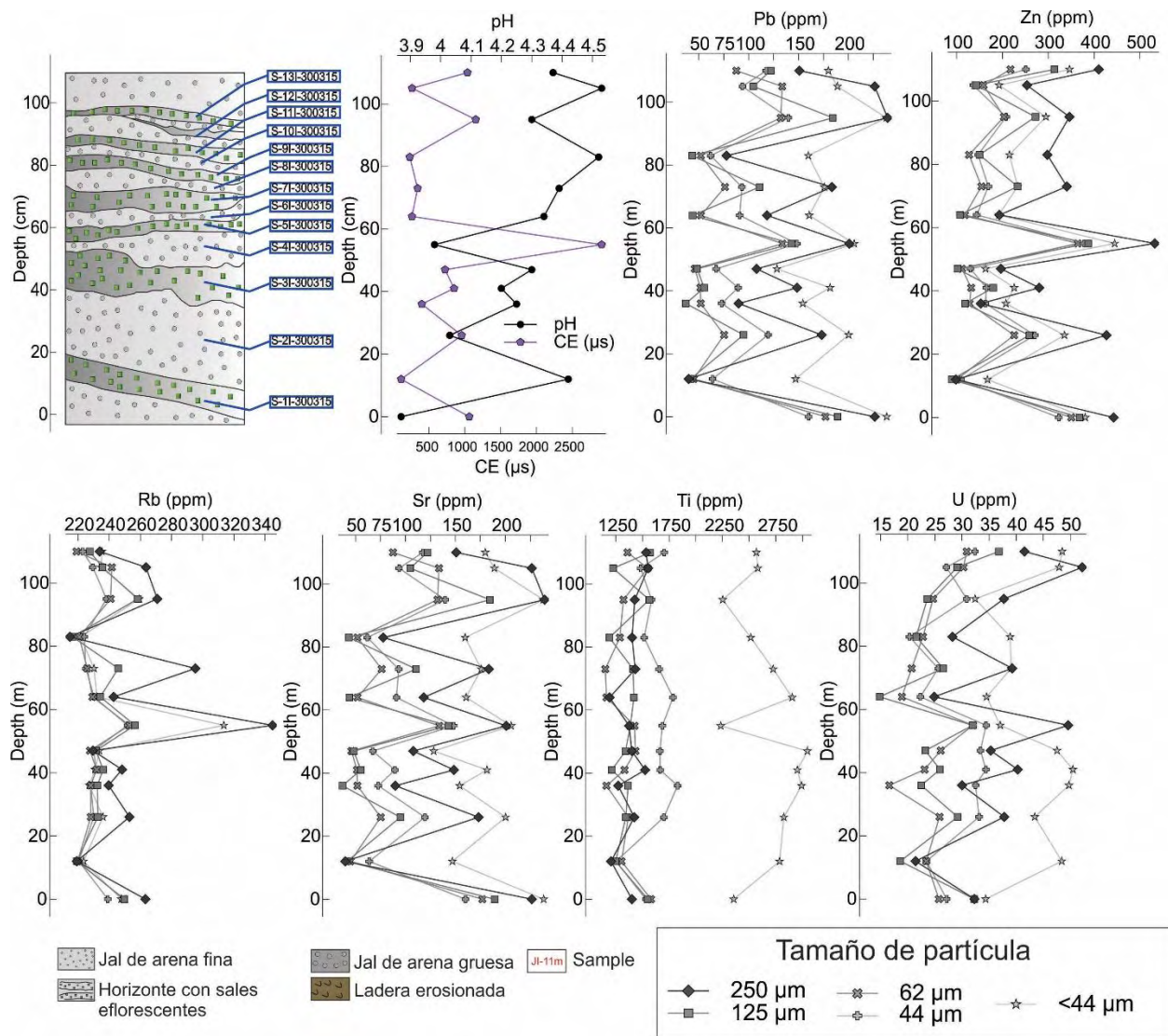


Figura 3.51 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, Pb= plomo, Zn= zinc, Rb= rubidio, Sr= estroncio, Ti= titanio, U= uranio.

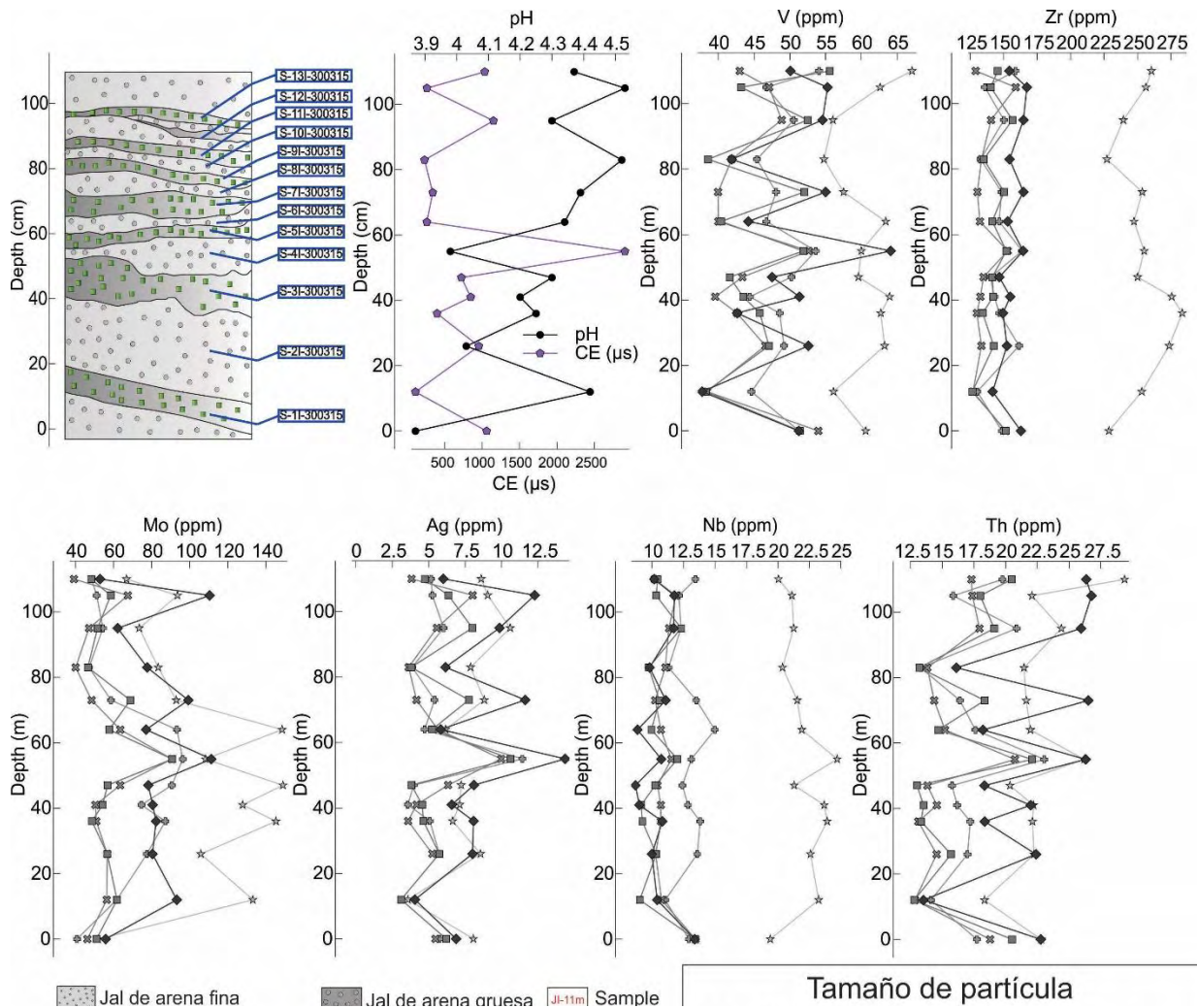


Figura 3.52 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, V= vanadio, Zr= zirconio, Mo= molibdeno, Ag= plata, Nb= niobio, Th= torio.

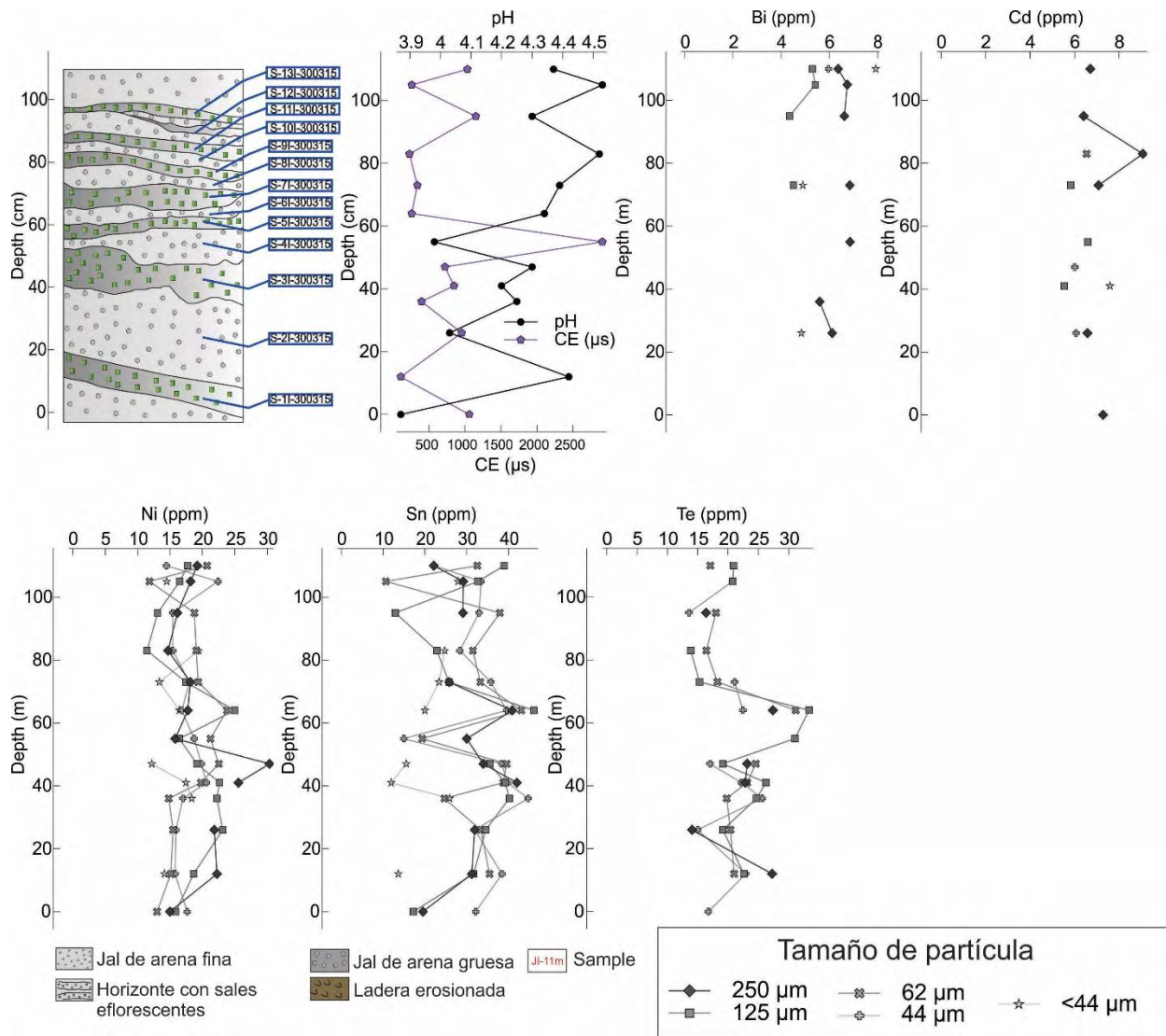


Figura 3.53 Columna de concentraciones elementales a partir de los análisis de FRX para la columna SI del muestreo de marzo de 2015. EC= conductividad eléctrica, Bi= bismuto, Cd= cadmio, Ni= níquel, Sn= estaño, Te= telurio.

La Figura 3.54 representa las concentraciones de sales eflorescentes y costras sin sales eflorescentes de la sección SI del muestreo de marzo de 2015. Los elementos analizados son: Cu, As, Ca, Fe, K, Mn, Pb, Zn, Rb, Sr, Ti, U, V, Zr, Mo, Ag, Nb, Th, Cd, Ni, Sn y Te. Se grafican también los datos de pH y conductividad eléctrica (CE) en mili sems (ms).

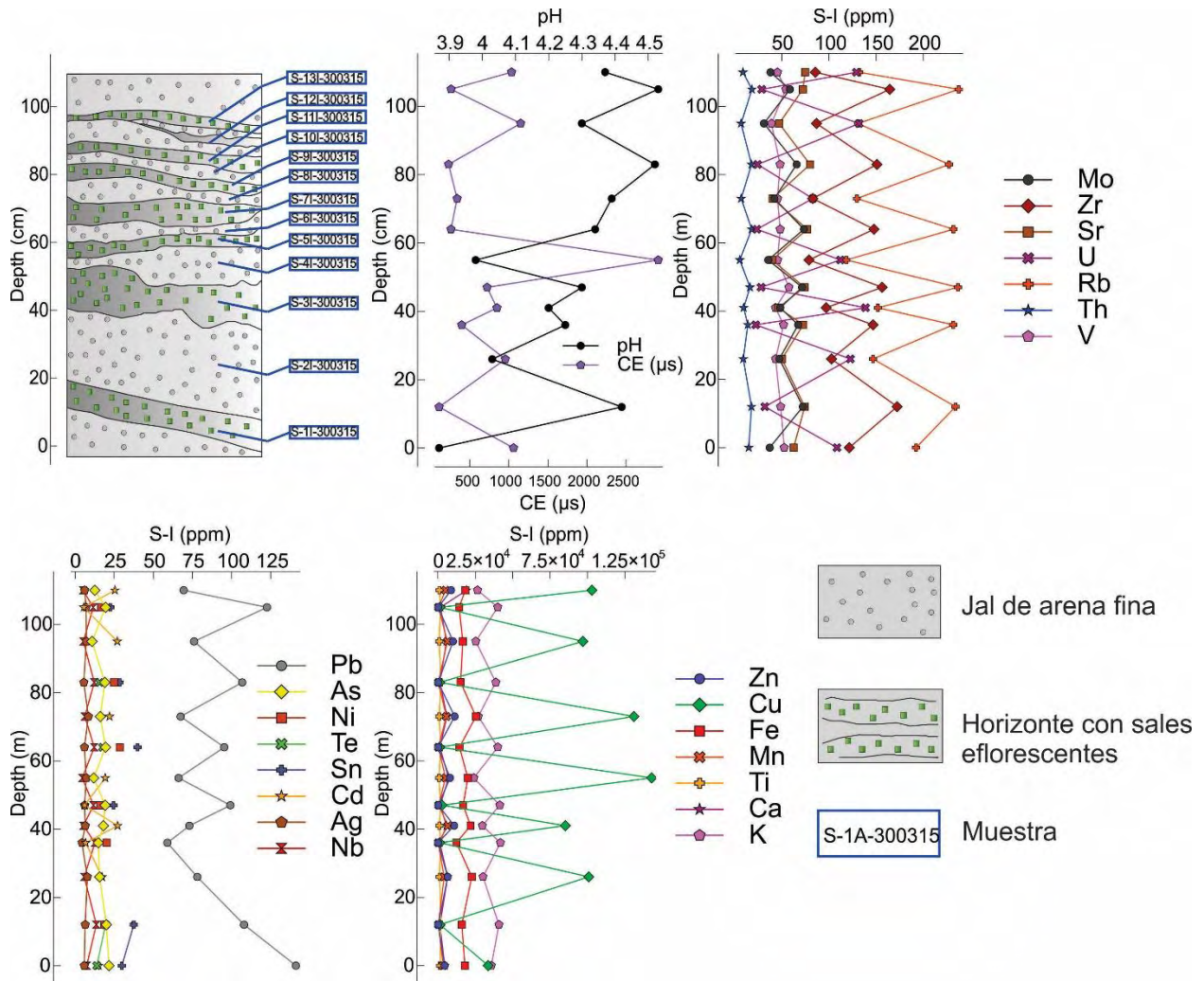


Figura 3.54 Concentración elemental de sales eflorescentes de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014.

3.6 Microscopio de Barrido Electrónico (SEM-EDS)

3.6.1 Metodología

Para este estudio se utilizó un microscopio de barrido electrónico marca *Hitachi TM 3030 Plus* instalado en la Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología de la UNAM (Figura 3.55). Las muestras de sales eflorescentes fueron separadas manualmente, tomando los cristales mejor preservados de color verde y blanco correspondientes a posibles minerales de calcantita y pentahidrita cúprica, respectivamente. Las muestras fueron montadas en un porta muestras de aluminio que se coloca dentro de una cámara al vacío que se encuentra en el microscopio. Se realizaron mediciones semi cuantitativas de elementos sobre las muestras observadas como también un análisis morfológico de los cristales a partir de los electrones secundarios que emite el equipo.



Figura 3.55 Microscopio de barrido electrónico marca Hitachi TM 3030 Plus.

3.6.2 Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través del microscopio electrónico de barrido correspondiente a las muestras de sales eflorescentes. Se muestran las fotografías con de los minerales observados y también algunos minerales con su análisis elemental (EDS).

Las Figuras 3.56 y 3.57 corresponden a cristales de calcantita con cristales de yeso amalgamados a una escala de 500 μm y 1 mm, respectivamente.

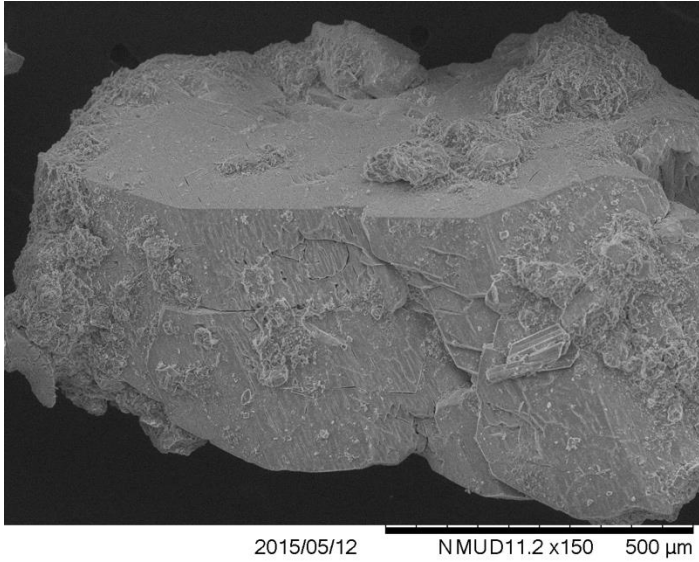


Figura 3.56 Cristal de calcantita con cristales de yeso amalgamados.

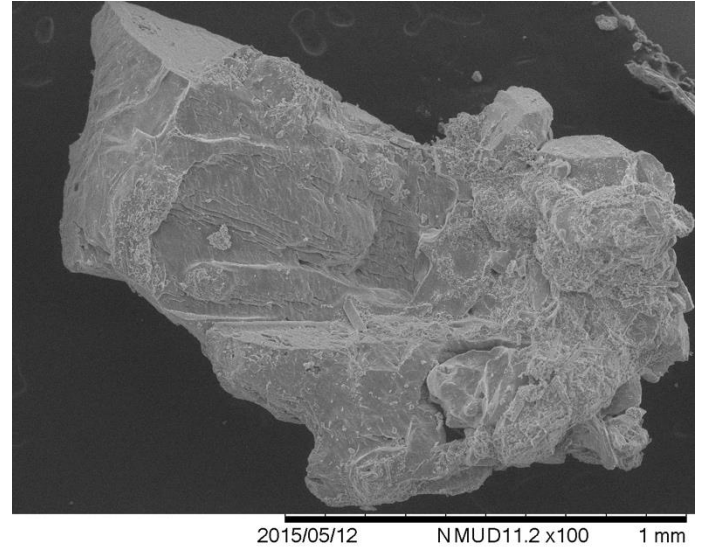


Figura 3.57 Cristal de calcantita a escala de 1 mm.

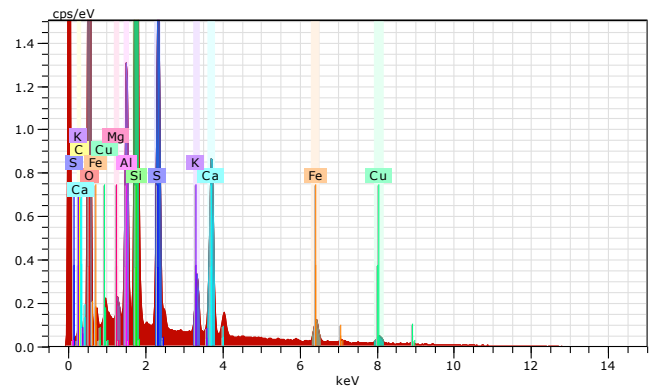
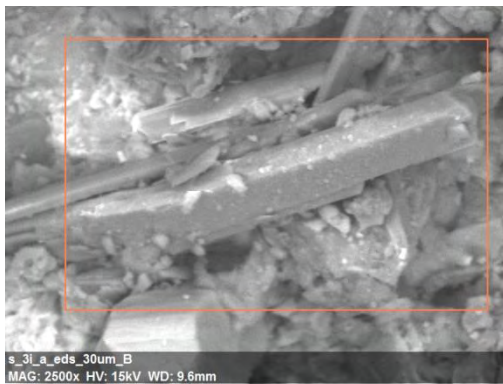


Figura 3.58 Cristales de yeso acompañados con pequeños cristales de sulfatos de cobre. El análisis elemental muestra picos en Cu, Fe, Ca, K, S, Si, Al y Mg.

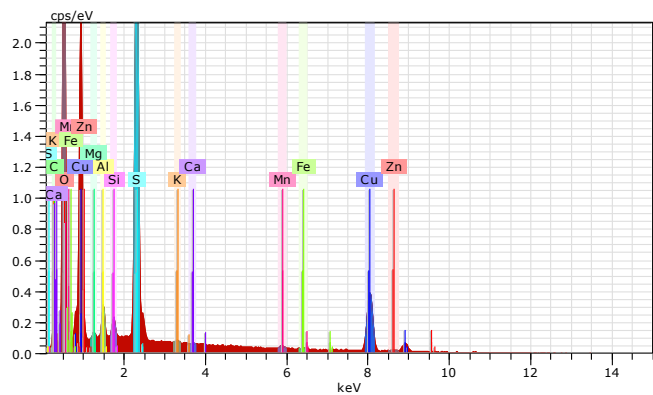
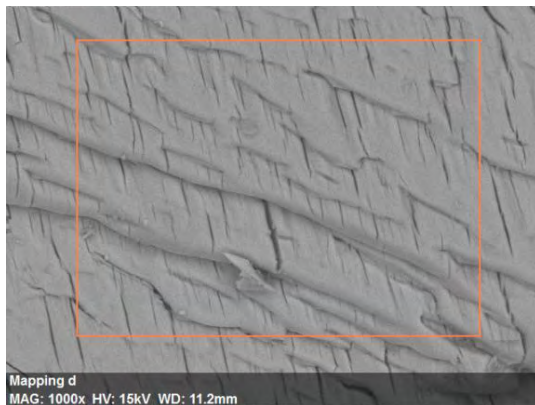


Figura 3.59 Cara de un cristal de calcantita. Las estrías presentes en este mineral se deben posiblemente a procesos de deshidratación.

3.7 Absorción Atómica (AA)

3.7.1 Metodología

Los análisis de absorción atómica tuvieron como objetivo conocer la cantidad de cobre soluble en las muestras, por lo cual sólo se presentan datos de Cu en mg/L. Se analizaron muestras de tres columnas de jales: J-I, S-I y S-II. La metodología empleada para la medición de parámetros fisicoquímicos de pH y conductividad eléctrica fue la misma que se aplicó en una primera fase para los análisis con la absorción atómica. Las soluciones residuales de las mediciones de parámetros fisicoquímicos fueron utilizadas para este estudio, a estas soluciones se les hizo una dilución con ácido nítrico (HNO_3) al 90% en una relación de disolución de 100/5, 100/2 y en algunos casos con muestras muy concentradas diluciones de 200/5.

Primero se filtró un volumen de 60 ml de la muestra en un vaso de precipitado para evitar la concentración de partículas mayores de 0.45 mm, después se tomaron 5 ml de la muestra filtrada y se mezclaron con 98 ml de agua destilada en un matraz aforado de 100 ml, y finalmente se agregaron 2 ml de HNO_3 . Las muestras fueron almacenadas en un refrigerador para ser analizadas el día siguiente y el ácido funcionaba como conservador.

Las muestras fueron analizadas con un *Espectrofotómetro de Absorción Atómica Analyst 400* de la marca *Perkin Elmer* instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora (Figura 3.60).



Figura 3.60 Espectrofotómetro de Absorción Atómica Analyst 400 de la marca Perkin Elmer utilizado para este estudio.

3.7.2 Resultados

Las Tablas 20-22 presentan los datos obtenidos con la absorción atómica de Cu en mg/L de las columnas J-I, S-I y S-II del muestreo de noviembre de 2014. Y las figuras 3.61 y 3.62 correspondientes a los datos de absorción atómica contra profundidad de las columnas J-I y S-I.

Tabla 20 Datos de absorción atómica de Cu en mg/L de la columna J-I del muestreo de noviembre de 2014. La absorción corregida es el producto de la multiplicación de la dilución y la absorción medida.

Muestra	Fecha de toma	Dilución	Absorción medida Cu mg/L	Cu soluble mg/L	pH	Conductividad	Unidades Conduc.
Jl-0m	29/11/2014	20	0.53	10.6	4.31	226	µS
Jl-1m	29/11/2014	20	0.134	2.68	4.15	168	µS
Jl-2m	29/11/2014	20	0.064	1.28	4.16	691	µS
Jl-3m	29/11/2014	20	0.07	1.4	3.92	1076	µS
Jl-4m	29/11/2014	20	0.052	1.04	4.05	134.3	µS
Jl-5m	29/11/2014	20	0.058	1.16	3.99	491	µS
Jl-6m	29/11/2014	20	0.05	1	4.11	275	µS
Jl-7m	29/11/2014	20	0.049	0.98	4.11	120	µS
Jl-8m	29/11/2014	20	0.071	1.42	4	564	µS
Jl-9m	29/11/2014	20	0.133	2.66	4.12	100.5	µS
Jl-10m	29/11/2014	20	0.094	1.88	4.33	50	µS
Jl-11m	29/11/2014	20	0.897	17.94	4.42	699	µS
Jl-12m	29/11/2014	50	11.6	580	4.47	1001	µS
Jl-13m	29/11/2014	20	1.544	30.88	4.02	8.88	mS
Jl-14m	29/11/2014	20	16.57	331.4	4.17	6.19	mS
Jl-15m	29/11/2014	20	1.942	38.84	4.52	2.28	mS
Jl-16m	29/11/2014	20	2.489	49.78	4.55	1089	µS
Jl-17m	29/11/2014	50	14.88	744	4.18	10.18	mS

Tabla 21 Datos de absorción atómica de Cu en mg/L de la columna S-I del muestreo de noviembre de 2014. La absorción corregida es el producto de la multiplicación de la dilución y la absorción medida.

Muestra	Fecha de toma	Dilución	Absorción medida Cu mg/L	Cu soluble mg/L	pH	Conductividad	Unidades Conduc.
S-1I-B	29/11/2014	20	3.892	77.84	4.07	1374	µS
S-2I-A	29/11/2014	20	0.297	5.94	3.9	239	µS
S-3I-B	29/11/2014	20	2.538	50.76	3.87	1515	µS
S-4I-B	29/11/2014	20	1.98	39.6	3.76	2.71	mS
S-5I-B	29/11/2014	20	14.81	296.2	4.15	6.15	mS
S-6I-B	29/11/2014	20	0.721	14.42	4.3	707	µS

S-7I-B	29/11/2014	20	7	140	4.17	3.8 mS
S-8I-B	29/11/2014	20	0.221	4.42	4.4	249 µS

Tabla 22 Datos de absorción atómica de Cu en mg/L de la columna S-II del muestreo de noviembre de 2014. La absorción corregida es el producto de la multiplicación de la dilución y la absorción medida.

Muestra	Fecha de toma	Dilución	Absorción medida Cu mg/L	Cu soluble mg/L	pH	Conductividad	Unidades Conduc.
S-1II	29/11/2014	400	3.05	1220	4	8.76	mS
S-2II	29/11/2014	400	3.642	1456.8	3.89	12.75	mS
S-3II	29/11/2014	400	3.575	1430	3.77	11.15	mS
S-4II	29/11/2014	400	4.153	1661.2	3.75	13.75	mS
S-5II	29/11/2014	400	3.844	1537.6	3.71	15.7	mS
S-6II	29/11/2014	400	2.5	1000	3.78	9.1	mS
S-7II	29/11/2014	400	3.032	1212.8	3.82	11.3	mS
S-8II	29/11/2014	400	3.985	1594	3.78	15.36	mS
S-9II	29/11/2014	400	4.228	1691.2	3.75	15.6	mS

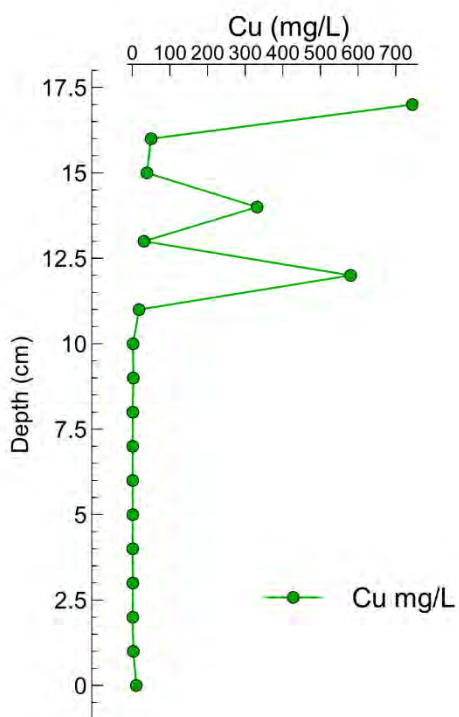


Figura 3.61 Gráfica de Cu mg/L vs. Profundidad de la columna JI del muestreo de noviembre de 2014 con datos de cobre soluble por absorción atómica.

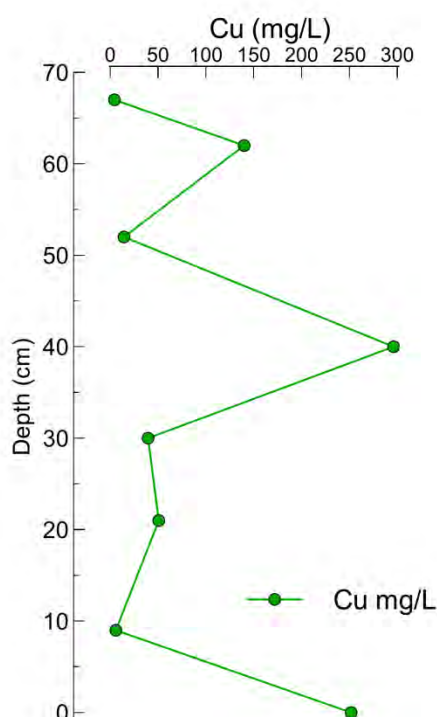


Figura 3.62 Gráfica de Cu mg/L vs. Profundidad de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014 con datos de cobre soluble por absorción atómica.

Capítulo 4

Discusión

4. Discusión

4.1 Jales mineros de Nacozari de García (Presa de jales I)

4.1.1 Concentración y movilidad elemental

4.1.1.1 Columna JI

En base a los datos analizados de FRX para la columna JI de los muestreos de noviembre de 2014 y marzo de 2015 se observa que existen tres grupos elementales que se comportan de manera diferente tanto en la zona de oxidación y la de evaporación (Figura 4.1). El primer grupo de elementos que se configura a un mismo patrón representado por un mayor enriquecimiento relativo en la zona de evaporación con respecto a la zona de oxidación, está conformado por los siguientes elementos: Cu, Pb, Zn, U y Mn. El segundo grupo que comparten un mismo patrón está configurado por un mayor enriquecimiento en la zona de oxidación y un empobrecimiento en la zona de evaporación, los elementos que conforman este grupo son: As, Fe, Mo, Ag, Ni ± Sr y V.

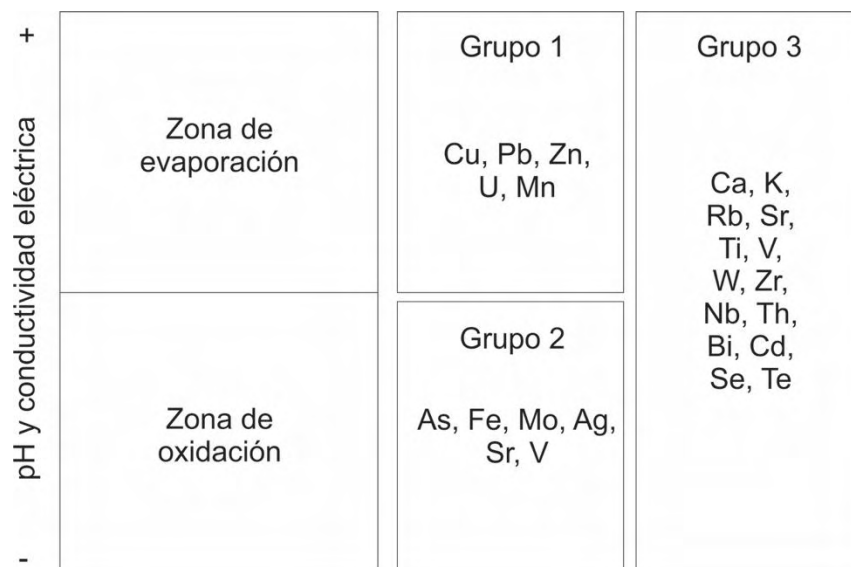


Figura 4.1 Grupos elementales concentrados en diferentes partes de la columna JI (zona de oxidación y zona de evaporación). Grupo 1: Cu, Pb, Zn, U, Mn. Grupo 2: As, Fe, Mo, Ag, Sr, V. Grupo 3: Ca, K, Rb, Sr, Ti, V, W, Zr, Nb, Th, Bi, Cd, Se, Te.

El tercer grupo se considera que es diferente al primero y al segundo grupo por que no se ve un patrón de enriquecimiento preferente en las zonas de oxidación y evaporación; a grandes rasgos son patrones lineales con respecto a la profundidad y concentración con un patrón sutil

similar a la conductividad eléctrica. Los elementos de este grupo son: Ca, K, Rb, Sr, Ti, V, W, Zr, Nb, Th, Bi, Cd, Sn y Te.

En el caso del grupo 1, los elementos Cu, Pb, Zn, U y Mn tienen una movilidad más alta en forma soluble. En el trabajo de Dold y Fontboté (2001) describen que en regiones áridas con alta evaporación, algunos elementos móviles pueden migrar vía capilaridad enriqueciendo las partes superiores de los jales con esos elementos con condiciones oxidantes. Las condiciones de alta actividad iónica y bajo pH, hace que estos elementos móviles puedan sustituir ciertos elementos en la estructura mineral de algunos minerales preexistentes e incluso formar ensambles complejos de minerales (sales eflorescentes).

El enriquecimiento elemental del grupo 1 en la zona de evaporación se ve reflejado principalmente en las sales eflorescentes de cobre (calcantita, alpersita, pentahidrita cúprica) y zinc (ramsbeckita). Pese a que en este trabajo no se determinó la presencia y concentración de elementos potencialmente tóxicos en las sales eflorescentes, es posible que muchos de los minerales primarios en la zona de evaporación y minerales secundarios pueden contener en su estructura cristalina iones metálicos del grupo 1 por procesos de sorción.

En el grupo 2, los elementos As, Fe, Mo, Ag, Sr y V tienen una movilidad menor con respecto a los del grupo 1, y se ven limitados y mayormente concentrados en la zona de oxidación, esto debido a diversos factores posibles. Estudios de extracción secuencial (Dold y Fontboté, 2001; Dold y Fontboté, 2002; Dold, 2006) han demostrado que elementos como As y Mo son estables como oxianiones y generalmente pueden ser absorbidos por hidróxidos de Fe^{3+} o sulfatos de hierro como la jarosita. En este estudio no se empleó el método de extracción secuencial pero se puede inferir que la alta concentración de As, Mo y Ag se deba a una inmovilización por procesos adsorción en estructuras minerales de la zona de oxidación como por ejemplo: jarosita, feldspatos y micas. Este es uno de los procesos probables de esta inmovilización.

El hierro presente en la zona de oxidación se puede asociar a la presencia de jarosita determinada por DRX. La mayor ocurrencia de jarosita en la zona de oxidación se ve reflejada en la figura 3.31, la zona de evaporación también contiene jarosita pero en menor proporción remarcada

por picos de difracción pequeños y estrechos de este mineral en esta zona. La presencia de rozenita y ferrihidrita también contribuyen a la concentración de hierro en la zona de oxidación. Los elementos traza de Sr y V tienen una concentración relativa mayor en la parte basal de la columna JI también pero estos elementos pueden estar adheridos de igual manera a otros minerales en su estructura.

Otro de los factores posibles de esta alta concentración e inmovilización es debido a la presencia de actividad bacteriana. Algunos estudios (Dold y Fondboté, 2001; Diaby et. al., 2007) sugieren que la actividad de organismos procariontes promueve la generación de drenaje ácido de mina (DAM) y que algunas bacterias acidófilas como la *At. Ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* son capaces de catalizar el hierro ferroso (Fe^{2+}) en ambientes de bajo pH y regenerar iones férricos (Fe^{3+}). Esto promueve procesos de hidrólisis y formación de minerales secundarios que pueden retener elementos potencialmente tóxicos en las zonas de oxidación que es donde habitualmente viven.

La actividad bacteriana ataca principalmente sulfuros primarios como la pirita, en el caso de los jales de Nacozari, este mineral no pudo ser identificado posiblemente por una actividad intensa de oxidación promovido por diferentes factores por lo cual quizás las concentraciones de estos elementos del grupo 2 reflejan una inmovilización. La bacteria *T. ferrooxidans* es capaz de oxidar el molibdeno (Mo) pero al hacerlo el organismo muere y el Mo queda fijado en la materia orgánica, quizás este sea una de las causas del enriquecimiento de Mo en la zona de oxidación. Un estudio detallado de comunidades microbianas en jales mineros de pórfido de cobre podría sustentar esta discusión.

4.1.1.2 Columna SI

La columna SI de los muestreos de noviembre 2014 y marzo de 2015 representa las variaciones y concentraciones geoquímicas a una escala menor que es parte de la columna JI. En este caso prácticamente todos los elementos tienen el mismo patrón de comportamiento: un enriquecimiento elemental en los horizontes con presencia de sales eflorescentes y un empobrecimiento en horizontes donde hay carencia de minerales secundarios.

Los elementos en esta columna siguen perfectamente el patrón de conductividad eléctrica, el cual representa la variación de salinidad a lo largo de los perfiles estudiados. Las concentraciones mayores corresponden a horizontes donde hay mayor salinidad y ocurrencia de sales eflorescentes por lo cual se infiere que en la zona de evaporación, que es donde la columna SI fue tomada, los minerales correspondientes a sales eflorescentes contienen en su estructura una concentración elemental mayor con respecto a los horizontes sin sulfatos secundarios.

4.1.2 Aspectos texturales de los jales de Nacozari y su relación geoquímica

Con este trabajo se puede concretar que existen dos paquetes de jales texturalmente diferentes distintivos en la presa de jales I de Nacozari de García: una parte basal compuesta principalmente de arenas medias y una parte superior compuesta por arenas muy finas a limos gruesos (Figura 3.14 y 3.16). Se cree que este cambio textural se debe a diversas razones. Como una primera posibilidad es que la parte basal fue el resultado de las primeras etapas de extracción de cobre de la Mina Pilares y que los métodos utilizados en el proceso de molienda tenían la eficiencia suficiente para que el material final resultante tuviera el tamaño de arena media. La parte superior compuesta por arenas muy finas a limos gruesos se cree que corresponde al resultado en un cambio en el proceso de molienda para mejorar la eficiencia de la recuperación del cobre, por lo cual el material final tiene una textura más fina para poder recuperar el cobre más fácilmente.

Una segunda posibilidad es que los dos paquetes de jales (superior e inferior) son de diferente origen. Posiblemente la parte basal corresponde al material extraído de la Mina Pilares propiamente y que el procesado de molienda siempre fue el mismo. La parte superior corresponde a un material que provenía de un lugar diferente con condiciones de mineralización, mineralogía (posiblemente un contenido mayor de arcillas) y concentración mineral distinta lo cual provocaba que el producto de la molienda sea de textura más fina.

Lo que es evidente a partir de cualquiera de estas posibilidades de origen de los jales de Nacozari, es que estos dos materiales una vez en contacto comienzan a compartir características geoquímicas, fisicoquímicas y mineralógicas que dan lugar a procesos de movilidad elemental, precipitación de sales eflorescentes y todos los procesos típicos que ocurren en jales mineros. Por

lo tanto las características texturales de los jales de Nacozari son importantes para establecer una correlación con el comportamiento geoquímico dentro de ellos.

Una de las características importantes a destacar es que la mayoría de los elementos analizados por FRX se concentran más en las fracciones granulométricas más finas de los jales. Esto ocurre principalmente en las partículas de 44 μm a 62 μm tanto en la zona de oxidación como en la zona de evaporación (Figuras 3.39, 3.40, 3.41, 3.46, 3.47 y 3.48), este patrón excluye a los elementos Ni, Sn y Te que se concentran más en las partículas de 500 μm y 250 μm (Figura 3.49). Existen varias razones para explicar este fenómeno, como por ejemplo la relación de la carga eléctrica de los elementos para adherirse más fácilmente a este tamaño de partícula o también debido a que ciertos iones metálicos son más afines a cierto tipo de minerales que se pueden encontrar en las fracciones más finas.

4.1.3 Mineralogía de los jales

La mineralogía de mena de la mina Pilares incluye pirita, calcopirita, molibdenita, esfalerita, galena, calcosita, malaquita, azurita, cubanita, lollinginita (Meza Figueroa et. al., 2009; Romero *et al.*, 2008) y posiblemente arsenopirita. Sin embargo, los estudios de DRX realizados en esta investigación demuestran que la mineralogía de los jales de Nacozari consiste principalmente de cuarzo, ortoclasa y muscovita y algunas trazas de jarosita, jokokuita, yeso y rozenita.

El cuarzo, ortoclasa y la muscovita se consideran minerales que corresponden a la roca que hospedaba la mineralización de la mina Pilares y la jarosita, jokokuita, yeso y rozenita como minerales secundarios producto de la descomposición de los sulfuros primarios. La ausencia de pirita y otros sulfuros anteriormente mencionados (no identificados por DRX) indican que la existencia de estos minerales en los jales de Nacozari es escasa o nula. Se ha determinado anteriormente que el yacimiento de la mina Pilares se caracterizaba por tener un bajo contenido de sulfuros metálicos por lo cual es un posible factor que determina que estos sulfuros ya no se encuentren en los jales.

Sumando el factor que indica que el yacimiento es de bajo contenido en sulfuros metálicos, y que muchos de estos materiales fueron aprovechados en el proceso de beneficio aunado con los

procesos de oxidación intensos en los jales, da como resultado que muchos de estos minerales hayan desaparecido y que los remanentes sean minerales secundarios de hierro como jarosita y rozenita. Posiblemente los procesos de DAM sigan actuando en los jales de Nacozari pero con menor intensidad, con el paso del tiempo este fenómeno se ha ido atenuando.

4.2 Sales eflorescentes

4.2.1 Concentración elemental

Con respecto a los datos de FRX de los dos muestreos de este estudio (Figuras 3.45 y 3.54) se pueden asociar dos grupos de elementos que se comportan de diferente manera en dependencia de la ocurrencia de horizontes con sales eflorescentes y horizontes sin sales. En los horizontes con sales eflorescentes existe una mayor concentración (anomalía positiva) de elementos como Cu, Fe, Zn, Ca, Mn, Cd y uranio U. En los horizontes sin sales eflorescentes se encuentran picos positivos de elementos como K, Pb, As, Ni, Rb, Zr, Sr, Mo, V y Th. Se puede observar que en cada anomalía positiva de Cu, Fe, Zn, Ca, Mn, Cd y U existe una anomalía negativa de K, Pb, As, Ni, Rb, Zr, Sr y Mo. De manera que existe un comportamiento inverso con los elementos que se concentran mayormente en las eflorescencias con respecto a los elementos que se encuentran en horizontes sin sales.

Por otra parte se puede observar que las anomalías positivas de Cu, Fe, Zn, Ca, Mn, Cd y U ocurren cuando hay una mayor conductividad eléctrica (mayor salinidad) y con valores de pH bajos (≤ 3.5) y las anomalías positivas de K, Pb, As, Ni, Rb, Zr, Sr y Mo ocurren en valores bajos de conductividad eléctrica.

4.2.2 Mineralogía de sales eflorescentes

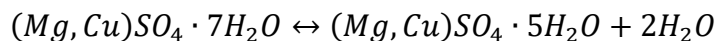
En este estudio se pudieron determinar algunas especies minerales correspondientes a las sales eflorescentes de los jales de Nacozari. Estos minerales son: alpersita ((Mg, Cu) (SO₄)·7H₂O), calcantita (CuSO₄·5H₂O), ferrihidrita (5Fe₂O₃·9H₂O), jarosita (KFe³⁺₃(SO₄)₂(OH)₆), pentahidrita cúprica ((Mg,Cu)SO₄·5H₂O), rozenita (FeSO₄·4H₂O), ramsbeckita ((Cu,Zn)₁₅(SO₄)₄(OH)₂₂·6H₂O) y yeso (CaSO₄·2H₂O).

Todos estos minerales antes mencionados son típicos en jales mineros, y más precisamente de jales mineros de cobre en climas áridos-semiáridos. La forma en que ocurren estos minerales es

en costras y recubrimientos superficiales en el jal y la mayoría de los minerales secundarios encontrados a excepción de ferrihidrita, son sulfatos solubles. Generalmente las sales eflorescentes ocurren como cristales euhedrales en ensambles minerales complejos donde cada cristal está en contacto uno con otro. Este comportamiento se puede atribuir a la completa disolución y remoción de estos minerales altamente solubles durante la época de lluvias y la reprecipitación de nuevos cristales en épocas de sequías.

La estabilidad termodinámica de algunas sales eflorescentes es muy susceptible a la temperatura, presión, humedad, Eh, pH, etc. Por lo tanto, estos minerales pueden estar sometidos a transformaciones constantes como por ejemplo la transformación por deshidratación de alpersita a pentahidrita cúprica expresada en la ecuación xxxv.

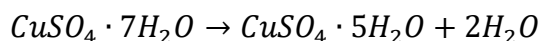
- Ecuación (xxxv):



La alpersita pertenece al grupo de la melanterita y la pentahidrita cúprica pertenecen al grupo de la calcantita y la transformación mineral ocurre por un proceso de deshidratación vinculado a cambios de temperatura. La composición de pentahidrita cúprica se encuentra entre pentahidrita ($MgSO_4 \cdot 5H_2O$) – calcantita ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), donde estos minerales son isoestructurales. Es decir la pentahidrita cúprica se separa de estos minerales por un *gap composicional*. Fleischer (1951) sugiere por primera vez el uso del término pentahidrita cúprica o calcantita magnesiana para aquellos minerales con composición intermedia en una serie isoestructural lo que permite una descripción clara del mineral sin la complejidad adicional de la definición de una nueva especie mineral. Posiblemente la transformación entre alpersita y pentahidrita cúprica es constante en temporalidad diurna y nocturna debido a los cambios drásticos de temperatura.

Por otra parte el mineral calcantita ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), el más abundante en las sales eflorescentes de este estudio, tiene una historia similar de transformación por deshidratación. La calcantita es producto de la deshidratación del mineral *boothita* ($CuSO_4 \cdot 7H_2O$).

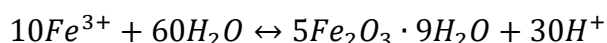
- Ecuación (xxxvi):



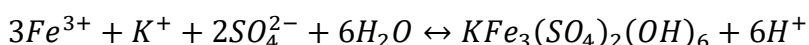
En este trabajo no fue posible determinar el mineral boothita pero es posible que los procesos que ocurren en la transformación de alpersita a pentahidrita cúprica se apliquen para el caso de boothita y calcantita.

El mineral rozenita proviene de la deshidratación de la melanterita (uno de los productos principales de la descomposición de la pirita), pero este último mineral no fue determinado por el método de DRX. Los minerales jarosita y ferrihidrita son las fases finales más estables de los sulfatos de hierro y suelen estar presentes tanto en sales eflorescentes como en el material de jal. En este caso los minerales jarosita y ferrihidrita son formados por procesos de hidrólisis donde las especies de Fe^{3+} son producidas por las siguientes ecuaciones.

- Ecuación (xxxvii) hidrólisis de ferrihidrita:



- Ecuación (xxxviii) hidrólisis de jarosita:



Los minerales yeso y ramsbeckita, también encontrados en este estudio, son sulfatos hidratados de calcio (yeso) y cobre-zinc (ramsbeckita) que ocurren en jales mineros. El yeso suele ser bastante común en este tipo de ambientes y la ramsbeckita ha sido reportada en pocos lugares en el mundo, generalmente ocurre en terreros de mina, jales mineros de cobre y ocasionalmente en vetillas en depósitos de cobre (RRUFF, 2015).

4.2.3 Ocurrencia de sales eflorescentes en horizontes alternados

A partir de los patrones texturales analizados en las columnas JI y SI de los jales de Nacozari se pudo determinar que para la columna JI existen dos cambios importantes a mayor escala: una textura dominante de arenas medias en la parte basal y una la parte superior una textura de arenas muy finas a limos gruesos. Sin embargo analizando la columna SI, a una escala más pequeña, se puede observar que existen cambios texturales pequeños pero determinativos para poder hacer una

correlación de la ocurrencia de las sales eflorescentes de manera horizontal y alternada en dependencia de estas variaciones texturales.

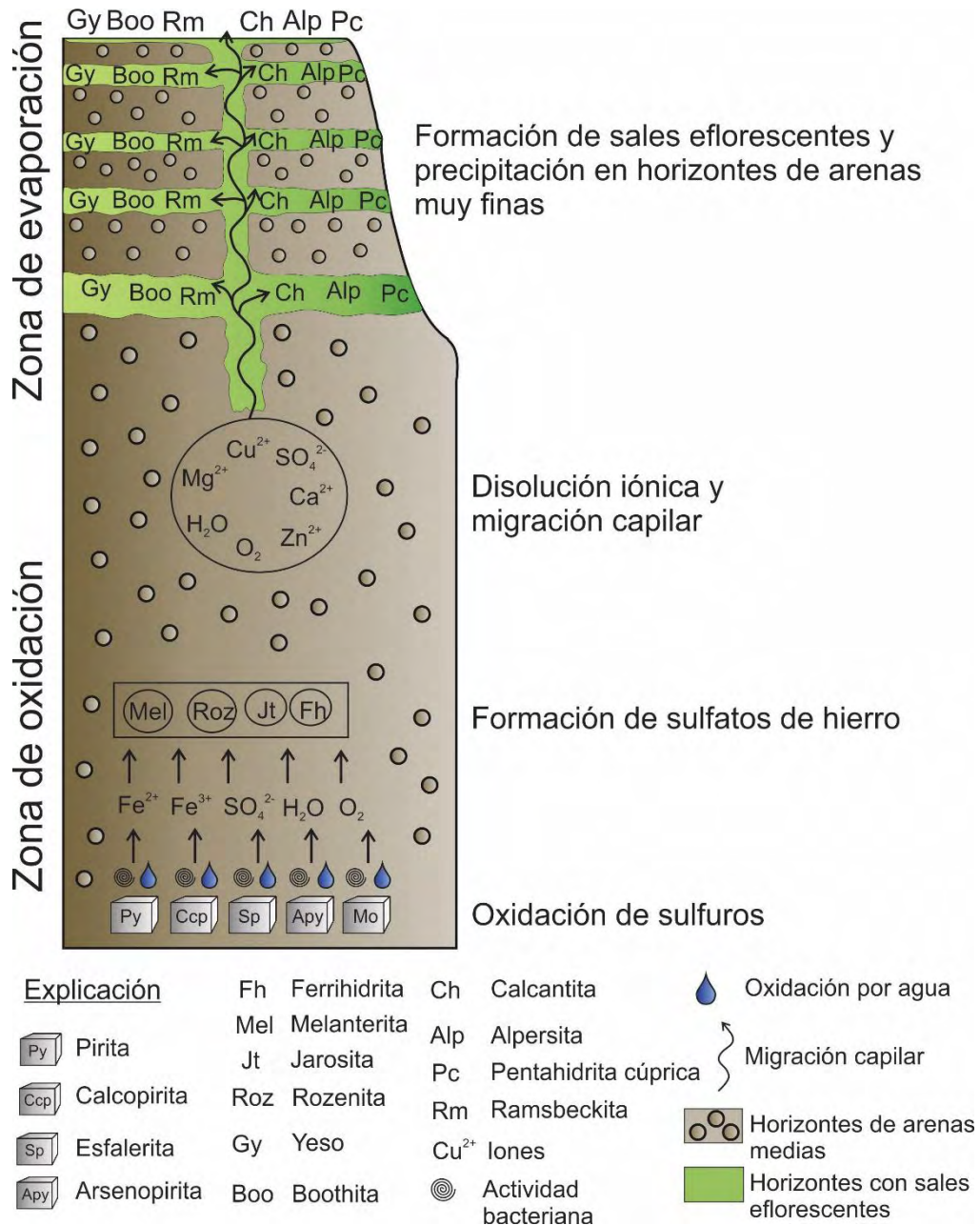


Figura 4.2 Diagrama esquemático propuesto para la explicación de la ocurrencia de sales eflorescentes en forma de horizontes.

Las Figuras 3.15 y 3.17 muestran de manera clara una variación textural a grosso modo de arenas muy finas (horizontes con sales eflorescentes) y arenas finas-arenas medias (horizontes sin sales eflorescentes). El fenómeno de movilidad vía capilaridad ocurre en solución, transportando iones y aniones hacia la superficie hasta encontrar las condiciones óptimas para hacer precipitar

sulfatos hidratados, la mayoría ricos en cobre. Uno de los factores observados en este estudio para que ocurra la precipitación de sulfatos está ligado a la textura de los jales. En base a lo consultado a la literatura y la observación en campo se puede establecer que en horizontes con texturas más finas y donde se alberga más humedad, es donde las condiciones son más favorables para la acumulación de soluciones cargadas con iones que conforman las composiciones químicas de las sales eflorescentes.

La retención de soluciones salinas para la posterior precipitación en condiciones atmosféricas ambientales de los sulfatos, tienen barreras texturales por encima y debajo de cada capa de granulometría más fina. Las capas adyacentes de textura más gruesa establecen una vía para que las soluciones sigan migrando a superficie hasta encontrarse otra capa con textura más fina y repetir el proceso hasta que las soluciones lleguen a superficie. La razón por la cual horizontes de jal retienen más humedad se debe a la hidrología natural interna de las presas de jales. La Figura 4.2 representa los procesos para formación de horizontes con sales eflorescentes en dependencia de la granulometría de los jales, procesos de evaporación y capilaridad.

4.2.4 Implicaciones climáticas en la temporalidad de las sales eflorescentes

La precipitación media anual para Nacozeni de García es de aproximadamente 579 mm la cual podría considerarse baja, sin embargo, es suficiente para activar el mecanismo de oxidación de los sulfuros en los jales y crear drenaje ácido de mina. Las lluvias en esta región son esporádicas, aunque con una intensidad capaz de remover y diluir las sales eflorescentes formadas en épocas de sequías. Por lo tanto el factor climático es determinante en la temporalidad de estos minerales secundarios.

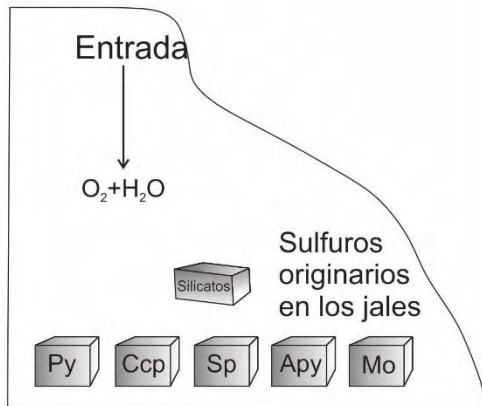
Como se ha definido antes, el fenómeno llamado *first flush* o *primer lavado* es el que ocasiona un incremento en las concentraciones elementales de las corrientes de escorrentía en los jales, un aumento en la conductividad eléctrica y valores bajos de pH. Los parámetros de concentración, conductividad eléctrica y acidez son paulatinamente aligerados conforme los periodos de lluvia acaban, de esta manera, los procesos de evaporación entran en juego para movilizar los iones disueltos a la superficie y reiniciar el proceso de formación de sales eflorescentes.

De cierta manera, la formación de sales eflorescentes, que podría definirse como la expresión del DAM en zonas áridas, es un importante inmovilizador de elementos tóxicos hasta que el agua por precipitación las disuelve y libera estos elementos. En zonas áridas y semiáridas, como Nacozari de García, no solo las lluvias determinan la temporalidad y movilización de sales eflorescentes; los mecanismos de remoción de sales por procesos eólicos son frecuentes en esta área, por lo cual también se les considera importantes.

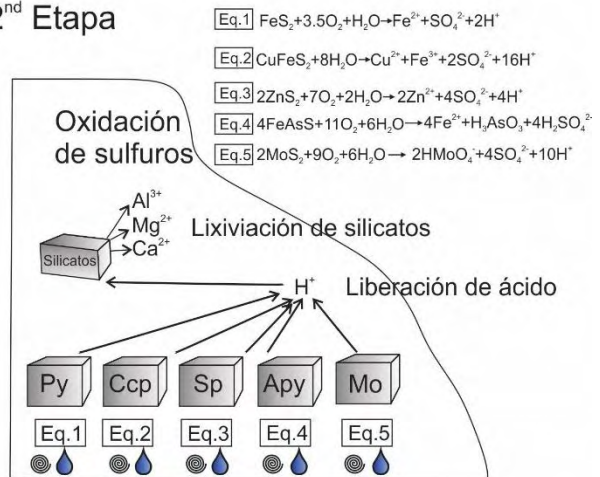
4.2.5 Modelo de paragénesis de formación y transformación de sales eflorescentes

Para este estudio se propone un modelo que explica los procesos de lixiviación natural en jales mineros de cobre en zonas áridas-semiáridas y también la paragénesis de formación de sales eflorescentes (Figura 4.3).

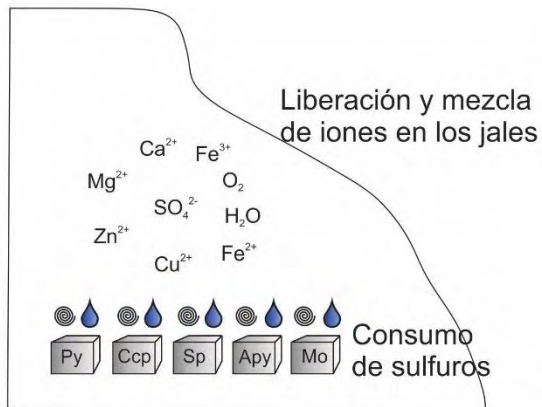
1st Etapa



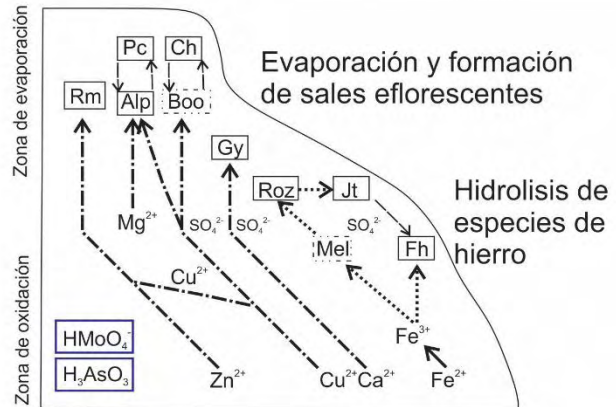
2nd Etapa



3th Etapa



4th Etapa



Explicación

Pirita	Roz Rozenita	Iones	Mineral no detectado en este estudio pero inferido químicamente
Calcopirita	Gy Yeso	Actividad bacteriana	Especies inmobilizadas
Esfalerita	Boo Boothita	Oxidación por agua	
Arsenopirita	Ch Calcantita	— Movilización	
Fh Ferrihidrita	Alp Alpersita Hidrolisis	
Mel Melanterita	Pc Pentahidrita cúprica	----- Transformación	
Jt Jarosita	Rm Ramsbeckita	-.-.-.- Movilización capilar	
		Fase mineral detectada en este estudio	

Figura 4.3 Modelo de paragénesis propuesto para la formación de sales eflorescentes en jales mineros de cobre en zonas áridas-semiáridas propuesto para este estudio.

Los procesos que han ocurrido en los jales de Nacozari de García se pueden ejemplificar en cuatro etapas. En la primera etapa los residuos producto de la extracción de la mina Pilares fueron depositados en Nacozari de García con un contenido de sulfuros primarios como pirita, calcopirita, esfalerita, molibdenita y arsenopirita. Las condiciones ambientales del lugar promueven la entrada de agua y oxígeno a los jales que provocarán la oxidación de los sulfuros.

En una segunda etapa, la oxidación de los sulfuros comienza por medio del contacto y la actividad con el agua y también por la posible actividad bacteriana que acelera los procesos de oxidación. Las reacciones involucradas en cada uno de los sulfuros liberan SO_4^{2-} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , HMoO_4^- , $\text{H}_3\text{AsO}_3^{2-}$ y H^+ . El ácido liberado lixivia los silicatos presentes y liberan Al^{3+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , entre otros.

La tercera etapa consiste en la oxidación y lixiviación continua de los sulfuros hasta que se consuman totalmente y dejando libres iones tales como SO_4^{2-} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , HMoO_4^- , $\text{H}_3\text{AsO}_3^{2-}$, H^+ , Al^{3+} , Mg^{2+} y Ca^{2+} que a su vez comienzan a mezclarse entre ellos para formar nuevos minerales por procesos de hidrólisis.

En la cuarta etapa consiste en la formación, por procesos de hidrólisis, especies minerales de Fe como ferrihidrita, melanterita, rozenita y jarosita. El mineral melanterita no fue detectado en este estudio, pero se estima que fue uno de los minerales precursores en la formación de la serie rozenita-jarosita-ferrihidrita, que representan las especies de Fe más estables. Esta serie de minerales de hierro se concentran en la parte basal de la columna de jales JI. Los iones de Ca^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} y Mg^{2+} migran en solución vía capilaridad hacia la zona de evaporación y se mezclan con H_2O y SO_4^{2-} para formar las sales eflorescentes. Las sales eflorescentes que se forman en esta zona son calcantita, alpersita, pentahidrita cúprica, yeso y ramsbeckita. Algunos minerales siguen estas secuencias: i) boothita-calcantita y ii) alpersita-pentahidrita cúprica. El mineral boothita no se determinó en este estudio pero se cree que exista por que la calcantita es producto de deshidratación de la boothita así como la alpersita se deshidrata a pentahidrita cúprica.

4.2.6 Implicación ambiental de las sales eflorescentes

La formación de sales eflorescentes es un proceso que puede inmovilizar elementos potencialmente tóxicos y que se liberan por medio de la disolución de las mismas debido al agua de lluvia. El transporte y disponibilidad de estos sulfatos vía eólica deja a la población circundante a los jales expuesta a su ingesta vía oral y respiratoria. La presa de jales I de Nacozari se encuentra rodeada por áreas residenciales, las cuales son las de mayor exposición a elementos potencialmente tóxicos. Las concentraciones de referencia totales para As, Ba, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Ta y V se presenta en la Tabla 23 referente a la Norma Oficial Mexicana NOM-147 SEMARNAT SSA1 2004. Los valores mínimos, máximos y promedio de elementos As, Cd, Ni, Ag, Pb y V medidos en este estudio en jales se encuentran en la Tabla 24. Los valores de los mismos elementos medidos en sales eflorescentes de la zona de evaporación se encuentran en la Tabla 25.

Tabla 23 Concentración de referencia total (CR_T) por tipo de uso de suelo. NOM-147 SEMARNAT SSA1 2004.

Contaminante	Uso agrícola/residencial/comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico	22	260
Bario	5400	67000
Berilio	150	1900
Cadmio	37	450
Cromo Hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1600	20000
Plata	390	5100
Plomo	400	800
Selenio	390	5100
Talio	5.2	67
Vanadio	78	1000

Tabla 24 Concentración elemental mínima, máxima y promedio en la columna de jales JI.

Concentraciones en la columna JI			
Contaminante	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
As	8.557	106.28	29.26
Cd	5.300	14.310	6.848
Ni	10.473	58.923	25.042
Ag	2.995	25.883	9.055
Pb	20.087	212.830	83.904
V	29.117	89.677	51.113
Zn	35.180	795.617	194.147
Cu	250.123	3903.877	1178.485

Tabla 25 Concentración elemental mínima, máxima y promedio en sales eflorescentes.

Concentraciones en sales eflorescentes			
Contaminante	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
As	10.773	21.587	16.791
Cd	5.56	27.127	13.154
Ni	15.873	28.547	9.578
Ag	4.37	8.44	6.463
Pb	58.963	141.143	89.392
V	39.1	57.593	48.042
Zn	140.563	11191.61	4716.624
Cu	1172.96	142915.63	54063.864

Se puede observar que las concentraciones de Cd, Ni, Ag, Pb y V en jales mineros y sales eflorescentes se encuentran por debajo de los valores máximos permitidos por la NOM-147 SEMARNAT SSA1 2004 en suelos de uso residencial. En el caso del As, en las muestras de jal las concentraciones de este elemento sobrepasan la concentración permitida por la norma y este elemento se concentra más en la zona basal de oxidación, por lo cual es probable que su transporte eólico sea de muy baja intensidad. Para el caso de sales eflorescentes, el As se encuentra en el límite de lo permitido. El vanadio en el caso de las muestras de jales, algunas muestras sobre pasan el límite permitido por la norma.

Una manera novedosa y sustentable para mitigar la dispersión de las sales eflorescentes y aumentar la resistencia a la erosión eólica e hídrica es por medio de fitoremediación. El reto actual de esta técnica de remediación a largo plazo, es encontrar plantas nativas que sean lo suficientemente tolerante para vivir en este tipo de terrenos escasos de nutrientes. La información geoquímica-mineralógica obtenida con este estudio puede servir como referencia para la futura planeación e implementación de técnicas de fitoremediación.

4.2.7 Evaluación económica de los jales de Nacozeni.

Los jales de Nacozeni de García tienen una antigüedad de más de 70 años. La gran mayoría de este material fue extraído de la antigua mina de Pilares la cual operó durante el periodo de 1895 a 1949 con leyes de 2.5-3 % Cu. La deposición y abandono de las tres presas de jales de Nacozeni, ha provocado con el paso de los años la oxidación de sulfuros y movilidad de elementos por procesos de capilaridad, lo cual ha provocado un enriquecimiento de cobre la zona de evaporación de estos jales con concentraciones que van del 8% al 14% Cu en forma de sulfatos hidratados.

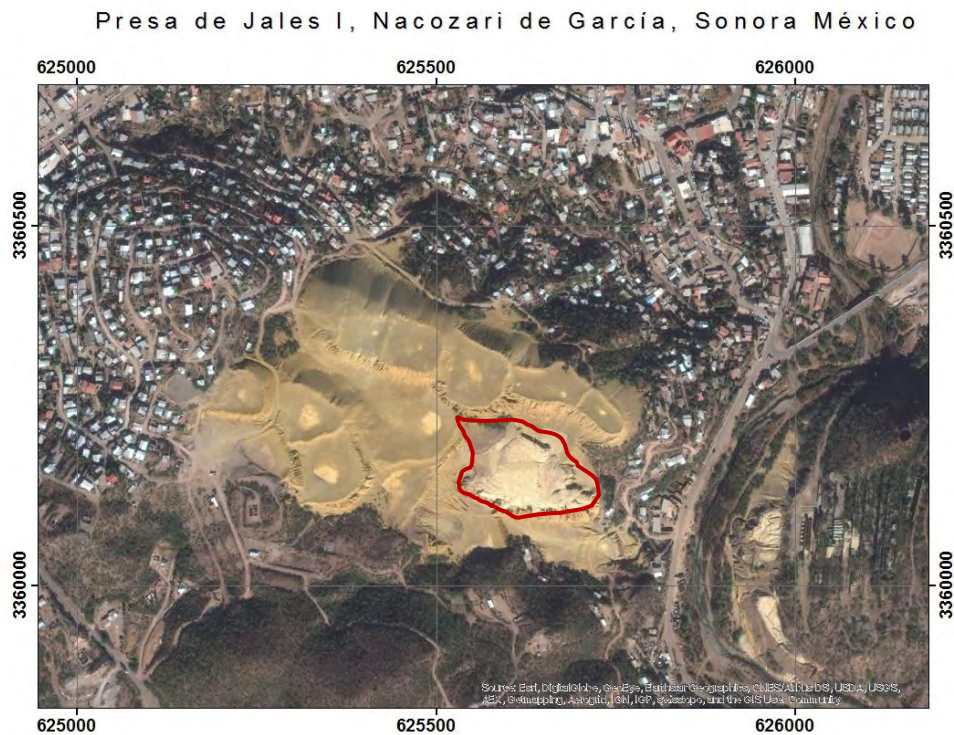


Figura 4.4 Ubicación de la Presa de Jales I. El contorno color rojo representa la zona de evaporación donde existe una mayor concentración de sulfatos de cobre.

Actualmente los procesos de evaporación y capilaridad juegan un papel importante en la disolución y reprecipitación de sulfatos de cobre en la parte superficial y somera de los jales de Nacozari. Sin embargo, la concentración de cobre continua en el sistema y quizás solo se pierde un poco de esa cantidad por procesos de erosión hídrica y eólica. La Figura 4.4 muestra la ubicación de la presa de jales I y el área correspondiente a la zona de evaporación donde se concentran las sales eflorescentes de cobre.

Se estima en base a estas consideraciones y las concentraciones de Cu encontradas en este estudio, que los jales mineros de Nacozari de García tienen un potencial económico importante y que los procesos metalúrgicos para la extracción de cobre en sulfatos tendrían una buena recuperación. Sin embargo, hay que considerar que tan factible es el hecho de extraer este material por las repercusiones ambientales que se pueden ocasionar.

4.3 Recomendaciones

- Para estudios futuros se recomienda emplear un experimento de extracción secuencial para poder determinar la concentración elemental y la afinidad mineralógica de las especies minerales que se encuentran en los jales. Este estudio establecerá que elementos se concentran más en ciertas especies minerales y ayudará a entender mejor los procesos de movilidad elemental en los jales de Nacozari de García.
- Se recomienda realizar un inventario de comunidades bacterianas en los jales de Nacozari de García para entender mejor las funciones de las bacterias en la oxidación de los jales y en los procesos de inmovilización de elementos.
- Se recomienda emplear un experimento de separación de sales eflorescentes para poder definir las con DRX por separado. Se propone también realizar un análisis de arcillas para determinar de manera específica que filosilicatos se encuentran en los jales mineros y relacionar estos datos con los análisis de extracción secuencial.
- Un estudio de biodisponibilidad para la población de Nacozari de García sería útil para ver de qué manera influye las concentraciones elementales presentes en las sales eflorescentes, ya que estos minerales suelen ser susceptibles a la erosión eólica y se vuelven bioaccesibles para el humano.

-
- Se aconseja hacer un estudio de isotopos estables de Cu en sales eflorescentes y jales para entender de mejor manera los procesos de movilización, migración y fraccionación de Cu por procesos de capilaridad.
 - Se recomienda continuar con los estudios actuales de remediación-fitoremediación en jales mineros en zonas áridas para la inmovilización de elementos potencialmente tóxicos. Se podrían considerar otros métodos como la remediación electrocinética, aunque sus costos deben ser estimados.
 - Se recomienda valorar el potencial económico de los jales de Nacozari a mayor detalle y establecer la factibilidad de remover este material para la extracción de cobre en sulfatos secundarios. De igual manera evaluar las repercusiones ambientales que puedan existir al removerlos.

Capítulo 5

Conclusión

5. Conclusiones

- Los jales de La Presa de Jales I, en Nacozari de García, Sonora, están conformados por arenas medias en la parte inferior, variando a arenas muy finas a limos gruesos, en la parte superior. Por otro lado, la parte inferior corresponde a una zona de oxidación, mientras que la parte superior corresponde a una zona de evaporación.
- La mineralogía encontrada en los jales consiste en: cuarzo (SiO_2), jarosita ($\text{KFe}^{3+}3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), jokokuita ($\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), ortoclasa ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$), rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), alpersita ($(\text{Mg,Cu})(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), calcantita ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ferrihidrita ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), pentahidrita cúprica ($(\text{Mg,Cu})\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y ramsbeckita ($(\text{Cu,Zn})_{15}(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{22} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).
- Existe un mayor enriquecimiento de As, Fe, Mo, Ag, Ni, Sr (en las partículas más finas), y V en la zona de oxidación del perfil JI. En cambio, en la zona de evaporación se aprecia un mayor enriquecimiento en Cu, Pb, Zn, U y Mn.
- El enriquecimiento en la zona de evaporación se concentra en sales eflorescentes asociadas a procesos de capilaridad y evaporación, que controlan la migración y precipitación de los elementos enriquecidos a la superficie en forma de sulfatos secundarios.
- Los horizontes con sales eflorescentes tienen valores altos de conductividad eléctrica, acoplados con valores bajos de pH.
- La ocurrencia de sales eflorescentes en forma de horizontes alternados se debe a control textural entre cada capa de la zona de evaporación. Las sales eflorescentes ocurren en capas con arenas muy finas a limos gruesos, debido a la retención de humedad, y su formación está controlada por las condiciones redox, la hidrología interna del jal y la mineralogía primaria.
- Los procesos de lixiviación y formación de sales eflorescentes estudiadas se puede representar en cuatro etapas: 1) oxidación de sulfuros; 2) aumento en la acidez de las soluciones por liberación de H^+ ; 3) intercambio iónico y precipitación de minerales de hierro y sales eflorescentes; 4) migración vía capilaridad y precipitación de sulfatos secundarios.

-
- En base a los datos de concentración de referencia total establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-147 SEMARNAT-SSA1-2004 para suelos de uso residencial, sólo el arsénico sobrepasa el valor máximo permisible, mientras que vanadio se encuentra cerca del límite.
 - De acuerdo con estos resultados, es necesario evaluar la factibilidad de remover estos jales de su sitio, para valorar las posibles repercusiones ambientales que esto pueda ocasionar. Incluso, un cálculo de reservas pudiera definir si el cobre disponible es económicamente recuperable.

Bibliografía

- Akcil, A. and Koldas, S., 2006. Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12), 1139-1145.
- Alpers, C.N., and Blowes, D.W., eds., 1994. *Environmental geochemistry of sulfide oxidation*: Washington, D.C., American Chemical Society Symposium Series 550, 681 p.
- Alvarado, V.J., y Volke, T.L., 2004. Informes de resultado del proyecto: método de análisis y propuesta para el manejo de los residuos mineros del sitio de Nacozari, Sonora. Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, SEMARNAT.
- Anderson, J.L., and Bender, E., 1989. Nature and origin of Proterozoic A-Type granitic magmatism in the southwestern United States of America. *Lithos*, 23, 19-52.
- Anderson, T.H., and Silver, L.T., 1981. An overview of Precambrian rocks in Sonora. *UNAM Instituto de Geología Revista*, 5(2), 131-139.
- Atwater, T., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America: *Geological Society of America Bulletin*, 81, 3513-3536.
- Atwater, T., and Stock, J., 1998. Pacific-North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: An update: *International Geology Review*, 40(5), 375-402.
- Barra, F., Ruiz, J., Valencia, V. A., Ochoa-Landín, L., Chesley, J. T., and Zurcher, L., 2005. Laramide porphyry Cu-Mo mineralization in northern Mexico: Age constraints from Re-Os geochronology in molybdenite. *Economic Geology*, 100(8), 1605-1616.
- Bea, S. A., Ayora, C., Carrera, J., Saaltink, M. W., and Dold, B., 2010. Geochemical and environmental controls on the genesis of soluble efflorescent salts in Coastal Mine Tailings Deposits: A discussion based on reactive transport modeling. *Journal of contaminant hydrology*, 111(1), 65-82.
- Berchenbriter, D.K., 1976. The geology of La Caridad fault, Sonora, Mexico: Unpublished M.S. thesis, Iowa City, University of Iowa, 127 p.
- Bigham, J.M., Schwertmann, U., Traina, S.J., Winland, R.L., Wolf, M., 1996. Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochim Cosmochim Acta* 60:2111–2121.

-
- Bilodeau, W., Callender J., Wilt, J., Clemons, R., eds., 1978. The Glance Conglomerate, a lower Cretaceous syntectonic deposit in southeastern Arizona, Land of Cochise, Southeastern Arizona: New Mexico Geological Society, 29th Field Conference.
- Cámara Minera de México., 2014. Informe Anual 2014 de la Cámara Minera de México. México, D.F.: CAMIMEX.
- Campa, M.F., Coney, P.J., 1983. Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, 20, 1040-1051.
- Carmona, D. M., Cano, Á. F., and Arocena, J. M., 2009. Cadmium, copper, lead, and zinc in secondary sulfate minerals in soils of mined areas in Southeast Spain. *Geoderma*, 150(1), 150-157.
- Coney, P.J., and Reynolds, S. J., 1977. Cordilleran Benioff zones. *Nature*, 270: 403-406.
- Damon, P., Shafiqullah, M., Clark, K., 1983. Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6): 1052-1071.
- De la O Villanueva, M., Meza Figueroa, D., Maier, R. M., Moreno, D., Gómez Alvarez, A., Del Río Salas, R., y otros., 2013. Procesos erosivos en jales de la Presa I de Nacozari de García, Sonora y su efecto en la dispersión de contaminantes. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 27-38.
- Diaby, N., Dold, B., Pfeifer, H. R., Holliger, C., Johnson, D. B., and Hallberg, K. B., 2007. Microbial communities in a porphyry copper tailings impoundment and their impact on the geochemical dynamics of the mine waste. *Environmental microbiology*, 9(2), 298-307.
- Dold, B., Fontboté, L., 2001. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing, Special Issue: Geochemical studies of mining and the environment: *Journal of Geochemical Exploration*, 74, 3-55.
- Dold, B., and Fontboté, L., 2002. A mineralogical and geochemical study of element mobility in sulfide mine tailings of Fe oxide Cu–Au deposits from the Punta del Cobre belt, northern Chile. *Chemical Geology*, 189(3), 135-163.
- Dold, B. (2003). Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste. *Journal of Geochemical Exploration*, 80 (1), 55-68.
- Dold, B., 2006. Element flows associated with marine shore mine tailings deposits. *Environmental science & technology*, 40(3), 752-758.
-

-
- Dold, B., 2010. Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management, Waste Management, Er Sunil Kumar (Ed.), ISBN: 978-953-7619-84-8, InTech, Available from:<http://www.intechopen.com/books/waste-management/basic-concepts-in-environmental-geochemistry-of-sulfidic-mine-waste-management>
- Efflorescence, 2015. En Encyclopedia Britannica. Consultado el 22 de agosto de 2015 en la página <http://global.britannica.com/science/efflorescence>
- España, J. S., Pamo, E. L., Santofimia, E., Aduvire, O., Reyes, J., and Baretino, D., 2005. Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (Odiel river watershed, Huelva, SW Spain): geochemistry, mineralogy and environmental implications. *Applied Geochemistry*, 20(7), 1320-1356.
- Ficklin, W.H., Plumlee, G.S., Smith, K.S., McHugh, J.B., 1992. Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralized areas. In: Kharaka, Y.K., Maest, A.S., eds., *Proceedings of water-rock interaction no 7*. Balkema, Rotterdam, pp 381–384
- Fleischer, M., 1951. New mineral names. *American Mineralogist*, 36, 638–642.
- Flora y fauna de Nacozari de García, 2015. En Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Consultado el 28 de septiembre de 2015 en la página <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/index.html>
- Gardner, E.D., Johnson, C.H., and Butler, B.S., 1983. *Copper mining in North America*. US Government Printing Office.
- Gómez, J. R., 2014. Caracterización geológica, estructural, geoquímica y metalogénica de la Brecha Pilares, Sonora, México. (Tesis de maestría). Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- González-León, C.M., 1988. Estratigrafía y geología estructural de las rocas sedimentarias cretácicas del área de Lampazos, Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*, 7, 148-162.
- Gutiérrez-Ruíz, Margarita; Romero, Francisco M. y González-Hernández, 2007. Galia. Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México. *Rev. mex. cienc. geol [online]*. vol.24, n.2, pp. 170-184. ISSN 2007-2902.

-
- Hayes, P. and Drewes, H., 1978. Mesozoic depositional history of southeastern Arizona. In: J. Callender, J. Wilt and R. Clemons, eds., Land of Cochise, Southeastern Arizona. New Mexico Geol. Society, 29th Field Conference, pp. 201-207.
- Hayes, S. M., Root, R. A., Perdrial, N., Maier, R. M., and Chorover, J., 2014. Surficial weathering of iron sulfide mine tailings under semi-arid climate. *Geochimica et cosmochimica acta*, 141, 240-257.
- Hernández-Acosta, E. et al. 2009. Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Rev. Chapingo [online]*. vol.15, n.2, pp. 109-114. ISSN 0186-3231.
- Livingston, D.C., 1912. Mining methods at Nacozari, Sonora, Mexico. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, vol. 15, pp. 662-669.
- Livingston, D.E., 1973. A plate tectonic hypothesis for the genesis of porphyry copper deposits of the southern Basin and Range Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 20: 171-179.
- Lonsdale, P., 1991. Structural patterns of the Pacific floor offshore of Peninsular California, in Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T., eds., *The Gulf and Peninsular Province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists*, 47, 87-125.
- Lottermoser, B. G., Ashley, P. M., and Costelloe, M. T., 2005. Contaminant dispersion at the rehabilitated Mary Kathleen uranium mine, Australia. *Environmental geology*, 48(6), 748-761.
- Lottermoser, B. G., 2010. *Mine wastes: Characterization, treatment, and environmental impacts*. Berlin: Springer, Third Edition.
- McDowell, F.W., Clabaugh, S.E., 1979. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico, en Chapin, C.E., Elston, W.E., eds., *Ash-flow tuffs: Geological Society of America, Special Paper 180*, 113-124.
- Medel, A., Ramos, S., Avelar, F. J., Godínez, L. A., y Rodríguez, F., 2008. Caracterización de Jales Mineros y Evaluación de su Peligrosidad con Base en su Potencial de Lixiviación. *Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 35, 33-35.
- Mendoza-Amézquita, Elsa et al., 2006. Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México. *Rev. mex. cienc. geol [online]*. vol.23, n.1, pp.

-
- Meza-Figueroa, D., Maier, R.M., De la O-Villanueva, M., Gómez-Alvarez, A., Moreno-Zazueta A., Rivera, J., Campillo, A., Grandlic, C.J., Anaya, R., Palafox-Reyes, J., 2009. The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, Mexico: *Chemosphere*, 77, 140-147.
- Moreno Tovar, Raúl; Téllez Hernández, Jesús y Monroy Fernández, Marcos G. 2012. Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Rev. Int. Contam. Ambient* [online]. vol.28, n.3, pp. 203-218. ISSN 0188-4999.
- Nordstrom DK., 2009. Acid rock drainage and climate change. *J Geochem Explor* 100:97–104.
- Nourse, J.A., Anderson, T.H., Silver, L.T., 1994. Tertiary metamorphic core complexes in Sonora, northwestern Mexico: *Tectonics*, 13(5), 1161-1182.
- Parsons, T., 1995. The Basin and Range province in continental rifts: Evolution, Structure, Tectonics, en Olsen, K.H., eds., *Continental Rifts: Evolution, Structure, and Tectonics*: Elsevier, *Developments in Geotectonics* 25, 277-324.
- Quispe, D., Pérez-López, R., Acero, P., Ayora, C., & Nieto, J. M., 2013. The role of mineralogy on element mobility in two sulfide mine tailings from the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Chemical Geology*, 345, 119-129.
- Rascón-Heimpel, M.A., Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., y Calmus, T., 2012. Geología y geoquímica del prospecto de pórfido cuprífero Los Alisos, Distrito Minero de La Caridad, Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 29, 355-383. Ripley EA, Redmann RE, Crowder AA (1996) *Environmental effects of mining*. St Lucie Press, Delray Beach.
- Raisz, E., 1959. Landforms of México, map scale 1:3000000, Geography Branch of the office of Naval Research. Cambridge, Massachusetts.
- Rangin, C., 1978. Consideraciones sobre la Evolucion Geologica de la parte Septentrional del Estado de Sonora., *Libreto guia 1er Simposio sobre la geologia y potencial minero del Estado de Sonora*. Instituto de Geologia UNAM, Hermosillo., pp. 35-36.
- Rehrig, W. A., 1986. Processes of regional Tertiary extension in the Western Cordillera; insights from the metamorphic core complexes, en Mayer, L., *Extensional Tectonics of the Southwestern United States: A perspective on processes and kinematics*: Geological Society of America, *Special Paper* 208, 97-122.

-
- Ripley, E.A., Redmann, R.E., Crowder, A.A., 1996. Environmental effects of mining. St Lucie Press, Delray Beach.
- Ritcey, G.M., 1989. Tailings management. Problems and solutions in the mining industry. Elsevier, Amsterdam, 970 pp.
- Robles-Arenas, V. M., Rodríguez, R., García, C., Manteca, J. I., and Candela, L., 2006. Sulphide-mining impacts in the physical environment: Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain) case study. *Environmental Geology*, 51(1), 47-64.
- Livingston, D.E., 1973. A plate tectonic hypothesis for the genesis of porphyry copper deposits of the southern Basin and Range Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 20: 171-179.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., Gutiérrez, M.E., Villaseñor, G., 2008, Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24(2), 43-54.
- Romero, Francisco Martín y Gutiérrez Ruíz, Margarita. 2010. Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Bol. Soc. Geol. Mex [online]*. vol.62, n.1, pp. 43-53. ISSN 1405-3322.
- RRUFF, 2015. En RRUFF. Consultado el 22 de noviembre de 2015 en la página <http://rruff.info/Ramsbeckite>
- Salomons W., 1995. Environmental impact of metals derived from mining activities; processes, predictions, prevention. *J Geochem Explor* 52:5–23
- Seagart, W., Sell, J., and Kilpatrick, B., 1974. Geology and mineralization of La Caridad porphyry copper deposits, Sonora, Mexico: *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 69, p.1060–1077.
- Seal, R.R. II, Hammarstrom, J.M., 2003. Geoenvironmental models of mineral deposits: examples from massive sulfide and gold deposits. In: Jambo, J.L., Blowes, D.W., Ritchie, A.M., eds., *Environmental aspects of mine wastes*, vol 31. Mineralogical Association of Canada, Nepean, pp 11–50 (Short course handbook)
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1999. Carta geológico-minera El Abanico H12-B75 Sonora. Secretaría de Economía. 1 Hoja.
- Sillitoe, R.H., 1985. Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic Geology*, 80(6), 1467-1514.
- Smuda, J., Dold, B., Friese, K., Morgenstern, P., and Glaesser, W., 2007. Mineralogical and geochemical study of element mobility at the sulfide-rich Excelsior waste rock dump from the

-
- polymetallic Zn–Pb–(Ag–Bi–Cu) deposit, Cerro de Pasco, Peru. *Journal of Geochemical Exploration*, 92(2), 97-110.
- Stewart, J., 1988. Latest Proterozoic and Paleozoic southern margin of North America and the accretion of Mexico. *Geology*, 16: 186-189.
- Stock, J.M., Lee, J., 1994. Do microplates in subduction zones leave a geological record?: *Tectonics*, 13(6), 1472-1487.
- Tailings, 2015. En Tailings.Info. Consultado el 19 de octubre de 2015 en la página <http://www.tailings.info/basics/tailings.htm>
- Tosdal, R., Haxel, G. and Wright, J., 1989. Jurassic Geology of the Sonoran Desert region, southern Arizona: construction of a continental-margin magmatic arc. In: S.R. Reynolds, . (Ed), *Geologic Evolution of Arizona*. Arizona Geological Society Digest 17, Tucson, pp. 397-434.
- Valencia, V.A., 2005. Evolution of La Caridad porphyry copper deposit, Sonora and geochronology of porphyry copper deposits in northwest Mexico. (Tesis doctoral). Universidad de Arizona. Tucson, Arizona, EUA.
- Valencia, V.A., Ruiz, J., Barra, F., Geherls, G., Ducea, M., Tittley S.R., and Ochoa-Landin, L., 2005. U-Pb zircon and Re-Os molybdenite geochronology from La Caridad porphyry copper deposit: Insights for the duration of magmatism and mineralization in the Nacozari district, Sonora, Mexico: *Mineralium Deposita*, v. 40, p. 175–191.
- Valencia, V.A., Eastoe, C.J., Ruiz, J., Ochoa-Landin, L., Gehrels, G., Gonzalez-Leon, C., Barra, F., and Espinoza, E, 2008. Hydrothermal evolution of the porphyry copper deposit at La Caridad, Sonora, Mexico, and the relationship with a neighboring high-sulfidation epithermal deposit. *Economic Geology*, 103, 473-491.
- Wade, W. R., and Wandtke, A., 1920. *Geology and mining methods at Pilares mine*: Am. Inst. Mining Metall. Engineers Trans., v. 63, p. 382-407.
- Worcester, P., 1976. *Geology of northern part of the Nacozari mining district, Nacozari, Sonora, Mexico*, The Miami University, Ohio.
- Worcester, P., 1976. *Geology of northern part of the Nacozari mining district, Nacozari, Sonora, Mexico*, The Miami University, Ohio.
- Zazueta, S. M., Castelo, J. R., and Figueroa, D. M., 2010. Descripción Metodológica de etapas a seguir en un estudio geotécnico para estabilización de presas de jales: Presa I, Nacozari de

García, Sonora, México. Técnicas Aplicadas a la Caracterización y Aprovechamiento de Recursos Geológico-Mineros, 65.

Anexos

Valores de certificados utilizados para los análisis de fluorescencia de rayos X

Tabla 26. Valores de certificado para el estándar Montana Soil 2710a.

ELEMENT	Symbol	Units	SRM 2710a mass fraction	U
ALUMINIUM	Al	ppm	59500	0.05
ANTIMONY	Sb	ppm	52.2	1.6
ARSENIC	As	ppm	1540	10
BARIUM	Ba	ppm	792	36
BORON	B	ppm	20	
CADMIUM	Cd	ppm	12.3	0.3
CALCIUM	Ca	ppm	9640	0.045
CERIUM	Ce	ppm	60	
CESIUM	Cs	ppm	8.25	0.11
CHROMIUM	Cr	ppm	23	6
COBALT	Co	ppm	5.99	0.14
COPPER	Cu	ppm	3420	50
DYSPROSIUM	Dy	ppm	3	
EUROPIUM	Eu	ppm	0.82	0.01
GADOLINIUM	Ga	ppm	3	0.1
GOLD	Au	ppm	0.2	
HAFNIUM	Hf	ppm	7	
INDIUM	In	ppm	7	
IRON	Fe	ppm	43200	0.08
LANTHANUM	La	ppm	30.6	1.2
LEAD	Pb	ppm	5520	0.003
LUTETIUM	Lu	ppm	0.31	0.01
MAGNESIUM	Mg	ppm	7340	0.038
MANGANESE	Mn	ppm	2140	60
MERCURY	Hg	ppm	9.88	0.21
NEODYMIUM	Nd	ppm	22	2
NICKEL	Ni	ppm	8	1
PHOSPHORUS	P	ppm	1050	0.004
POTASSIUM	K	ppm	21700	0.13
RUBIDIUM	Rb	ppm	117	3
SAMARIUM	Sm	ppm	4	0.2
SCANDIUM	Sc	ppm	9.9	0.1
SELENIUM	Se	ppm	1	
SILICON	Si	ppm	31100	0.4
SILVER	Ag	ppm	40	

SODIUM	Na	ppm	8940	0.019
STRONTIUM	Sr	ppm	255	7
TANTALUM	Ta	ppm	0.9	
TERBIUM	Tb	ppm	0.5	
THALLIUM	Tl	ppm	1.52	0.02
THORIUM	Th	ppm	18.1	0.3
TITANIUM	Ti	ppm	3110	0.007
TUNGSTEN	W	ppm	190	
URANIUM	U	ppm	9.11	0.3
VANADIUM	V	ppm	82	9
YTTERBIUM	Yb	ppm	2	
ZINC	Zn	ppm	4180	20
ZIRCONIUM	Zr	ppm	200	

Tabla 27. Valores de certificado para el estándar CCPRP TILL-4PP.

CCPRP TILL-4PP	TILL-4
As	111
Au (ppb)	5
Ba	395
Be	3.7
Bi	40
Br	8.6
Ce	78
Co	8
Cr	53
Cs	12
Cu	237
Eu	<1.0
Er	3.2
Fe (%)	39700
Hf	10
La	41
Li	30
LOI (500°C) %	4.4
Lu	0.5
Mn	490
Mo	16
Nb	15
Nd	30
Ni	17
P	880
Pb	50
Rb	161
S (%)	800

Sb	1
Sc	10
Sm	6.1
Sr	109
Ta	1.6
Tb	1.1
Th	17.4
Ti (%)	4840
U	5
V	67
W	204
Y	33
Yb	3.4
Zn	70
Zr	385
Ca (%)	8900
K (%)	27000

Tabla 28. Valores de certificado para el estándar CRM-SA-C Sandy Soil.

CRM-SA-C Sandy Soil	Element	Concentration
%	Al	58600
%	Ca	128000
%	Fe	123000
%	K	1930
%	Mg	9700
%	Mn	3100
%	Na	4760
%	Ti	470
ppm	Ag	20.3
ppm	As	66.9
ppm	Au	25.5
ppm	Ba	11.9
ppm	Be	6.36
ppm	Cd	109
ppm	Co	12.6
ppm	Cr	50.9
ppm	Cu	60.6
ppm	Li	69
ppm	Mo	51
ppm	Ni	44.9
ppm	Pb	133
ppm	Sb	12.5
ppm	Se	106
ppm	Sn	61.1
ppm	Sr	37.6

ppm	Tl	50.8
ppm	V	62.8
ppm	Zn	613

Tabla I. Concentración elemental (ppm) obtenida para cada elemento por cada fracción granulométrica de la columna JI del muestreo de noviembre de 2014. LD= debajo del límite de detección.

Muestra	Mo						Zr						Sr					
	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm
JI-0m	86.5	110.5	145.5	198.0	266.9	329.9	151.5	149.7	147.2	143.5	163.4	289.1	77.0	70.1	69.0	70.8	73.8	85.9
JI-1m	79.5	94.0	134.3	178.1	252.1	286.9	150.4	168.8	140.0	147.1	170.7	241.4	68.2	64.4	68.4	65.4	70.9	77.1
JI-2m	56.9	120.3	152.8	215.9	305.1	360.1	138.3	152.0	150.4	162.6	185.9	254.5	67.3	73.3	74.4	74.2	81.6	90.1
JI-3m	65.4	112.5	149.6	198.0	273.6	327.1	155.5	162.1	142.3	140.5	174.5	246.1	58.8	70.9	68.6	69.2	76.3	80.5
JI-4m	81.7	93.2	115.2	154.4	214.0	263.8	154.0	146.9	154.2	150.4	196.0	309.8	54.7	69.4	65.5	65.5	70.5	83.1
JI-5m	65.7	94.9	120.1	158.1	231.4	283.2	155.9	148.7	150.7	142.7	177.5	325.6	81.0	66.1	64.2	65.3	70.0	87.4
JI-6m	82.1	107.4	147.2	201.7	298.9	352.8	143.0	150.7	139.8	151.1	188.7	314.8	74.1	76.2	74.8	73.2	80.8	101.2
JI-7m	57.1	99.5	130.0	159.9	219.2	271.3	150.0	142.2	144.3	137.7	180.7	291.9	66.2	67.0	70.1	64.9	71.4	84.6
JI-8m	107.8	105.1	155.3	203.4	271.0	324.6	151.5	153.1	141.6	140.5	171.5	217.1	76.9	69.5	71.2	69.2	73.0	84.8
JI-9m	67.0	99.8	113.7	127.1	156.6	186.3	149.0	147.1	143.2	146.9	160.9	224.7	72.1	68.3	67.9	68.4	71.7	75.1
JI-10m	LD	75.7	50.3	66.4	95.2	142.2	LD	149.3	143.7	133.6	159.9	295.2	LD	81.8	69.8	64.4	69.2	75.6
JI-11m	LD	85.7	61.4	61.5	72.5	107.5	LD	148.1	143.9	139.2	147.7	242.0	LD	79.1	69.2	66.0	68.3	78.5
JI-12m	LD	114.8	40.6	45.1	63.7	107.4	LD	165.7	138.3	132.7	146.4	224.8	LD	96.5	73.1	66.4	70.9	82.7
JI-13m	LD	62.8	51.2	50.1	54.4	70.7	LD	187.2	141.7	135.2	138.0	226.7	LD	81.7	69.7	66.6	70.7	81.2
JI-14m	LD	92.2	65.0	58.9	72.3	89.9	LD	152.5	141.9	140.2	143.7	207.2	LD	85.0	82.2	76.3	78.8	87.1
JI-15m	35.8	57.7	56.6	48.4	46.8	55.2	172.5	162.1	150.8	161.5	142.5	206.2	366.3	128.1	84.4	75.4	73.2	80.6
JI-16m	LD	103.3	55.8	54.4	69.5	94.6	LD	157.0	140.0	137.0	155.9	250.1	LD	82.9	72.9	68.3	72.5	79.4
JI-17m	LD	69.1	55.1	56.3	60.7	73.0	LD	142.6	137.9	149.1	142.4	212.3	LD	87.8	77.0	73.4	74.4	82.7

Tabla I (continuación).

Muestra	U						Rb						Pb					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
JI-0m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	299.2	299.0	293.4	289.8	291.4	201.7	27.8	32.2	36.7	46.6	56.9	82.6
JI-1m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	288.7	281.2	286.0	280.3	289.6	292.1	42.8	34.4	43.8	44.9	59.8	70.7
JI-2m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	254.0	301.0	289.8	291.6	294.9	304.9	19.7	34.4	38.0	46.1	57.0	69.8
JI-3m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	265.8	287.3	278.4	279.3	284.2	287.6	20.4	33.2	40.2	47.7	59.3	70.7
JI-4m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	260.8	291.7	290.3	289.4	302.8	216.0	30.3	35.7	35.8	43.2	58.6	80.6
JI-5m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	309.2	297.9	283.5	281.9	308.5	240.7	33.4	32.8	36.3	43.4	60.2	94.4
JI-6m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	257.7	290.0	291.3	286.2	293.7	220.3	27.5	30.7	35.6	46.9	59.6	90.3
JI-7m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	286.2	291.2	288.9	276.7	304.0	366.6	26.5	30.1	38.1	41.0	52.6	77.3
JI-8m	LD	LD	LD	LD	10.1	LD	287.5	294.3	287.0	286.1	288.0	316.4	32.1	31.7	35.3	48.3	62.6	73.2
JI-9m	8.4	10.6	9.3	9.4	13.6	15.6	301.9	300.9	296.9	299.6	311.4	308.5	52.3	39.4	33.6	44.8	55.4	70.7
JI-10m	LD		10.5	8.5	10.7	14.0	LD	289.8	289.4	286.9	291.6	300.5	LD	47.1	47.0	60.6	78.7	100.5
JI-11m	LD	41.5	14.6	15.7	18.7	30.2	LD	299.7	292.8	292.5	298.5	297.9	LD	41.7	35.3	53.2	70.8	105.2
JI-12m	LD	23.7	11.9	13.9	16.2	25.2	LD	318.4	284.2	284.7	292.9	298.1	LD	120.7	44.0	61.4	80.4	136.4
JI-13m	LD	49.6	28.2	30.4	39.0	50.2	LD	268.7	271.4	274.3	274.4	278.2	LD	89.0	54.2	80.7	86.6	131.5
JI-14m	LD	40.1	27.4	26.8	30.2	44.1	LD	303.8	293.0	292.3	297.8	298.9	LD	93.3	57.1	61.2	82.1	123.5
JI-15m	25.7	25.5	20.6	14.8	14.8	23.9	208.3	311.9	298.9	301.0	294.3	300.2	61.2	124.8	93.5	102.1	78.5	129.2
JI-16m	LD	20.9	31.7	10.8	13.1	19.4	LD	314.1	293.9	295.6	299.0	301.5	LD	123.0	67.3	77.5	104.9	154.7
JI-17m	LD	67.0	45.6	56.0	49.9	64.7	LD	262.5	273.1	277.2	278.6	282.1	LD	65.7	59.6	54.3	65.4	102.9

Tabla I (continuación).

Muestra	As						Zn						W					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
JI-0m	21.2	32.3	39.4	50.5	67.7	80.8	129.5	63.0	70.9	105.0	111.7	183.1	78.3	77.6	105.1	126.7	179.4	538.0
JI-1m	25.8	23.0	36.3	46.3	65.5	74.3	69.7	60.8	70.8	87.9	154.3	151.5	77.5	83.3	126.2	131.2	184.4	223.8
JI-2m	16.2	29.4	39.9	49.9	68.9	87.2	44.5	70.6	69.9	93.4	121.2	141.6	53.6	82.9	107.5	129.5	183.4	222.9
JI-3m	18.2	32.1	37.1	47.6	68.5	80.3	59.2	61.3	75.8	95.1	117.8	134.8	60.6	89.6	114.9	134.7	191.6	229.3
JI-4m	27.9	30.6	38.0	46.4	63.7	76.6	56.9	57.0	63.7	78.3	108.3	150.4	75.5	89.8	104.0	137.3	172.5	545.2
JI-5m	24.4	30.7	38.9	48.0	71.9	105.7	54.3	63.1	81.7	71.4	129.4	199.0	72.3	101.9	108.2	131.6	174.9	747.9
JI-6m	16.4	26.1	33.3	47.2	68.7	92.0	33.6	63.8	91.1	103.8	117.0	199.6	51.8	73.4	83.5	121.2	163.9	552.4
JI-7m	21.5	31.2	37.8	43.8	62.1	96.3	57.7	55.5	73.3	82.5	112.6	159.5	73.6	86.4	116.0	139.3	171.7	260.8
JI-8m	22.0	29.5	39.2	50.2	69.5	81.9	76.3	56.6	68.5	95.4	110.7	152.2	73.0	69.4	95.5	130.0	164.1	206.9
JI-9m	14.6	30.8	31.0	32.1	39.4	49.2	55.6	67.3	79.7	90.2	121.8	140.0	57.9	89.2	98.1	114.7	135.1	207.1
JI-10m	LD	14.9	10.9	15.0	19.8	28.2	LD	99.2	86.7	97.5	122.8	145.6	LD	86.6	69.7	75.9	101.5	199.2
JI-11m	LD	14.0	10.0	8.1	10.1	19.1	LD	568.4	384.0	405.4	495.3	607.4	LD	104.9	77.9	88.2	111.9	200.2
JI-12m	LD	19.3	8.9	9.1	12.5	20.1	LD	373.4	157.9	171.8	215.0	289.5	LD	164.4	89.2	83.7	114.1	200.8
JI-13m	LD	16.0	9.1	10.5	11.4	16.5	LD	2787.7	1149.1	980.6	1233.3	1543.4	LD	261.4	155.5	143.8	178.4	223.1
JI-14m	LD	20.4	13.4	13.2	15.3	22.6	LD	2350.4	1173.9	892.3	900.9	969.0	LD	166.6	114.2	111.2	132.1	212.8
JI-15m	17.8	19.0	17.3	16.8	12.4	23.1	284.7	306.4	218.3	206.8	186.1	227.0	101.4	184.4	133.8	150.1	108.9	198.2
JI-16m	LD	23.0	10.5	12.7	22.0	23.9	LD	376.2	209.9	196.6	251.4	293.0	LD	166.9	98.3	95.5	151.9	204.5
JI-17m	LD	11.2	11.0	7.1	9.8	15.4	LD	3215.5	1759.6	1273	1243.1	1385.9	LD	212.5	168.7	144.6	156.1	210.2

Tabla I (continuación).

Muestra	Cu						Fe						Mn				
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm
Jl-0m	386.3	464.3	591.1	771.7	1001.1	1618.2	51011.0	44051.2	51043.7	69616.4	92667.7	122278.8	1623.8	220.7	207.7	200.2	44.0
Jl-1m	462.1	445.6	600.4	736.3	1046.5	1217.9	48857.4	44369.9	58705.1	69661.8	103871.7	124539.0	200.0	165.7	211.6	249.4	44.0
Jl-2m	291.5	500.8	573.9	772.0	1035.9	1288.0	32186.0	50774.3	55436.2	70760.1	98973.0	126474.5	157.8	277.3	212.1	256.6	44.0
Jl-3m	395.5	501.9	610.1	772.8	1027.6	1256.3	43742.0	54335.6	61898.0	78259.6	110549.3	138802.7	195.7	207.5	211.3	230.9	44.0
Jl-4m	396.2	433.8	469.3	628.1	860.9	1372.7	33728.9	37152.2	37317.6	47096.1	64778.8	93722.2	182.8	163.1	185.5	218.0	44.0
Jl-5m	436.7	466.5	533.9	673.2	1015.5	1995.7	34040.7	34723.0	37673.0	44395.3	69244.8	117174.5	174.6	171.3	183.3	196.0	44.0
Jl-6m	340.8	482.1	550.5	737.0	1029.1	1886.4	29838.9	38393.7	42561.7	57634.4	84073.3	127146.9	147.2	199.5	203.9	292.9	44.0
Jl-7m	396.7	463.0	555.4	641.1	904.3	1373.7	33678.0	37621.3	43835.2	47510.8	65920.3	102327.9	179.1	193.4	196.6	222.8	44.0
Jl-8m	384.1	487.4	643.4	772.5	1035.4	1370.3	41688.6	47745.8	59786.0	71482.7	98788.4	132360.2	426.8	171.4	224.9	248.1	44.0
Jl-9m	346.5	504.0	546.8	582.5	735.4	876.8	26901.6	35036.2	35775.8	35471.2	42559.6	50015.9	188.1	180.6	204.1	195.7	44.0
Jl-10m	LD	578.4	392.5	475.2	642.3	872.4	LD	13236.4	9075.9	10868.0	14024.4	19242.3	LD	152.8	153.7	178.4	44.0
Jl-11m	LD	1560.9	887.2	927.3	1182.8	1629.9	LD	12863.9	10113.4	10500.7	12998.6	18174.1	LD	603.9	422.8	404.9	44.0
Jl-12m	LD	2637.8	1013.6	1082.9	1358.9	1962.6	LD	18936.4	10026.9	10822.4	13193.5	18548.8	LD	498.3	256.2	278.3	44.0
Jl-13m	LD	22720.8	7739.7	5735.1	6627.1	7694.0	LD	15876.8	10713.7	10933.6	12909.1	16920.9	LD	2870.2	1166.6	986.9	44.0
Jl-14m	LD	11198.9	6010.6	4250.0	4103.0	4390.2	LD	20799.2	13457.4	12849.8	15634.8	20336.4	LD	2078.0	1134.9	833.4	44.0
Jl-15m	2842.9	2690.9	2032.9	1704.6	1488.3	1996.3	24173.8	20933.7	15782.2	15223.1	13628.9	17876.0	326.8	332.2	248.3	215.1	44.0
Jl-16m	LD	2787.3	1438.4	1313.6	1600.7	2043.3	LD	22781.2	12695.5	12642.4	15378.7	20635.5	LD	418.4	284.9	228.8	44.0
Jl-17m	LD	22359.6	12548.0	8253.6	7870.1	8564.9	LD	18849.6	12674.4	12645.0	14179.8	18192.1	LD	3464.8	1856.2	1405.3	44.0

Tabla I (continuación).

Muestra	V						Ti						Ca					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
Jl-0m	59.8	55.8	61.4	67.4	95.0	98.8	1379.8	1106.8	1589.9	1590.9	2361.5	2795.8	373.5	459.4	424.8	553.5	671.7	671.7
Jl-1m	51.8	53.1	55.6	70.9	76.9	102.4	1569.9	1238.6	1182.4	1951.8	2059.1	2761.4	302.1	273.8	220.7	333.6	394.4	486.1
Jl-2m	41.2	LD	LD	LD	LD	LD	1162.7	1312.8	2148.3	1959.7	2598.4	3030.6	470.0	436.9	1201.4	980.4	1263.1	1199.4
Jl-3m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	1587.3	1540.1	1385.5	1599.2	2275.6	2662.1	2371.1	2580.8	3721.1	4299.8	3835.9	2780.5
Jl-4m	51.3	45.6	56.1	61.2	82.1	83.8	1434.6	1150.9	1343.0	1560.9	2177.6	2744.9	340.1	320.7	359.0	439.4	545.4	534.1
Jl-5m	48.0	42.2	54.2	58.3	69.3	90.0	1288.0	1070.1	1274.8	1509.2	2039.7	2833.0	1042.6	1462.7	1004.2	1264.9	1175.0	1061.8
Jl-6m	40.6	61.1	55.5	69.6	83.2	100.4	949.8	1325.2	1299.3	1894.6	2543.8	2940.6	1512.5	1224.3	1358.7	2484.4	2421.9	2310.4
Jl-7m	53.8	49.7	50.5	65.2	65.9	80.3	1188.3	1177.2	1424.5	1617.8	2347.7	2860.9	472.1	444.4	393.8	626.9	807.5	765.2
Jl-8m	54.2	47.5	51.7	65.8	72.1	87.2	1365.5	1148.3	1350.5	1619.8	1947.6	2695.1	2049.2	1616.4	1458.1	2389.0	2741.9	2195.3
Jl-9m	36.8	53.1	59.4	57.8	70.9	76.2	1023.8	1393.6	1602.0	1688.9	2184.2	2859.3	288.9	324.3	335.8	417.2	465.1	428.1
Jl-10m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	1481.4	1404.4	1411.9	1769.2	3056.3	LD	575.5	502.2	576.4	643.5	709.9
Jl-11m	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	1339.2	1172.1	1373.6	1573.6	2644.8	LD	1675.3	1125.2	1039.7	1005.9	1742.4
Jl-12m	LD	51.9	42.5	52.1	55.7	67.7	LD	1567.6	1434.8	1211.6	1582.3	2396.8	LD	1985.4	1221.5	1107.6	1159.9	1528.3
Jl-13m	LD	46.7	49.6	45.6	57.6	68.9	LD	1341.2	1238.9	1456.7	1519.6	2397.2	LD	3687.2	2199.2	1927.2	2195.4	2891.6
Jl-14m	LD	51.3	45.5	50.7	61.5	70.8	LD	1267.0	1163.2	1281.2	1417.4	2279.5	LD	2177.4	1852.5	1101.6	1131.5	1436.5
Jl-15m	52.5	59.1	59.6	61.5	50.2	70.4	1566.6	1567.8	1544.2	1685.5	1492.2	2076.8	11266.0	2819.7	3538.3	1454.3	1588.4	1712.7
Jl-16m	LD	53.2	55.1	50.7	60.8	66.7	LD	1290.5	1411.1	1339.0	1751.5	2285.9	LD	2765.3	2045.5	1510.7	1447.4	2053.7
Jl-17m	LD	52.3	44.3	51.1	60.1	70.7	LD	1449.4	1172.7	1305.4	1600.8	2297.8	LD	3777.6	2476.4	2439.3	2281.2	3179.5

Tabla I (continuación).

Muestra	K					
	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm
JI-0m	31215.5	32972.7	32865.3	33557.3	32719.2	34467.7
JI-1m	34390.4	33114.5	35760.0	34881.1	34198.6	31815.3
JI-2m	31652.1	35981.6	37617.6	37311.2	37043.1	36754.1
JI-3m	31685.0	35416.6	33767.1	34352.2	34871.8	35356.9
JI-4m	31540.2	35428.3	34915.2	36590.5	35971.4	35831.8
JI-5m	34647.6	37198.7	34767.3	34767.8	36367.7	36922.2
JI-6m	31841.7	33975.2	36611.0	34651.4	34154.6	36978.3
JI-7m	33522.2	34089.3	35012.6	32236.3	38361.5	40741.5
JI-8m	33621.9	33142.9	34278.9	34649.8	32794.6	36327.7
JI-9m	38005.7	38050.2	37075.6	38730.3	41578.6	39982.8
JI-10m	LD	39753.5	41084.8	38410.9	38930.0	40629.6
JI-11m	LD	38368.2	39165.3	37857.4	39693.5	41039.7
JI-12m	LD	39883.6	37576.3	36517.6	36341.5	39950.6
JI-13m	LD	31314.5	32554.7	34616.4	35166.9	36231.4
JI-14m	LD	35653.6	36087.0	36741.2	35430.3	37340.5
JI-15m	30856.0	37111.6	37656.5	35871.2	36379.2	36435.6
JI-16m	LD	37685.1	37371.1	36531.8	34925.9	37782.0
JI-17m	LD	32178.5	32832.5	34824.4	34480.2	34974.3

Tabla II. Concentración elemental (ppm) obtenida para cada elemento por cada fracción granulométrica de la columna SI del muestreo de noviembre de 2014. LD= debajo del límite de detección.

Muestra	Mo						Zr						Sr					
	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm
S-1I-B	116.0	124.2	116.9	112.3	111.2	105.6	175.8	178.9	182.6	180.0	183.4	195.9	77.8	79.4	80.7	80.1	79.6	82.0
S-2I-B	LD	93.6	58.5	72.2	94.1	127.6	LD	148.4	147.4	140.8	148.4	254.3	LD	99.0	71.2	69.2	72.4	81.9
S-3I-B	LD	105.6	87.7	78.1	84.9	96.2	LD	178.2	169.0	165.1	176.7	206.9	LD	81.4	82.7	83.4	83.4	86.9
S-4I-B	LD	114.2	64.9	60.8	75.3	88.1	LD	161.2	144.3	139.4	173.5	223.9	LD	113.1	77.7	76.5	80.1	85.7
S-5I-B	LD	74.7	70.8	58.7	54.4	58.1	LD	170.4	165.0	167.8	168.6	189.9	LD	77.4	75.5	74.8	73.2	79.0
S-6I-B	LD	106.2	58.1	54.4	67.2	79.0	LD	163.8	149.6	149.3	175.6	244.8	LD	81.3	70.8	68.5	71.0	79.6
S-7I-B	LD	87.2	81.6	73.8	76.0	74.8	LD	168.1	167.0	161.6	169.9	184.4	LD	77.7	78.2	79.0	80.3	80.9
S-8I-B	LD	65.1	59.0	26.1	24.6	35.8	LD	166.4	150.2	131.8	135.0	223.8	LD	84.1	78.5	69.0	67.9	77.0

Tabla II (continuación).

Muestra	U						Rb						Pb					
	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm
S-1I-B	32.8	30.7	27.8	28.0	29.4	28.2	376.3	378.9	384.6	378.7	376.3	378.5	187.5	190.8	178.4	170.8	175.9	173.1
S-2I-B	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	302.1	300.8	295.4	296.7	292.0	LD	30.4	36.9	70.0	76.8	122.4
S-3I-B	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	352.0	328.1	322.7	324.0	327.5	LD	133.6	101.7	83.2	100.0	112.6
S-4I-B	LD	23.4	12.3	16.1	18.9	23.3	LD	307.7	288.6	290.1	293.1	297.6	LD	130.0	65.4	72.2	109.0	135.6
S-5I-B	LD	31.6	27.1	17.3	19.0	20.9	LD	340.4	327.3	324.8	316.8	324.1	LD	190.1	175.3	153.9	140.2	162.3
S-6I-B	LD	36.6	21.5	20.0	24.3	28.8	LD	323.4	301.2	296.0	298.8	297.1	LD	137.9	72.8	83.7	107.1	155.4
S-7I-B	LD	47.6	45.1	38.6	38.9	39.7	LD	360.3	345.4	338.7	347.9	338.9	LD	179.5	161.0	139.3	154.0	148.7
S-8I-B	LD	28.8	23.1	14.1	15.6	19.3	LD	315.2	294.9	286.6	285.3	283.3	LD	103.8	72.2	60.5	68.2	109.4

Tabla II (continuación).

Muestra	As						Zn						W					
	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm
S-11-B	39.5	37.7	41.0	38.6	37.4	34.3	524.0	523.7	504.2	488.4	481.9	461.9	272.4	285.0	265.8	270.3	263.1	260.5
S-21-B	LD	12.7	9.9	14.1	16.5	20.2	LD	127.9	109.6	117.9	141.6	158.4	LD	73.1	70.9	83.2	113.1	196.9
S-31-B	LD	29.1	23.1	20.8	21.9	25.1	LD	395.8	314.7	279.7	296.7	326.2	LD	223.3	181.2	158.3	175.5	209.5
S-41-B	LD	31.4	15.6	14.7	19.6	25.8	LD	397.8	215.9	220.8	267.9	289.3	LD	211.0	96.5	113.8	139.9	191.7
S-51-B	LD	39.5	30.8	22.1	22.3	26.2	LD	914.6	831.9	672.2	603.4	631.9	LD	281.9	273.7	214.0	218.0	238.5
S-61-B	LD	25.4	14.1	12.2	17.3	20.3	LD	259.0	150.4	151.9	172.3	182.0	LD	184.6	100.1	114.1	151.4	209.0
S-71-B	LD	27.4	24.5	25.4	24.1	25.1	LD	846.0	757.1	666.0	675.0	657.5	LD	268.3	246.2	224.9	225.5	229.5
S-81-B	LD	20.6	16.3	8.8	10.7	18.5	LD	197.2	152.2	118.2	120.0	138.9	LD	168.8	141.6	95.1	115.4	187.1

Tabla II (continuación).

Mues.	Cu						Fe						Mn					
	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm
S-11-B	4098.2	3977.8	3913.8	3700.4	3555.1	3399.7	34332.5	36471.4	33779.7	32619.6	32063.8	31095.0	460.7	455.7	384.7	384.0	380.1	370.3
S-21-B	LD	1016.6	745.7	820.8	1018.7	1243.3	LD	12682.8	9513.5	11502.6	13827.0	17177.9	LD	209.0	182.6	177.6	217.0	201.2
S-31-B	LD	3413.1	2638.9	2301.7	2470.3	2695.0	LD	29895.7	23092.8	20115.0	21810.3	24170.2	LD	421.2	300.6	283.1	282.2	276.0
S-41-B	LD	3042.8	1529.3	1493.0	1896.4	2015.2	LD	26033.6	13131.4	12903.3	16446.0	18638.1	LD	361.4	216.5	227.8	230.1	226.0
S-51-B	LD	7640.9	8053.5	6051.1	5053.0	4921.4	LD	27813.8	25549.2	20071.9	18300.5	19622.0	LD	611.8	579.0	419.0	409.7	410.3
S-61-B	LD	2541.4	1264.2	1209.6	1437.0	1576.0	LD	21348.0	11826.5	11491.5	13729.1	15665.2	LD	219.3	192.5	191.7	197.8	161.8
S-71-B	LD	6313.2	5646.1	4666.5	4462.2	4265.7	LD	23494.8	21392.8	19579.7	20135.3	19918.2	LD	568.7	505.0	452.7	415.9	437.4
S-81-B	LD	2409.0	2610.2	1176.3	1162.3	1518.4	LD	17724.9	16731.3	10257.0	10654.4	13646.8	LD	232.3	202.5	177.0	169.1	204.3

Tabla II (continuación).

Muestra	V						Ti						Ca					
	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm
S-11-B	58.6	65.4	66.4	72.9	69.2	69.6	1298	1333.4	1447.4	1458.2	1580.2	1671.2	584.1	628.6	834.2	886.9	764.7	783.1
S-21-B	LD	45.0	44.4	47.7	59.9	66.9	LD	1048.4	1569.6	1462.6	1877.1	3090.4	LD	752.7	659.4	703.7	748.8	1175.2
S-31-B	LD	61.9	73.9	57.5	60.0	75.5	LD	1574.6	1646.8	1647.7	1845.7	2135.5	LD	1571.2	1241.4	988.2	961.3	1165.0
S-41-B	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	1532.2	1344.6	1483.8	1921.4	2493.3	LD	2528.0	2540.1	2224.9	3716.7	3599.8
S-51-B	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	1286.6	1421.1	1613.1	1644.5	1904.5	LD	1912.7	3438.4	2540.9	2076.6	1739.6
S-61-B	LD	62.8	49.0	49.6	56.1	68.8	LD	1572.5	1275.9	1397.8	1833.9	2659.0	LD	1320.5	1270.8	933.6	1330.4	1615.3
S-71-B	LD	62.1	73.7	59.2	65.1	64.4	LD	1451.7	1552.8	1568.8	1550.4	1730.8	LD	1083.8	1757.1	1911.7	1649.1	1706.5
S-81-B	LD	58.5	59.5	46.7	50.2	64.3	LD	1432.8	1397.9	1191.5	1402.0	2248.9	LD	1051.1	956.5	797.7	778.6	1328.2

Tabla II (continuación).

Muestra	K					
	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm
S-11-B	41759.7	43678.3	45561.3	44286.3	45300.0	46015.2
S-21-B	LD	37088.6	37602.5	37822.7	37653.6	38750.2
S-31-B	LD	41575.0	43051.9	42255.6	40439.0	40773.4
S-41-B	LD	37685.6	36645.1	36160.0	35299.2	36462.6
S-51-B	LD	36117.4	38670.6	39843.9	37297.8	39604.9
S-61-B	LD	39468.2	37961.8	37118.3	36351.4	36110.1
S-71-B	LD	39373.9	39922.4	39120.4	39334.1	39112.4
S-81-B	LD	36375.6	34199.1	34047.3	33880.8	34177.3

Tabla III. Concentración elemental (ppm) obtenida para cada elemento en sales eflorescentes del muestreo de noviembre de 2014.

Muestra	Cu	Pb	As	Zn	Fe	Mn	Ca	K	Zr	Sr	Rb	V	Ti
S-11-A	79394.40	73.58	20.18	10570.69	24069.71	8470.14	11479.62	26234.64	56.84	43.98	162.16	51.00	906.07
S-21-B	1175.13	100.09	20.04	157.56	15728.80	261.77	888.93	38412.88	165.32	73.51	287.95	50.45	1856.32
S-31-A	46534.98	63.57	17.88	6949.76	19260.48	5069.54	4048.50	29365.59	101.96	62.02	212.69	49.22	1318.72
S-41-A	1515.52	78.70	13.31	201.76	13306.39	239.88	1186.57	37117.14	148.59	81.13	271.02	40.62	1369.10
S-51-A	64494.24	100.31	18.84	2802.32	19849.31	1899.33	12011.95	28993.73	97.66	66.27	213.02	54.43	1182.48
S-61-A	2050.06	115.68	23.83	220.39	15854.71	149.96	1371.86	39846.37	151.23	74.39	309.93	53.18	1340.36
S-71-A	78595.37	91.50	20.58	5917.28	21152.34	3852.01	9322.13	30324.53	86.50	70.22	212.01	57.58	1062.05
S-81-A	1201.39	64.85	12.22	118.35	9930.29	149.77	918.28	36053.42	138.56	67.95	261.15	37.13	1520.21

Tabla IV. Concentración elemental obtenida (ppm) para cada elemento por cada fracción granulométrica de la columna JI del muestreo de marzo 2015. LD= debajo del límite de detección.

Muestra	Mo						Zr						Sr					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
Jl-0m	52.5	95.6	115.6	158.9	229.0	319.5	144.3	146.9	135.1	130.8	161.1	192.2	59.4	63.1	65.8	65.0	71.3	80.7
Jl-1m	46.4	81.9	113.4	159.0	220.1	298.8	152.2	127.9	152.8	128.4	151.9	196.7	60.9	63.7	64.7	63.0	68.8	71.9
Jl-2m	293.5	102.3	138.0	202.8	282.6	407.3	135.4	147.0	135.8	135.4	150.9	187.0	70.1	74.7	66.5	66.3	77.4	80.1
Jl-3m	82.9	92.0	129.7	181.2	277.8	381.6	141.8	139.5	133.9	136.6	174.9	217.5	63.1	67.7	66.1	65.1	73.2	87.6
Jl-4m	61.3	79.3	103.1	133.4	193.6	285.5	145.1	144.5	137.3	140.9	178.2	216.2	59.8	59.8	60.5	57.8	62.2	73.9
Jl-5m	44.2	76.5	106.9	134.2	186.2	261.9	182.2	140.4	131.6	134.2	163.5	224.3	63.9	62.6	61.3	61.7	67.3	92.0
Jl-6m	48.8	79.3	99.9	135.2	205.7	306.8	141.3	141.4	139.9	130.8	154.6	211.2	73.8	62.8	60.9	58.4	60.4	74.8
Jl-7m	52.0	80.3	110.1	165.8	272.1	318.6	122.1	146.0	134.4	131.0	176.4	238.1	66.4	68.4	65.6	64.1	70.8	100.1
Jl-8m	65.3	79.8	119.3	164.1	244.5	308.7	146.6	137.7	131.3	132.2	158.4	252.5	60.5	68.5	63.1	60.3	69.1	82.7
Jl-9m	42.7	89.9	119.6	175.0	240.5	309.4	156.8	138.3	136.6	134.3	173.5	234.2	76.1	69.5	72.2	64.5	76.9	99.1
Jl-10m	LD	82.4	42.5	52.9	95.3	174.7	LD	141.0	126.6	127.9	158.6	326.1	LD	90.1	66.5	62.0	64.9	77.9
Jl-10m-A	LD	72.6	41.2	53.8	91.4	158.3	LD	141.3	134.3	127.5	141.8	305.2	LD	82.0	66.1	61.5	65.4	74.5
Jl-10m-B	LD	71.1	59.2	42.5	55.2	73.5	LD	155.4	150.7	131.6	163.8	260.6	LD	79.2	77.6	76.7	85.0	92.6
Jl-11m	LD	64.3	57.9	46.7	58.3	102.3	LD	144.0	133.0	130.6	145.7	283.0	LD	87.7	69.2	64.7	67.9	81.0
Jl-11m-A	LD	77.7	60.5	60.5	88.2	181.7	LD	136.0	132.8	127.5	155.8	268.0	LD	78.0	67.5	63.6	64.7	78.6
Jl-11m-B	LD	69.6	43.2	40.4	68.1	118.3	LD	184.1	131.2	129.6	139.9	270.7	LD	74.1	66.7	62.6	63.9	76.9
Jl-12m	LD	144.3	63.6	50.1	70.1	144.7	LD	170.2	130.0	120.7	149.9	248.0	LD	114.6	75.2	65.7	68.4	84.9
Jl-13m	LD	66.1	51.8	44.1	56.8	93.1	LD	147.2	130.6	123.4	149.2	255.0	LD	112.4	73.0	66.4	68.7	83.4
Jl-13m-A	LD	70.6	49.4	44.2	59.0	97.7	LD	152.3	132.0	125.5	151.8	275.6	LD	112.5	75.8	68.1	69.8	84.3
Jl-13m-B	LD	82.2	57.7	44.8	60.5	83.6	LD	169.0	148.3	133.4	157.4	308.4	LD	80.3	72.6	68.5	71.8	86.8
Jl-13m-C	LD	60.7	50.2	48.1	54.3	79.6	LD	157.1	137.0	133.2	143.6	253.0	LD	102.0	80.8	74.1	76.6	91.9
Jl-14m	LD	88.5	57.0	54.1	76.3	113.0	LD	157.4	135.1	126.8	162.7	264.1	LD	75.5	67.7	67.6	70.1	85.4
Jl-14m-A	LD	69.7	53.2	34.4	41.2	62.3	LD	168.9	146.9	126.0	143.0	249.6	LD	75.0	74.4	69.0	72.9	85.4
Jl-14m-B	LD	104.3	85.7	79.7	LD	LD	LD	162.2	153.2	151.0	LD	LD	LD	78.6	72.8	71.5	LD	LD
Jl-15m	LD	51.4	45.2	38.9	44.8	68.5	LD	160.2	140.3	132.1	154.8	239.6	LD	94.2	80.7	73.6	75.0	83.2
Jl-16m	LD	78.0	55.3	70.8	56.6	106.1	LD	146.0	147.8	169.4	131.5	249.4	LD	85.3	68.5	78.7	66.2	82.3

Jl-17m	LD	88.6	62.2	53.3	65.6	87.4	LD	164.6	139.5	133.8	154.3	237.8	LD	89.2	77.9	72.3	76.1	84.9
--------	----	------	------	------	------	------	----	-------	-------	-------	-------	-------	----	------	------	------	------	------

Tabla IV (continuación).

Muestra	U						Rb						Th					
	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm	500 μm	250 μm	125 μm	62 μm	44 μm	> 44 μm
Jl-0m	7.4	0.0	8.0	9.4	LD	11.3	231.8	216.7	213.4	212.6	222.2	234.8	13.1	15.5	17.7	20.0	22.9	29.8
Jl-1m	8.0	9.5	9.0	9.3	9.0	LD	243.3	218.1	206.9	203.9	215.8	215.3	14.5	14.7	16.6	19.6	24.3	25.7
Jl-2m	LD	9.9	10.2	11.4	LD	LD	240.7	225.8	213.9	213.3	232.0	226.1	13.0	15.4	15.7	18.1	21.2	25.4
Jl-3m	8.2	LD	8.5	8.1	LD	9.0	191.8	214.6	206.9	206.5	215.3	237.5	15.7	15.3	17.0	19.5	25.2	17.2
Jl-4m	8.4	9.0	8.7	7.0	LD	LD	203.5	216.9	216.2	211.1	234.0	276.5	14.9	15.4	17.0	16.9	22.5	14.6
Jl-5m	8.7	8.4	9.3	8.0	LD	LD	208.2	215.0	208.6	207.2	227.9	303.2	14.5	15.1	15.3	16.3	19.5	12.2
Jl-6m	8.1	7.8	12.8	14.8	17.1	16.4	227.1	211.1	206.6	206.2	209.6	268.0	11.8	13.6	14.5	15.9	19.4	10.8
Jl-7m	16.6	16.8	12.4	14.5	12.9	15.8	206.0	214.2	216.2	207.6	218.4	299.6	13.8	14.9	15.5	18.0	21.9	15.3
Jl-8m	15.4	19.2	19.0	22.4	11.5	10.8	220.2	219.2	206.9	205.2	221.9	255.2	12.7	12.6	15.8	19.3	19.6	12.4
Jl-9m	11.4	15.8	14.8	14.7	19.7	21.8	217.7	222.3	217.0	208.5	226.5	287.3	12.9	12.8	13.0	17.2	20.3	11.0
Jl-10m	LD	14.2	16.2	16.4	19.4	18.5	LD	236.9	214.6	213.5	216.9	255.4	LD	12.6	11.7	12.7	14.9	18.9
Jl-10m-A	LD	10.3	14.7	14.7	18.1	21.5	LD	241.3	216.6	214.6	224.4	247.4	LD	10.7	11.7	12.6	14.6	19.1
Jl-10m-B	LD	52.6	43.8	28.6	36.6	43.1	LD	255.7	240.5	229.4	222.4	226.8	LD	22.6	19.1	16.3	18.3	21.3
Jl-11m	LD	32.4	30.4	28.1	38.1	61.9	LD	233.9	225.2	224.9	226.5	225.3	LD	13.3	12.5	12.8	15.0	22.5
Jl-11m-A	LD	14.3	13.9	15.0	18.3	33.9	LD	227.7	223.4	220.9	221.0	228.4	LD	14.7	14.0	14.2	15.5	20.0
Jl-11m-B	LD	34.8	22.2	19.9	33.8	46.9	LD	230.0	222.3	223.6	222.1	226.1	LD	16.7	15.2	13.6	16.8	20.4
Jl-12m	LD	31.2	15.1	16.7	18.7	28.5	LD	284.5	217.7	218.7	220.5	228.8	LD	19.0	13.8	13.1	14.6	22.1
Jl-13m	LD	24.8	25.9	25.7	32.5	44.0	LD	219.9	218.2	216.7	215.1	223.3	LD	15.9	14.1	14.1	17.6	23.6
Jl-13m-A	LD	25.5	20.7	18.3	28.3	39.2	LD	232.0	224.4	224.2	226.9	231.9	LD	15.9	15.0	14.3	16.6	23.6
Jl-13m-B	LD	44.8	35.3	26.4	36.6	44.9	LD	273.7	233.0	222.7	222.0	216.4	LD	24.4	18.8	14.0	16.8	23.0
Jl-13m-C	LD	39.9	24.4	26.2	33.5	49.2	LD	239.3	226.3	223.6	225.9	225.7	LD	19.1	13.8	14.6	16.3	21.8
Jl-14m	LD	41.0	27.8	27.8	38.9	52.0	LD	252.3	225.7	230.8	231.3	252.5	LD	20.4	12.8	14.8	17.3	21.4
Jl-14m-A	LD	31.6	20.0	21.6	26.1	39.2	LD	266.0	235.1	226.4	230.5	226.7	LD	21.4	15.4	14.0	15.3	23.3
Jl-14m-B	LD	34.7	26.7	29.0	LD	LD	LD	277.3	262.0	256.7	LD	LD	LD	26.6	20.7	19.7	LD	LD

JI-15m	LD	42.6	26.3	24.9	27.5	45.7	LD	246.7	221.9	216.9	216.7	214.6	LD	24.0	19.7	17.1	18.3	27.3
JI-16m	LD	25.6	17.3	19.8	22.6	25.9	LD	239.6	228.4	280.9	226.4	251.6	LD	17.5	13.9	17.7	15.6	21.4
JI-17m	LD	52.9	31.1	29.7	36.0	51.1	LD	243.6	231.7	228.3	230.7	233.5	LD	20.9	15.5	14.1	17.8	21.2

Tabla IV (continuación).

Muestra	Pb						As						Zn					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
JI-0m	25.0	33.0	39.8	44.3	55.0	88.2	16.3	24.7	35.2	50.2	74.6	104.7	50.9	54.7	60.0	75.4	130.3	152.7
JI-1m	36.0	29.8	38.5	45.8	57.2	80.9	15.5	23.1	33.2	45.8	63.5	86.8	56.7	55.5	61.8	83.4	121.5	140.2
JI-2m	25.3	32.9	39.8	46.8	57.3	80.5	20.0	28.6	39.5	48.8	72.2	106.3	57.1	54.8	66.5	83.8	137.2	149.6
JI-3m	25.8	29.2	37.8	45.6	62.9	104.4	19.9	24.4	35.3	46.3	70.5	53.8	49.5	50.6	63.4	74.3	132.6	162.8
JI-4m	24.7	29.2	35.1	41.9	60.5	117.0	15.9	26.6	32.8	42.6	68.3	56.6	36.3	42.8	63.9	64.9	110.0	169.6
JI-5m	29.3	32.6	34.3	48.0	57.8	136.8	16.9	24.2	30.5	38.7	57.6	70.2	35.2	40.9	52.5	61.3	92.0	232.2
JI-6m	22.9	28.5	30.7	44.5	61.0	110.9	14.0	24.0	29.4	38.6	58.3	57.3	39.2	54.6	52.2	72.5	117.9	210.6
JI-7m	20.1	40.9	37.6	43.8	62.0	115.5	18.9	24.8	35.2	47.7	78.4	83.7	60.0	55.1	57.7	80.2	128.6	561.9
JI-8m	23.8	27.6	32.3	41.9	55.1	85.8	22.5	25.9	36.3	50.8	73.6	50.9	48.5	55.0	68.1	80.2	122.9	150.5
JI-9m	36.9	27.7	33.4	48.7	58.4	111.4	18.6	22.9	34.5	50.0	68.9	57.9	69.9	60.3	84.4	105.7	157.0	251.2
JI-10m	LD	43.1	47.6	49.5	88.6	151.6	LD	16.7	10.4	11.8	23.1	40.4	LD	98.7	79.2	96.2	118.5	186.1
JI-10m-A	LD	45.3	53.0	49.6	86.8	147.8	LD	15.1	10.0	13.5	18.9	36.9	LD	106.5	85.0	91.4	123.7	192.4
JI-10m-B	LD	212.8	155.8	95.2	136.2	196.7	LD	31.1	21.1	13.9	19.6	26.9	LD	497.4	382.6	260.5	312.6	390.4
JI-11m	LD	40.1	41.7	51.4	85.6	149.2	LD	10.5	8.9	10.0	11.8	23.7	LD	207.3	183.5	192.1	241.7	324.4
JI-11m-A	LD	39.6	37.8	46.0	73.3	160.9	LD	13.8	9.1	10.9	15.8	30.4	LD	278.3	260.6	280.7	340.1	503.5
JI-11m-B	LD	53.8	51.7	55.0	100.7	192.1	LD	16.2	14.5	9.3	13.7	23.3	LD	324.2	220.5	233.1	313.4	443.6
JI-12m	LD	138.8	51.8	57.2	101.5	185.8	LD	30.0	10.6	8.6	12.3	26.7	LD	275.6	115.1	114.2	140.8	212.1
JI-13m	LD	97.4	62.6	83.1	116.8	206.9	LD	14.6	10.8	12.8	13.7	25.3	LD	315.0	209.2	200.5	251.6	354.3
JI-13m-A	LD	95.8	43.0	60.8	103.8	198.0	LD	17.8	9.4	9.3	11.8	23.6	LD	334.8	189.8	192.9	233.0	324.5
JI-13m-B	LD	191.6	119.2	60.9	93.8	181.5	LD	29.4	22.9	11.5	16.6	23.4	LD	795.6	531.0	304.6	359.6	448.1
JI-13m-C	LD	142.0	55.3	63.3	109.2	187.4	LD	23.5	12.1	11.4	11.8	21.4	LD	429.1	208.0	190.0	220.5	309.6
JI-14m	LD	136.1	44.3	59.8	105.7	183.0	LD	24.6	12.6	11.8	16.6	28.6	LD	332.8	188.7	196.5	248.0	338.4

Jl-14m-A	LD	178.2	85.3	54.6	89.6	165.6	LD	27.9	14.5	9.8	12.8	21.4	LD	316.4	179.6	139.7	164.2	213.4
Jl-14m-B	LD	209.8	156.8	150.5	LD	LD	LD	38.9	27.2	26.7	LD	LD	LD	447.3	341.2	327.8	LD	LD
Jl-15m	LD	196.0	123.0	92.0	105.9	184.8	LD	26.2	19.7	14.2	16.7	31.0	LD	293.6	174.1	134.1	146.3	198.8
Jl-16m	LD	137.2	60.9	160.0	79.3	185.2	LD	23.4	11.9	25.6	13.7	30.0	LD	221.6	128.3	236.6	163.1	239.3
Jl-17m	LD	126.6	85.5	62.0	84.6	139.5	LD	27.8	20.1	14.1	15.1	26.1	LD	527.7	352.3	271.0	330.2	413.0

Tabla IV (continuación).

Muestra	Cu						Ni						Fe					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
Jl-0m	348.2	413.0	478.6	649.0	927.2	1348.8	49.8	44.6	37.9	28.2	21.1	LD	28951.9	35411.9	42360.6	56738.5	87300.8	137079.4
Jl-1m	411.5	388.8	521.8	709.3	980.8	1302.8	58.9	50.1	38.9	30.3	20.0	LD	40249.6	38703.7	48561.2	66206.2	97933.0	140186.8
Jl-2m	412.3	392.2	482.4	667.7	936.6	1241.8	50.6	42.6	43.3	29.0	17.6	LD	33879.2	37282.0	44555.8	61891.6	92288.3	133521.4
Jl-3m	284.3	372.5	478.2	633.8	943.9	1529.8	49.3	42.4	37.8	28.3	LD	LD	29172.7	35648.5	43766.9	59047.3	94177.4	130999.3
Jl-4m	284.4	341.9	421.9	546.8	823.5	1483.6	45.0	33.8	33.4	16.8	LD	LD	23396.0	26198.6	31744.4	40201.5	63799.4	107250.8
Jl-5m	250.1	325.8	426.5	515.2	732.8	2065.9	42.4	38.9	32.0	19.0	LD	LD	25180.0	28037.5	33034.8	41293.9	59498.5	146125.9
Jl-6m	276.3	371.8	411.0	541.9	834.4	1802.7	46.1	35.3	28.5	26.8	29.5	LD	24634.8	31013.3	31139.5	42163.3	68360.2	131760.4
Jl-7m	321.7	397.7	485.4	667.6	1072.7	3441.0	54.6	45.8	39.4	35.5	24.2	LD	28488.2	34943.3	41811.1	55326.2	96951.3	172174.2
Jl-8m	366.1	453.1	531.7	741.4	1070.1	1615.4	56.1	58.1	43.9	48.5	LD	LD	33455.1	40912.7	45118.9	62996.5	95039.7	123605.0
Jl-9m	468.4	526.5	678.5	906.3	1247.1	2371.9	48.0	43.5	40.9	28.2	17.5	LD	28380.4	31063.8	39910.3	52386.6	73429.2	123245.6
Jl-10m	LD	481.6	271.6	308.0	501.1	896.5	LD	LD	11.7	10.5	15.2	LD	LD	12805.6	7643.8	8081.9	12914.9	23206.5
Jl-10m-A	LD	532.0	361.0	421.4	626.9	1042.2	LD	LD	17.3	14.7	14.9	12.6	LD	11962.0	7711.1	9095.6	12902.0	22187.8
Jl-10m-B	LD	2377.0	1821.6	1158.9	1395.6	1799.6	LD	14.5	16.9	20.6	19.7	14.9	LD	27755.2	20147.0	14121.3	17724.6	24381.2
Jl-11m	LD	1032.0	746.3	794.1	1055.0	1621.8	LD	14.7	19.6	15.6	16.3	15.8	LD	10084.6	8510.7	9415.5	11943.6	18002.8
Jl-11m-A	LD	648.7	484.2	494.0	652.5	1167.6	LD	23.5	18.7	13.9	13.6	LD	LD	12182.3	10237.2	10366.8	13371.5	23379.3
Jl-11m-B	LD	1711.1	1021.5	972.5	1340.2	1999.3	LD	13.3	18.9	14.0	20.7	LD	LD	14235.7	10482.8	9622.8	13004.6	19215.7
Jl-12m	LD	1871.3	700.9	548.9	694.3	1231.6	LD	LD	16.1	14.6	23.8	LD	LD	24682.2	10757.2	9409.4	11904.8	21193.3
Jl-13m	LD	2065.3	1385.6	1285.6	1690.9	2543.1	LD	16.9	22.6	17.9	19.9	LD	LD	14402.9	10479.2	9625.5	12388.1	18229.2
Jl-13m-A	LD	1953.5	929.2	933.9	1206.7	1843.7	LD	11.8	18.2	16.5	20.4	14.2	LD	16528.8	9276.9	9183.3	11916.4	18338.2
Jl-13m-B	LD	3903.9	2631.7	1392.4	1747.3	2252.3	LD	16.3	21.3	18.1	19.1	18.3	LD	26050.2	18425.7	10789.0	13571.1	18840.5

Jl-13m-C	LD	2314.4	1156.8	1034.3	1195.1	1778.3	LD	23.1	15.8	19.8	17.8	16.8	LD	17999.6	10773.3	10181.3	11734.5	17779.3
Jl-14m	LD	2294.6	1267.0	1207.5	1579.1	2370.3	LD	19.1	21.2	16.4	21.3	LD	LD	22828.8	12114.3	11458.2	15631.9	24458.6
Jl-14m-A	LD	2270.0	1383.2	999.5	1332.7	1874.7	LD	12.2	12.3	19.3	17.6	17.9	LD	21628.2	14200.3	9996.0	12702.2	18068.2
Jl-14m-B	LD	3315.9	2531.2	2418.1	LD	LD	LD	14.4	17.9	16.4	LD	LD	LD	29966.6	22993.6	21852.3	LD	LD
Jl-15m	LD	2213.3	1366.8	1007.7	1097.6	1660.4	LD	14.9	14.4	18.9	18.0	14.1	LD	23112.6	15257.2	12042.6	13534.2	20349.0
Jl-16m	LD	1616.0	729.5	1431.1	836.8	1444.9	LD	19.8	16.3	0.0	17.0	LD	LD	18161.3	10318.6	18601.5	11666.1	19853.2
Jl-17m	LD	3877.9	2366.6	1868.8	2348.6	3112.8	LD	17.3	16.9	17.2	16.3	14.6	LD	27205.8	17592.4	13713.6	16184.0	21603.2

Tabla IV (continuación).

Muestra	Mn						V						Ti					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
Jl-0m	220.6	207.7	227.5	262.7	234.4	264.1	44.0	39.6	48.1	53.6	67.8	81.0	1317.4	1029.0	1220.9	1432.3	2225.7	2422.4
Jl-1m	230.0	240.7	230.8	263.3	255.0	266.4	45.6	41.7	55.7	52.2	64.5	77.8	1066.3	1133.1	1259.6	1323.3	2039.0	2535.8
Jl-2m	226.0	219.3	242.6	249.0	224.6	265.7	37.4	43.4	51.0	64.5	66.9	89.7	1548.5	1057.2	1363.7	1825.1	2326.4	2674.0
Jl-3m	206.3	222.7	241.5	226.2	252.6	131.3	33.8	39.8	48.0	55.2	61.1	77.5	829.6	1103.4	1342.6	1412.3	2440.3	2459.8
Jl-4m	200.0	196.6	200.1	184.7	164.6	124.0	40.0	41.4	45.4	46.6	59.2	65.3	1217.5	1077.4	1267.6	1440.2	2155.6	2021.3
Jl-5m	192.5	190.9	211.7	176.5	151.8	186.0	36.8	37.3	48.9	47.3	57.7	77.4	1179.8	1141.0	1268.9	1426.2	2022.7	2256.6
Jl-6m	208.8	186.8	166.2	179.4	201.9	117.0	33.7	38.4	42.0	51.9	60.6	67.6	864.1	947.8	1436.6	1588.7	2007.7	2168.6
Jl-7m	259.6	205.3	214.3	259.9	268.1	242.9	39.7	46.3	50.3	63.8	73.0	83.9	1156.5	1270.2	1058.8	1648.1	2277.1	2533.9
Jl-8m	220.5	245.3	228.4	266.1	212.2	119.0	38.7	45.2	45.9	57.3	72.7	86.0	970.9	1055.1	1255.4	1236.5	2429.5	2600.5
Jl-9m	205.8	234.8	250.5	245.4	294.0	225.9	46.3	46.0	50.2	59.7	71.2	77.2	1154.3	1287.9	1140.6	1519.1	2507.2	2691.8
Jl-10m	LD	145.3	172.6	167.1	190.5	207.2	LD	36.8	38.0	36.4	46.9	67.2	LD	900.9	1201.7	1175.0	2017.6	2866.6
Jl-10m-A	LD	153.0	185.8	173.2	206.6	238.3	LD	34.3	33.0	40.4	48.0	62.0	LD	898.7	1237.5	1328.1	1860.1	2801.2
Jl-10m-B	LD	467.0	421.1	361.2	378.1	446.7	LD	55.1	49.4	45.3	58.7	69.7	LD	1511.1	1348.9	1297.4	2202.1	2919.5
Jl-11m	LD	251.9	224.3	249.2	272.8	324.7	LD	44.6	36.6	45.3	47.2	62.4	LD	1308.6	1115.4	1243.6	1779.2	2867.3
Jl-11m-A	LD	304.2	315.4	348.4	384.5	501.5	LD	29.1	36.8	40.9	48.8	58.3	LD	1096.4	1009.3	1132.2	1661.0	2715.8
Jl-11m-B	LD	312.9	254.0	265.6	333.1	409.3	LD	37.7	37.7	38.2	43.8	57.2	LD	1084.8	1322.7	1046.0	1498.5	2784.8
Jl-12m	LD	667.0	230.0	201.2	225.5	274.2	LD	45.9	40.2	38.2	41.4	57.1	LD	1428.5	1318.2	1186.1	1610.4	2439.9
Jl-13m	LD	351.8	314.9	279.9	328.7	404.2	LD	44.0	36.4	38.3	48.2	60.0	LD	1403.8	1202.8	1145.5	1688.9	2594.3

JI-13m-A	LD	346.5	242.0	250.7	290.1	352.7	LD	47.8	40.9	39.2	47.1	65.4	LD	1343.6	1084.8	1320.2	1907.0	2752.2
JI-13m-B	LD	776.2	580.6	361.8	409.4	462.6	LD	58.4	55.7	41.7	45.7	66.2	LD	1588.0	1465.1	1205.2	1732.7	3049.2
JI-13m-C	LD	386.7	257.0	251.2	256.0	299.1	LD	47.2	44.1	39.8	47.5	66.1	LD	1452.4	1394.6	1298.3	1546.0	2699.1
JI-14m	LD	329.8	219.1	241.4	258.5	330.5	LD	57.6	42.1	42.3	53.5	66.3	LD	1604.2	1190.4	1254.9	1808.0	2621.4
JI-14m-A	LD	311.5	203.9	208.7	222.0	295.8	LD	54.3	46.7	39.1	46.1	58.9	LD	1634.0	1386.5	1151.3	1674.6	2715.4
JI-14m-B	LD	352.0	309.9	301.8	LD	LD	LD	54.1	60.3	60.1	LD	LD	LD	1226.1	1390.2	1482.7	LD	LD
JI-15m	LD	264.6	221.3	191.9	226.9	254.5	LD	51.3	48.1	46.0	49.1	59.3	LD	1443.5	1412.6	1217.2	1451.8	2521.7
JI-16m	LD	260.5	209.5	343.6	231.4	286.9	LD	44.0	40.7	47.0	48.2	59.4	LD	1133.8	1113.3	1272.0	1496.4	2378.4
JI-17m	LD	533.0	426.7	367.6	397.8	449.5	LD	48.9	50.1	46.0	53.2	57.7	LD	1375.2	1377.8	1269.3	1744.0	2531.6

Tabla IV (continuación).

Muestra	Ca						K						Te					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
JI-0m	1020.7	944.6	2270.2	1858.2	2280.8	1948.1	32372.6	32861.9	33734.9	34189.5	37939.4	36857.5	44.6	27.4	21.3	18.2	LD	LD
JI-1m	756.6	2106.5	5060.0	1217.7	1588.3	1616.4	33513.9	33447.0	32771.9	33456.3	36820.7	36550.5	53.1	35.5	27.5	32.3	LD	LD
JI-2m	841.7	838.3	835.9	1009.0	1244.3	1256.9	36489.4	37461.3	34568.3	35695.1	37528.4	38740.8	43.4	36.0	33.0	14.0	LD	LD
JI-3m	2432.1	4129.1	6199.2	6723.7	6400.3	4420.0	29527.3	33243.6	32691.5	34300.8	36041.1	36409.4	37.2	30.3	28.5	14.6	LD	LD
JI-4m	834.8	801.9	808.3	876.7	890.6	885.2	31947.3	34438.9	35228.1	34521.0	36924.1	36900.6	43.2	36.4	20.1	LD	LD	LD
JI-5m	985.1	2360.1	2422.8	2495.3	3044.5	2121.3	35559.7	33748.4	33850.4	34390.5	36149.5	40736.4	41.4	29.8	33.8	LD	LD	LD
JI-6m	1411.3	2497.8	3531.4	3281.8	4669.0	3677.5	34487.6	31052.4	32195.2	33860.3	34814.1	34708.6	43.8	35.1	17.6	LD	LD	LD
JI-7m	1087.2	1019.5	1033.3	1484.7	1561.9	1628.8	32139.7	33607.5	33699.6	33398.9	36196.5	39042.6	42.9	28.6	24.0	17.8	LD	LD
JI-8m	1171.5	1583.9	3282.6	2935.5	3430.3	2811.2	33463.4	32311.5	32659.5	34741.8	35511.8	38824.3	45.2	35.5	25.6	22.3	LD	LD
JI-9m	934.6	772.5	891.3	862.8	1218.6	1175.2	31323.2	35365.8	34439.1	31904.4	37198.1	38957.6	42.0	26.6	32.0	15.9	LD	LD
JI-10m	LD	982.4	1049.4	995.1	1127.2	1311.5	LD	37996.6	36413.1	35041.7	35480.2	40870.0	LD	LD	LD	17.1	14.4	LD
JI-10m-A	LD	947.2	847.9	890.5	1003.0	1114.9	LD	36211.3	36957.0	36244.1	37292.5	41142.8	LD	LD	22.4	16.1	13.4	LD
JI-10m-B	LD	1798.4	5407.9	1673.1	1921.8	2189.6	LD	37353.8	38362.9	38892.3	38798.5	39768.2	LD	LD	LD	23.5	15.2	LD
JI-11m	LD	1334.2	1111.8	1067.9	1271.2	1921.8	LD	38376.4	37511.6	36874.8	38273.0	39437.9	LD	LD	22.7	15.5	21.0	LD
JI-11m-A	LD	3665.5	1724.7	1361.7	1608.5	2988.6	LD	37961.7	37920.4	36987.3	35846.6	38312.8	LD	32.0	22.9	13.4	LD	LD
JI-11m-B	LD	1132.6	1077.5	1007.9	1354.9	1801.5	LD	36624.9	37160.0	36389.1	38178.6	38535.4	LD	LD	24.4	LD	16.9	LD

Jl-12m	LD	1356.4	1121.9	1150.3	1282.9	1920.8	LD	35830.1	36466.0	35744.5	36859.7	38343.2	LD	LD	LD	17.5	20.0	LD
Jl-13m	LD	1674.0	1389.1	1411.8	1469.6	2059.4	LD	35907.9	36118.3	35744.6	36040.5	37432.6	LD	12.4	28.3	20.0	18.1	LD
Jl-13m-A	LD	1461.7	1524.0	1087.2	1408.9	1872.8	LD	35732.2	36087.2	35429.6	38348.5	39664.8	LD	LD	18.3	14.4	14.4	LD
Jl-13m-B	LD	2622.1	3921.5	1913.2	1837.9	2421.7	LD	43157.3	40859.1	36646.7	36926.5	37819.8	LD	LD	24.4	16.2	19.5	LD
Jl-13m-C	LD	1479.8	1364.9	1318.9	1526.1	2028.1	LD	38022.3	39484.6	37838.4	38027.2	38049.7	LD	20.0	18.8	24.0	21.3	LD
Jl-14m	LD	1103.7	1131.3	1083.0	1270.6	1551.7	LD	42014.1	37747.7	36698.0	39611.1	40259.7	LD	14.0	23.6	14.0	19.9	LD
Jl-14m-A	LD	1423.8	1591.9	1125.4	1440.9	1809.4	LD	40284.9	39128.7	37013.0	38152.7	39173.6	LD	LD	LD	20.4	21.1	13.9
Jl-14m-B	LD	1343.0	1993.4	1819.6	LD	LD	LD	39609.5	43538.5	43585.5	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-15m	LD	2681.2	2600.3	1853.5	1793.8	2275.1	LD	35703.2	37418.4	35816.4	35607.6	35466.5	LD	LD	14.5	14.2	0.0	LD
Jl-16m	LD	1961.5	1559.7	1773.4	1538.8	2108.2	LD	37120.2	39439.8	40839.5	37842.0	39495.4	LD	LD	24.3	LD	20.6	LD
Jl-17m	LD	3631.5	2737.0	2076.3	2395.4	2395.4	LD	38877.2	40154.2	40682.6	39014.7	39819.0	LD	LD	15.8	26.1	16.6	LD

Tabla IV (continuación).

Muestra	Sn						Cd						Ag					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
Jl-0m	57.3	44.8	47.0	47.3	19.6	LD	LD	6.1	LD	6.3	LD	LD	6.6	8.4	10.9	15.1	18.2	21.3
Jl-1m	68.8	49.8	43.5	50.5	16.5	28.2	6.5	LD	LD	LD	LD	LD	7.6	9.0	12.0	15.2	18.0	23.3
Jl-2m	55.8	49.3	55.0	33.7	LD	17.9	5.8	LD	LD	6.6	LD	LD	6.2	9.0	9.9	14.5	17.0	25.7
Jl-3m	42.6	44.7	46.8	40.0	24.6	LD	5.9	LD	LD	6.5	LD	LD	5.8	8.4	10.4	14.2	18.3	22.6
Jl-4m	48.7	43.6	33.7	18.4	LD	LD	LD	LD	LD	9.0	LD	LD	7.1	9.0	10.4	15.7	19.9	24.4
Jl-5m	49.2	41.8	48.0	18.8	LD	LD	LD	5.8	LD	6.0	LD	LD	6.6	8.7	10.4	15.6	18.9	21.8
Jl-6m	50.5	41.3	28.0	19.1	15.4	LD	6.9	LD	LD	6.4	LD	LD	5.8	7.7	11.3	14.7	22.2	25.9
Jl-7m	52.8	43.3	39.5	40.2	15.4	LD	LD	LD	6.9	LD	8.6	LD	5.8	7.5	11.4	14.9	22.6	23.1
Jl-8m	57.3	47.9	41.1	47.5	LD	LD	LD	LD	5.8	LD	14.3	LD	5.6	8.7	12.2	15.5	18.9	21.0
Jl-9m	55.0	41.4	44.0	37.9	21.4	LD	LD	7.0	LD	LD	7.8	LD	6.6	7.0	9.9	14.6	19.2	20.3
Jl-10m	LD	LD	24.0	27.9	31.6	LD	LD	LD	7.0	7.4	6.0	LD	LD	LD	3.8	3.4	3.5	9.6
Jl-10m-A	LD	LD	32.7	26.4	31.6	12.8	LD	LD	LD	5.3	5.5	LD	LD	7.3	3.2	3.1	3.9	7.7
Jl-10m-B	LD	21.8	22.0	33.3	34.5	LD	LD	5.8	6.8	LD	LD	LD	LD	11.4	8.8	4.0	4.1	5.4
Jl-11m	LD	16.4	33.6	21.4	35.5	21.4	LD	LD	LD	LD	5.5	LD	LD	3.4	3.3	4.4	3.3	4.6

Jl-11m-A	LD	43.2	41.7	28.0	23.4	13.2	LD	5.6	LD	LD	5.6	LD	LD	4.5	4.2	3.3	4.4	5.3
Jl-11m-B	LD	23.0	32.9	22.6	33.4	LD	LD	LD	LD	5.6	LD	12.0	LD	5.8	4.6	4.3	3.4	5.5
Jl-12m	LD	LD	21.7	30.0	38.3	15.5	LD	LD	5.9	LD	LD	LD	LD	LD	5.3	3.1	3.4	7.0
Jl-13m	LD	33.4	46.0	34.8	42.2	19.3	LD	LD	LD	6.2	LD	LD	LD	4.7	4.7	LD	LD	4.8
Jl-13m-A	LD	12.3	30.5	28.7	33.8	13.0	LD	5.5	LD	LD	LD	LD	LD	6.1	3.7	3.0	3.9	3.7
Jl-13m-B	LD	20.3	41.0	30.3	36.8	21.1	LD	9.0	6.3	6.3	5.5	6.3	LD	9.5	4.6	3.3	3.3	4.9
Jl-13m-C	LD	35.4	27.3	33.9	42.5	11.1	LD	LD	5.6	LD	LD	8.8	LD	4.2	3.7	3.4	4.6	4.6
Jl-14m	LD	25.3	35.5	21.4	37.2	LD	LD	7.8	LD	LD	6.9	LD	LD	7.5	5.5	5.3	4.4	8.7
Jl-14m-A	LD	12.5	13.4	31.9	30.7	29.4	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	8.9	5.0	4.0	4.3	3.7
Jl-14m-B	LD	17.1	18.1	19.7	LD	LD	LD	8.5	LD	7.4	LD	LD	LD	12.2	11.6	9.7	LD	LD
Jl-15m	LD	17.1	27.2	30.3	26.6	17.7	LD	LD	LD	7.6	5.8	LD	LD	7.8	4.6	4.4	5.5	7.5
Jl-16m	LD	25.1	32.3	LD	34.5	LD	LD	5.9	LD	LD	LD	LD	LD	5.5	4.4	LD	3.9	7.8
Jl-17m	LD	26.7	47.4	45.4	40.7	32.5	LD	7.4	LD	LD	6.3	7.6	LD	8.8	5.7	6.2	5.3	9.9

Tabla IV (continuación).

Muestra	Nb						Bi					
	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	500 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
Jl-0m	10.0	9.4	10.5	12.4	16.5	17.4	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-1m	9.5	8.9	10.0	11.1	16.3	16.5	LD	LD	LD	5.1	LD	LD
Jl-2m	9.4	8.9	11.4	12.2	18.5	17.0	LD	LD	LD	LD	LD	6.5
Jl-3m	9.4	11.0	10.0	12.3	17.5	20.1	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-4m	9.9	9.7	11.7	13.5	19.4	22.5	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-5m	9.3	10.4	10.2	13.2	18.8	28.2	LD	LD	LD	LD	LD	8.0
Jl-6m	8.0	9.0	10.1	11.7	14.2	22.4	LD	LD	LD	LD	4.6	10.1
Jl-7m	7.7	10.2	9.8	12.3	16.6	28.0	LD	LD	LD	LD	LD	10.1
Jl-8m	7.9	8.8	10.0	9.9	17.9	21.6	LD	LD	4.0	4.9	LD	5.6
Jl-9m	9.0	9.7	10.0	11.2	14.7	23.2	LD	LD	LD	LD	LD	6.8
Jl-10m	LD	11.8	9.4	11.0	17.3	28.1	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-10m-A	LD	12.5	10.3	11.0	16.4	26.1	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-10m-B	LD	10.7	9.5	9.5	16.3	21.6	LD	LD	LD	LD	LD	4.6

Jl-11m	LD	10.3	8.8	10.0	13.2	24.1	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-11m-A	LD	10.4	10.3	11.9	15.6	23.2	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-11m-B	LD	11.4	10.0	11.0	13.1	23.5	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-12m	LD	18.5	10.0	10.5	13.7	22.2	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-13m	LD	10.1	11.2	10.0	13.6	22.7	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-13m-A	LD	11.0	8.3	11.0	12.5	22.4	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-13m-B	LD	11.6	9.5	10.2	13.8	26.0	LD	LD	LD	LD	LD	5.6
Jl-13m-C	LD	9.5	9.2	9.7	12.7	21.3	LD	LD	LD	LD	4.9	LD
Jl-14m	LD	11.4	10.1	9.1	14.2	22.5	LD	4.6	LD	LD	LD	LD
Jl-14m-A	LD	13.2	10.4	10.4	13.2	21.2	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-14m-B	LD	11.1	11.5	11.4	LD	LD	LD	5.2	LD	5.3	LD	LD
Jl-15m	LD	11.6	11.2	10.2	12.9	20.0	LD	7.3	LD	LD	LD	7.3
Jl-16m	LD	10.9	10.1	16.5	12.0	21.9	LD	LD	LD	LD	LD	LD
Jl-17m	LD	10.7	10.2	10.6	12.6	20.5	LD	LD	LD	LD	LD	LD

Tabla V. Concentración elemental obtenida para cada elemento por cada fracción granulométrica de la columna SI del muestreo de marzo 2015. LD= debajo del límite de detección.

Muestra	Mo					Zr					Sr					U				
	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
S-11-B	55.8	50.9	46.1	40.7	51.8	162.9	151.6	151.5	148.7	228.7	76.2	75.3	74.2	73.8	81.9	32.3	32.3	25.7	27.2	34.4
S-21-B	93.2	61.8	56.3	61.6	133.2	141.7	126.6	127.0	130.2	253.2	94.6	71.5	66.5	66.7	82.1	21.4	18.6	23.4	23.4	48.4
S-31-B	80.4	56.6	56.6	77.5	105.9	152.4	142.5	133.4	161.4	273.7	94.1	73.9	67.0	70.8	83.0	37.8	29.2	25.9	33.2	43.4
S-41-B	82.3	48.6	50.8	87.1	145.4	149.5	134.3	129.9	146.8	283.5	94.9	79.1	69.1	72.7	84.2	30.0	22.5	16.6	32.5	49.7
S-51-B	80.5	54.1	50.4	74.5	127.9	154.9	142.2	132.6	143.0	275.6	92.2	79.6	69.8	69.7	83.5	40.3	25.9	23.1	34.4	50.5
S-61-B	78.2	56.8	63.4	90.6	149.1	146.8	141.5	134.9	140.2	250.1	102.0	74.9	72.0	75.0	87.5	35.3	23.2	26.1	33.4	47.6
S-71-B	111.3	90.8	90.7	96.3	108.2	164.6	152.0	153.0	163.8	255.0	74.4	74.2	72.6	74.9	92.4	49.6	32.0	32.0	34.4	37.1
S-81-B	77.0	57.6	63.5	93.2	148.6	153.0	141.5	132.2	146.6	247.4	86.4	70.4	68.1	69.3	82.6	24.9	14.8	18.9	22.3	34.5
S-91-B	99.2	68.7	48.4	58.6	92.9	164.8	150.3	130.3	148.4	253.6	77.5	80.4	74.4	74.4	85.2	39.3	26.5	20.7	25.6	39.1
S-101-B	77.6	46.4	40.0	47.1	83.4	154.4	135.0	133.4	132.8	227.1	126.7	93.1	71.3	75.0	84.5	28.2	21.5	22.8	20.3	38.9
S-111-B	62.1	51.5	47.0	54.3	73.4	164.8	156.5	140.6	150.2	239.5	74.2	75.1	68.2	70.9	81.6	37.7	23.6	24.7	30.9	32.4

S-12I-B	110.4	58.4	67.5	51.0	93.6	167.3	140.4	159.0	135.9	256.3	77.6	72.5	70.9	68.0	78.4	52.2	29.1	30.3	27.1	47.9
S-13I-B	52.8	48.2	39.1	48.4	66.7	154.2	145.5	129.0	158.8	260.4	119.1	85.8	76.2	79.3	90.5	41.5	36.8	30.9	32.4	48.5

Tabla V (continuación).

Muestra	Rb					Th					Pb					As				
	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
S-1I-B	263.2	249.7	249.3	239.1	247.7	22.8	20.5	18.8	17.7	22.8	226.5	189.2	177.0	160.1	238.4	30.7	23.5	23.3	20.1	30.5
S-2I-B	219.3	219.3	219.8	220.5	223.6	13.5	12.8	12.9	14.1	18.3	39.8	41.6	44.9	63.7	147.0	15.5	6.7	7.7	11.2	24.6
S-3I-B	253.0	232.7	228.2	230.1	236.0	22.4	15.7	14.6	17.0	22.2	173.2	94.8	75.3	119.5	200.3	32.3	18.8	15.8	20.0	32.2
S-4I-B	239.6	232.4	228.2	228.3	227.2	18.4	13.3	13.1	17.2	22.1	89.9	37.0	51.9	72.8	154.3	16.4	11.0	10.3	18.9	29.3
S-5I-B	248.2	236.1	232.0	231.8	230.9	22.0	13.5	14.6	16.2	22.2	148.5	55.3	51.5	89.4	181.6	26.1	14.3	11.2	15.8	29.4
S-6I-B	229.6	231.5	227.7	230.0	233.7	18.3	13.0	13.8	15.8	20.3	107.9	48.2	45.9	67.3	128.3	24.3	11.6	12.2	17.4	26.8
S-7I-B	344.8	256.5	253.0	251.8	313.6	26.3	22.1	20.7	23.0	26.2	200.9	143.1	133.9	148.3	205.9	40.0	30.0	29.6	31.3	43.1
S-8I-B	242.9	234.3	229.3	230.3	232.2	18.2	14.7	15.2	17.6	22.0	118.3	43.7	52.0	90.9	160.7	24.7	13.9	12.6	20.0	30.7
S-9I-B	295.3	245.8	225.8	225.1	230.2	26.5	18.3	14.4	16.4	21.6	183.4	110.7	76.2	93.3	175.8	33.0	21.1	13.7	18.3	30.7
S-10I-B	214.8	216.5	220.8	224.0	221.7	16.1	13.2	13.8	13.3	21.4	77.7	43.4	52.0	61.8	159.8	21.8	9.7	11.9	13.9	28.3
S-11I-B	270.8	258.3	241.0	238.3	259.3	25.9	19.1	17.9	20.9	24.4	239.3	184.6	132.1	139.7	238.1	29.0	25.4	19.1	21.9	35.1
S-12I-B	263.6	235.7	241.7	229.5	234.8	26.8	18.0	17.4	15.9	22.1	226.4	104.7	133.6	93.7	189.0	50.0	23.3	25.0	17.0	32.3
S-13I-B	233.9	227.6	219.1	223.1	235.4	26.4	20.5	17.3	19.8	29.4	150.8	122.1	87.5	117.5	179.9	31.0	21.9	17.4	19.8	33.2

Tabla V (continuación).

Muestra	Zn					Cu					Ni					Fe				
	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
S-11-B	442. 4	368. 2	350. 2	322. 9	380. 6	2912. 9	2445. 4	2301. 7	2000. 8	2389. 9	15.0	15.9	13.0	17.6	LD	20533. 0	17092. 6	16553. 4	14261. 1	18403. 1
S-21-B	98.7	89.8	100.	109.	167.	1088.				1593.	22.2	18.6	15.1	15.8	14.2	11036.				16467.
S-31-B	426. 9	258. 6	225. 5	270. 6	335. 2	3193. 9	1867. 6	1566. 3	1974. 0	2515. 4	21.8	23.1	15.5	15.9	LD	22483. 2	14208. 7	12110. 8	15325. 3	21330. 2
S-41-B	152. 9	118. 8	128. 4	163. 1	207. 6	1658. 9	1047. 1	1030. 1	1501. 6	2208. 1	LD	22.2	14.8	17.0	18.4	13680. 7	10418. 1	10348. 9	14988. 6	23206. 7
S-51-B	280. 2	179. 9	131. 9	165. 3	225. 7	2336. 6	1351. 8	1018. 2	1404. 0	2083. 6	25.6	22.7	19.8	20.6	17.4	22597. 5	13764. 0	10701. 7	15017. 0	23353. 1
S-61-B	196. 7	102. 3	111. 8	130. 2	163. 2	1952. 9				1614. 3	30.3	19.2	22.5	19.8	12.2	21406. 3	11256. 8	11629. 5	15106. 0	21407. 8
S-71-B	532. 1	387. 2	364. 3	378. 6	444. 6	4802. 4	3458. 3	3292. 1	3347. 1	3819. 9	15.8	16.4	21.2	18.7	LD	32734. 0	24210. 2	22688. 8	23624. 3	29525. 4
S-81-B	193. 4	107. 3	118. 2	144. 0	192. 1	1712. 4				1569. 7	17.7	25.0	23.8	16.8	16.4	19422. 4	10689. 3	11457. 5	14337. 6	20545. 1
S-91-B	340. 5	233. 1	154. 3	169. 4	233. 3	2670. 6	1775. 6	1095. 2	1187. 4	1708. 0	18.1	17.4	19.3	18.0	13.4	28783. 6	19138. 0	11650. 0	13605. 9	20268. 9
S-101-B	298. 0	150. 0	127. 4	146. 9	215. 3	2417. 1	1112. 1			1455. 5	14.7	11.5	19.0	15.4	19.4	19966. 5	10185. 1		10848. 0	16956. 4
S-111-B	346. 2	272. 0	203. 5	208. 1	294. 8	2081. 7	1685. 8	1273. 8	1355. 0	1855. 5	16.1	13.1	18.8	15.4	LD	23433. 4	19410. 8	14264. 5	14949. 0	21401. 1
S-121-B	253. 5	142. 9	159. 0	136. 6	192. 7	2144. 3	1050. 9	1191. 7		1431. 1	18.2	16.5	11.8	22.4	14.5	27279. 1	13541. 4	15765. 6	11425. 0	18892. 6
S-131-B	410. 0	313. 0	217. 6	250. 9	346. 3	3064. 0	2449. 5	1621. 5	1909. 8	2749. 0	19.2	17.7	20.7	14.4	LD	21938. 7	18235. 8	13239. 1	15153. 6	21685. 1

Tabla V (continuación).

Muestra	Mn					V					Ti					Ca				
	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
S-11-B	377.0	362.1	353.7	304.9	335.5	51.3	51.4	54.0	51.3	60.6	1401.7	1550.7	1580.6	1532.1	2355.5	1969.2	1623.6	1442.9	1863.6	1917.3
S-21-B	219.8	228.6	171.7	221.2	238.6	37.7	38.3	38.4	44.6	56.1	1206.4	1249.4	1304.7	1252.6	2785.0	1274.3	985.0	1050.0	1040.3	1840.8
S-31-B	363.6	289.0	259.9	285.6	319.3	52.6	47.1	46.6	49.2	63.3	1424.0	1344.8	1367.3	1701.2	2824.9	931.0	1157.7	1380.2	1382.5	1527.8
S-41-B	261.6	206.0	176.8	258.6	292.4	42.6	45.8	42.6	48.6	62.7	1273.7	1367.0	1164.0	1829.9	2990.8	1425.1	1206.5	1088.8	1336.2	1935.5
S-51-B	298.1	239.0	212.7	219.7	263.1	51.3	43.5	39.6	44.4	64.0	1525.9	1214.1	1333.3	1666.8	2952.0	3079.3	1452.9	1386.0	1509.6	1831.7
S-61-B	246.8	224.7	193.4	225.7	225.5	47.5	41.6	43.4	50.2	59.6	1401.3	1341.5	1435.3	1664.2	3045.6	3976.2	2379.8	1577.1	1945.3	2358.1
S-71-B	425.7	373.0	349.4	354.3	387.3	64.1	51.9	52.6	53.6	60.0	1376.1	1387.5	1426.5	1687.6	2234.0	1338.5	2439.4	3309.8	4095.5	3851.9
S-81-B	284.3	227.0	202.1	238.2	265.2	44.2	40.4	40.0	46.7	63.4	1193.0	1420.8	1164.6	1786.9	2903.0	1154.0	1074.9	1075.6	1237.3	1569.1
S-91-B	350.0	254.6	211.4	204.7	245.6	55.0	52.0	40.0	48.1	57.5	1433.6	1412.6	1152.7	1657.6	2725.3	1349.6	1295.3	1113.3	1335.7	1636.6
S-101-B	244.0	168.2	185.1	192.6	250.0	41.9	38.6	41.9	45.4	54.8	1403.3	1191.1	1289.1	1516.2	2515.0	1803.9	1257.3	1078.7	1374.3	1799.5
S-111-B	342.0	260.1	256.8	249.6	260.0	54.6	52.5	48.9	50.5	56.0	1428.4	1564.8	1323.2	1586.7	2252.5	1438.5	1415.6	2399.5	2919.5	3368.5
S-121-B	293.1	224.1	199.2	208.9	237.7	55.3	43.2	47.1	46.7	62.6	1554.1	1225.9	1549.9	1483.9	2580.7	1528.1	1299.0	1442.7	1549.7	2087.0
S-131-B	396.1	438.6	282.6	313.8	382.2	50.1	55.6	43.0	54.1	67.1	1534.8	1572.4	1360.5	1704.6	2567.6	2826.7	3838.8	2770.7	2996.5	3902.3

Muestra	K					Te					Sn					Cd				
	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
S-11-B	40169.9	41248.3	39825.6	39756.3	40659.5	LD	LD	LD	16.8	LD	19.5	17.2	LD	32.2	LD	7.3	LD	LD	LD	LD
S-21-B	36947.0	36384.7	35969.3	37103.8	37721.5	27.3	22.6	21.0	22.9	LD	31.2	31.7	35.5	38.5	13.6	LD	LD	LD	LD	LD
S-31-B	41640.9	41101.7	39298.5	39513.6	39420.3	14.1	19.2	20.4	15.0	LD	31.9	34.5	33.4	31.9	LD	6.6	LD	LD	6.1	LD
S-41-B	36365.0	40506.4	36905.8	39590.4	38949.7	LD	24.7	19.8	25.7	LD	LD	40.2	24.7	44.7	25.9	LD	LD	LD	LD	LD

S-5I-B	41314.6	43627.5	39783.9	40825.5	39955.4	22.9	26.3	23.2	22.2	LD	42.0	39.2	38.7	39.8	11.9	LD	5.5	LD	LD	7.6
S-6I-B	38472.6	39202.7	39005.4	39678.7	41454.0	23.2	19.1	24.6	17.1	LD	34.0	35.5	39.6	38.4	15.6	LD	LD	LD	6.0	LD
S-7I-B	42848.8	43863.2	42714.4	42930.7	41604.9	LD	31.1	LD	LD	LD	30.0	LD	19.4	15.0	LD	LD	6.6	LD	LD	LD
S-8I-B	40302.2	41297.2	40452.0	39764.2	40239.6	27.4	33.4	31.2	22.5	LD	40.9	46.1	43.1	39.5	20.0	LD	LD	LD	LD	LD
S-9I-B	42448.5	42372.2	39252.6	37418.0	38448.5	LD	15.3	18.3	21.1	LD	25.8	25.8	33.3	35.8	23.4	7.1	5.8	LD	LD	LD
S-10I-B	34912.0	36145.7	36375.9	36299.4	37328.5	0.0	13.9	16.4	LD	LD	LD	22.9	31.5	28.4	24.7	9.1	LD	6.5	LD	LD
S-11I-B	41410.6	44198.2	41488.1	39038.6	43448.1	16.4	LD	18.0	13.6	LD	29.1	12.9	38.0	33.0	LD	6.4	LD	LD	LD	LD
S-12I-B	41484.7	40585.0	39836.0	38184.3	39784.8	LD	20.8	LD	20.8	LD	29.2	32.7	10.7	33.4	27.9	LD	LD	LD	LD	LD
S-13I-B	36159.8	37971.8	35773.7	36969.1	39392.9	LD	20.9	17.1	LD	LD	22.1	39.0	32.6	22.3	LD	6.7	LD	LD	LD	LD

Tabla V (continuación).

Muestra	Ag					Nb					Bi				
	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm	250 µm	125 µm	62 µm	44 µm	> 44 µm
S-1I-B	6.9	6.2	5.5	5.7	8.1	13.4	13.5	13.5	12.9	19.4	LD	LD	LD	LD	LD
S-2I-B	4.1	3.1	LD	LD	3.6	10.4	9.0	10.8	11.0	23.2	LD	LD	LD	LD	LD
S-3I-B	8.0	5.7	5.2	5.7	8.6	10.0	10.3	10.3	13.6	22.6	6.1	LD	LD	LD	4.8
S-4I-B	8.1	4.6	3.6	5.1	6.6	10.8	9.2	10.7	13.8	23.9	5.6	LD	LD	LD	LD
S-5I-B	6.6	4.6	4.2	3.6	7.1	9.0	9.1	10.7	12.8	23.7	LD	LD	LD	LD	LD
S-6I-B	8.1	3.8	6.3	4.0	7.2	8.7	10.2	10.4	12.4	21.3	LD	LD	LD	LD	LD
S-7I-B	14.4	10.6	10.0	11.4	LD	10.7	12.0	11.5	13.1	24.7	6.9	LD	LD	LD	LD
S-8I-B	5.8	5.2	5.6	4.7	6.2	8.8	10.0	10.7	15.0	21.9	LD	LD	LD	LD	LD
S-9I-B	11.6	7.7	4.2	5.4	8.8	11.1	10.6	10.2	13.5	21.5	6.9	4.5	LD	LD	4.9
S-10I-B	6.2	3.8	3.6	3.9	7.9	9.8	9.7	11.1	11.3	20.4	LD	LD	LD	LD	LD
S-11I-B	9.9	8.0	5.6	6.0	10.6	11.7	12.3	11.3	12.3	21.3	6.6	4.4	LD	LD	LD
S-12I-B	12.3	6.3	8.0	5.2	9.0	11.8	10.3	11.9	12.1	21.1	6.7	5.4	LD	LD	LD
S-13I-B	6.0	4.7	3.8	5.2	8.6	10.2	10.4	10.2	13.4	20.0	6.4	5.3	LD	6.0	7.9

Tabla VI. Concentración elemental (ppm) obtenida para cada elemento en sales eflorescentes del muestreo de noviembre de 2014. LD= debajo del límite de detección.

Sample	S-11-A	S-21-A	S-31-A	S-41-A	S-51-A	S-61-A	S-71-A	S-81-A	S-91-A	S-101-A	S-111-A	S-121-A	S-131-A
Mo	37.3	72.4	47.5	67.4	48.5	71.6	35.7	73.5	42.3	65.9	31.2	58.7	38.1
Zr	121.5	172.2	102.8	146.7	97.1	156.4	78.9	147.7	82.9	150.9	86.9	164.4	85.6
Sr	62.6	74.3	50.2	72.9	46.3	74.0	39.8	76.8	40.4	80.0	47.3	72.3	74.8
U	108.5	32.1	122.7	22.4	138.8	28.1	112.2	23.7	83.0	24.4	132.0	28.8	129.1
Rb	192.4	234.1	146.7	231.7	151.9	236.7	118.5	231.9	129.6	227.3	130.8	237.4	132.2
Th	15.1	17.9	9.2	14.0	9.7	16.4	5.6	18.1	7.0	18.0	6.9	18.4	8.9
Pb	141.1	108.0	78.1	59.0	73.1	99.2	66.1	95.3	67.4	106.8	76.0	122.6	69.3
As	21.6	19.9	15.6	14.8	18.0	19.2	11.9	19.4	16.1	19.0	10.8	19.5	12.5
Zn	4516.8	165.1	6534.0	140.6	10915.3	276.4	8102.6	156.4	11191.6	163.3	10116.9	199.3	8837.8
Cu	33574.0	1402.1	100883.4	1256.0	85243.9	2702.0	142915.6	1173.0	131108.3	1213.9	96963.8	1396.4	102998.0
Ni	LD	18.6	LD	20.1	LD	15.9	LD	28.5	LD	24.9	LD	16.5	LD
Fe	18085.0	15980.4	22671.4	12416.0	21816.2	16894.0	20013.4	14435.4	25452.7	15163.2	16648.7	14175.7	18308.5
Mn	3547.5	351.0	4174.0	207.6	6730.7	465.2	5098.4	312.5	5647.0	294.1	6351.9	326.0	5165.0
V	52.6	48.8	43.5	51.9	43.4	57.6	45.6	48.4	45.6	48.3	39.1	54.4	45.5
Ti	1389.4	2136.9	1112.4	1601.9	1034.5	1619.3	836.9	1723.5	933.4	1910.8	930.8	1626.8	1075.7
Ca	4537.3	1362.1	6535.3	1226.9	5730.8	1556.9	7112.0	1375.5	6007.8	1395.2	5707.4	1696.7	19236.6
K	35758.9	40808.4	30163.3	41794.0	29704.7	41376.3	24043.9	40032.6	27000.5	38755.1	25314.8	40000.8	26517.3
Te	13.8	19.5	LD	LD	LD	LD	LD	17.6	LD	15.6	LD	LD	LD
Sn	29.8	37.5	LD	19.4	LD	24.5	LD	39.9	LD	28.5	LD	22.5	LD
Cd	15.0	LD	17.2	6.7	27.1	6.0	19.2	LD	21.9	LD	26.9	5.6	25.4
Ag	5.8	6.4	7.8	4.4	6.5	6.0	7.1	5.9	8.4	5.5	7.1	6.9	6.1
Nb	7.3	13.5	5.8	12.6	5.3	11.7	4.6	12.2	6.2	12.2	5.3	11.5	5.1