



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

Ciencias Ambientales y Riesgos

**“EVALUACIÓN DEL DESARROLLO DE PROCESOS PEDOGENÉTICOS SOBRE JALES
MINEROS DE CANANEA, EN SONORA, EXPUESTO A DESCARGAS DE AGUA
RESIDUAL”**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

ERICK LÓPEZ MENDOZA

JURADO EXAMINADOR:

Dr. Sergey Sedov (Tutor), Instituto de Geología
Dr. Francisco Martín Romero, Instituto de Geología
Dra. Christina Siebe Grabach, Instituto de Geología
Dra. Blanca González Méndez, Estación Regional del Noroeste
Dr. Bruno Manuel Chávez Vergara, Instituto de Geología

Ciudad de México, marzo 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Ciudad de México, diciembre de 2021.



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 está 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.

The logo consists of a dark blue rounded rectangle with two thin yellow horizontal lines, one near the top and one near the bottom. The text is centered in white, uppercase letters.

CÓDIGO DE ÉTICA DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

“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”.

AGRADECIMIENTOS.

Al CONACYT por la beca otorgada que me permitió desarrollar mis actividades de Maestría.

Al Instituto de Geología de la UNAM por abrirme las puertas para aprender temas apasionantes y trascendentales.

Al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) por permitirme hacer uso de sus instalaciones y llevar a cabo diversos análisis.

Al taller de laminación del Instituto de Geología por brindarme el espacio y los recursos para realizar las secciones delgadas.

Al Dr. Sergey Sedov por ser mi tutor y el principal apoyo técnico. Sus conocimientos, todo su apoyo y amistad han sido invaluable. Sin su ayuda este trabajo no existiría.

Al Dr. Francisco Martín Romero por formar parte de mi comité tutorial, por hacerme partícipe del proyecto y ayudarme a desarrollar todas las actividades relacionadas con este. Y por brindarme apoyo en otras actividades que me permitieron continuar con mis estudios.

A la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo por proporcionarme la oportunidad para incorporarme a su grupo de trabajo y realizar diversas actividades y continuar con mis estudios. Por presionarme y confiar en mí en los momentos más difíciles.

A la Dra. Christina D. Siebe Grabach por ser parte de mi comité tutorial. Sus puntos de vista me ayudaron a comprender ideas complementarias y enriquecedoras.

Al Dr. Bruno Chávez Vergara por ser parte de mis sinodales. Por su constante apoyo técnico y votos de confianza para concluir con mi trabajo. Sus comentarios me ayudaron a mejorar mi trabajo.

A la Dra. Blanca González Méndez por ser parte de mi comité tutorial y brindarme su apoyo y conocimiento técnico para enriquecer y mejorar mi trabajo.

Al Mtro. Jaime Díaz Ortega, por ser uno de mis principales apoyos técnicos, sin el cual este trabajo no habría sido posible. Gracias por todo tu apoyo en el diseño experimental, en actividades de campo, en los análisis de laboratorio, en la elaboración de secciones delgadas y en la revisión de este documento. Gracias Jaime por todo tu apoyo.

Al Dr. Luis Gerardo Martínez Jardines por su apoyo en la coordinación de actividades de campo y por su disposición para realizar análisis de laboratorio. Y por incluirme en diversas actividades que me permitieron continuar con mi proyecto.

Al Ing. Daniel García por todo su apoyo durante las actividades de campo en Buenavista del Cobre. Por brindar todas las condiciones necesarias para llevar a cabo estos trabajos.

A la Quim. Astrid A. Vázquez Salgado por todo su apoyo en el análisis con la técnica de fluorescencia de rayos X.

A la Dra. M. Yazmín Rivera Uría por proporcionarme bibliografía relacionada con mi tema de estudio. Y por todo su apoyo en actividades que me permitieron continuar con mis estudios.

A la Dra. Teresa Pi Puig por su apoyo en el análisis con la técnica de difracción de rayos X.

A la M. en C. Alicia Santana Silva por su apoyo en las actividades de laboratorio y análisis químicos.

A la Quim. Jessica Anaid Cano por su apoyo durante los análisis químicos y actividades de laboratorio.

Al Quim. Inés Ramos Bautista por su apoyo y explicación para el uso de equipos de laboratorio.

Al M. en C. Óscar Eduardo Valdez Comparan por su apoyo y explicación para el uso de equipos de laboratorio.

A todo el personal de Buenavista del Cobre que directa o indirectamente me ayudaron a realizar las actividades o me facilitaron las cosas para llevarlas a cabo.

A todos aquellos que me brindaron su apoyo durante mis actividades en el Instituto de Geología.

A mis amigos y compañeros del Instituto de Geología por el apoyo que me proporcionaron durante mis actividades y clases.

A todos aquellos a los que sin quererlo haya olvidado mencionar.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES.

Al equipo liderado por la Dra. Solleiro-Rebolledo y el Dr. Sedov, por permitir mi incorporación a su dinámica de trabajo. Por su comprensión y su empatía en un momento complicado. Todos han sido tan amistosos conmigo y me han ayudado en innumerables ocasiones. Han sido de lo mejor conmigo.

A mi tutor, el Dr. Sergey Sedov, quién me ha brindado todo su apoyo, conocimientos y amistad. Siempre ha sido una excelente persona conmigo. En todo momento mostrando su empatía y atención, ofreciendo su ayuda en toda ocasión. Sin usted habría sido imposible lograr esto. No habrá algo que yo pueda hacer para agradecerle todo lo que usted ha hecho por mí. Su aporte en mi formación es inmenso. Siempre tendrá un amigo en mí. Por favor manténgase como el profesional y caballero que es, con ese ánimo de formador tan dedicado que tiene. Espero poder compartir muchas más cosas con usted, profesionales y también en ánimo de festejo. Gracias por todo Dr. Sergey Sedov.

A la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo. Gracias a usted he tenido la oportunidad de realizar esto. Siempre brindándome su confianza y amistad. Usted fue mi puerta de entrada al grupo de trabajo y una de las razones por las que este siempre estuvo en mi mente. Le agradezco también por la presión constante y por sus palabras sinceras cuando más se necesitan. Su amistad y las oportunidades brindadas me permitieron terminar este trabajo cuando todo parecía imposible. Ojalá en algún momento pueda hacer por usted algo similar a lo que me ha obsequiado con su presencia y ayuda. Por favor continúe siendo de esta forma, conserve esa alegría por el trabajo de campo, por las actividades complementarias y por trabajar con estudiantes. Usted inspira y contagia esas ganas por mejorar y ser activo en esta disciplina imprescindible y apasionante. Gracias Dra. Elizabeth Solleiro.

Al Mtro. Jaime Díaz Ortega. Una excelente persona y un extraordinario profesional. Jaime, sin tu ayuda, sin tus conocimientos, sin tu tiempo, sin tu esfuerzo y sin tu dedicación este trabajo no existiría. Me ayudaste en todo y estaré en deuda contigo por siempre. Contar contigo como parte del equipo es una ventaja. Un imprescindible y determinante en todas las labores. Ni todas las palabras pueden expresar lo valioso de tu apoyo para mí. Estoy seguro de que impactarás considerablemente en estas y en generaciones futuras de los estudiantes asociados al Instituto de Geología de la UNAM. Continúa así porque todo lo que puedes aportar es inmenso. Todas las actividades son más sencillas contigo y todos los momentos son más graciosos también. Gracias totales, Jaime.

Al Dr. Francisco Martín Romero. Le agradezco su gentileza y empatía al permitir mi incorporación al trabajo en uno de sus proyectos. En las condiciones más adversas y con el tiempo corto, usted supo proveer los elementos para realizar este trabajo. Su apoyo técnico y sus revisiones permitieron establecer elementos de calidad. Además me ha brindado la confianza y amistad para colaborar más ampliamente en otras actividades relacionadas con el proyecto. No tengo forma de agradecer todo lo que ha hecho por mí y las oportunidades que me ha facilitado.

Al Dr. Luis Gerardo Martínez Jardines. Le agradezco por su enorme disposición y apoyo en la coordinación de las actividades de campo. Fue muy fácil trabajar en las condiciones

establecidas y con su disposición para apoyar en lo que se requería. El trabajo en el laboratorio y los talleres fue muy sencillo al contar con su ayuda. También me ha proporcionado su apoyo y amistad en otras actividades, sin las cuales habría sido difícil terminar este trabajo.

A todos los miembros de mi comité y sinodales. Por darme un poco de su tiempo y conocimientos. Con cada comentario me ayudaron a centrar mis ideas. Sin su apoyo me habría resultado imposible entregar un documento con una buena calidad. Sé que algo de lo mucho que me compartieron se queda conmigo y deseo poder utilizar ese conocimiento en beneficio de lo más importante: la salud del suelo y la divulgación a la sociedad.

A Paulina. Me has enseñado que debo y puedo mejorar, a ser crítico conmigo, a reconocer mis carencias, equivocaciones y mucho más. Cosas invaluable y que espero poder mejorar día a día. Y también por estar conmigo en mis momentos más lúgubres y aterradores. Por animarme y ayudarme a confiar en mi capacidad. Por soportarme. Y también por compartir mis intereses, por el simple hecho de pasar tiempo conmigo y conocerme un poco más. Siempre estaré agradecido contigo por infinidad de cosas.

A mamá y papá. Todo lo que han hecho por mí es absolutamente invaluable. Me proporcionaron una oportunidad más cuando todo parecía inalcanzable y las cosas se derrumbaban. Evidentemente siempre he estado en deuda con ustedes y espero poder corresponderles en algún momento. Nuevamente les agradezco por brindarme sus genes, es lo que me ha permitido desarrollar todo lo que me gusta y ser resistente. Gracias, mamá y papá, en estas líneas jamás podré expresar lo mucho que significan para mí. Pero ustedes lo saben, siempre han estado y estarán en mi corazón y en mis pensamientos.

A mis hermanos porque quizá sin saberlo me ayudan a querer ser mejor. Los quiero y espero podamos compartir mucho más. Por si fuera poco, siempre puedo contar con ustedes. Muchas gracias.

A todos los amigos y compañeros que estuvieron cerca en cada ocasión. Gracias por su apoyo y sus palabras de aliento. Las clases fueron mejores con ustedes.

A todos quienes confiaron en mí, gracias por sus palabras de aliento.

A cualquier persona que me haya brindado su apoyo y que por descuido no haya mencionado.

"I know fear is an obstacle for some people, but it is an illusion to me. Failure always made me try harder next time."

MJ

"Things won't go perfect. It's all about how you adapt from those things and learn from mistakes."

MP

"Things don't correct themselves, you've got to go out there and work hard to correct them."

TB

"I know what I can do so it doesn't bother me what other people think or their opinion on the situation."

UB

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema	5
1.2 Justificación.....	5
1.3 Hipótesis	6
1.4 Objetivos	6
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Explotación minera.....	8
2.1.1 Procesos geoquímicos que generan acidez	9
2.2 Atenuación natural por reacciones de carbonatos y silicatos.....	12
2.3 Drenajes Ácidos de Mina	14
2.3.1 Problemática de los drenajes ácidos de mina	15
2.4 Estrategias de remediación biológica.....	16
2.4.1 Tecnología pasiva	17
2.4.1.1 Humedales aerobios	17
2.4.1.2 Humedales anaerobios.....	18
2.5 Importancia del estudio de estos suelos en jales mineros.....	19
2.6 Aguas residuales	19
2.6.1 Contenido orgánico de las aguas residuales	20
2.6.2 Materia inorgánica.....	21
2.6.3 Nutrientes.....	21
2.6.4 Otros contaminantes de las aguas residuales	21
3. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	22
3.1 Localización.....	22
3.2 Reseña histórica	23
3.3 Geología.....	24
3.4 Fisiografía	25
3.5 Hidrografía	27
3.6 Edafología.....	28
3.7 Clima y vegetación	29
3.8 Proceso de beneficio.....	31

3.8.1	Riesgo asociado al proceso de beneficio	32
3.8.1.1	Estudio de caso en la zona.....	32
3.9	Características reportadas de los jales de la Presa No. 3.....	35
3.9.1	Valores de pH y pronóstico de movilidad de los EPTs.....	37
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	38
4.1	Plan de trabajo.....	38
4.2	Selección de perfiles de suelo	38
4.2.1	Muestreo	38
4.3	Preparación de las muestras.....	42
4.3.1	Muestras alteradas.....	42
4.3.2	Muestras inalteradas.....	42
4.4	Análisis de laboratorio.....	42
4.4.1	Parámetros fisicoquímicos (determinación de pH y CE).....	42
4.4.2	Análisis textural.....	43
4.4.3	Color	43
4.4.4	Concentraciones totales por FRX	44
4.5	Difracción de Rayos X (DRX)	45
4.5.1	Procedimiento para la obtención de difractogramas.....	45
4.5.2	Mineralogía total y mineralogía de arcillas	45
4.5.3	Muestras de arcilla orientada.....	46
4.6	Análisis de fertilidad de suelos	47
4.7	Micromorfología	48
4.7.1	Elaboración de secciones delgadas y análisis micromorfológico	48
5.	RESULTADOS.....	49
5.1	Estudios morfológicos de campo	49
5.1.1	Perfil PA-01.....	50
5.1.2	Perfil PB-01.....	51
5.1.3	Perfil PC-01	52
5.1.4	Perfil PE-01.....	53
5.1.5	Perfil PSN PA.....	54
5.1.6	Perfil PSN PB.....	55
5.2	Secciones delgadas y análisis micromorfológico	56

5.2.1	Micromorfología en los perfiles de la presa de jales No. 3	56
5.2.2	Micromorfología en el suelo de la isla en la presa de jales No. 3.....	61
5.2.3	Micromorfología en suelos naturales en interior de la zona minera.....	62
5.3	Parámetros fisicoquímicos	66
5.3.1	pH y conductividad eléctrica (CE).....	66
5.3.2	Cationes intercambiables	67
5.3.3	Materia orgánica y elementos nutritivos	68
5.3.3.1	Perfiles PA01 y PA02.....	69
5.3.3.2	Perfiles PB01 y PB02.....	70
5.3.3.3	Perfiles PC01 y PD02	71
5.3.3.4	Perfil de suelo natural PSN.....	72
5.3.4	Color	73
5.3.4.1	Perfil PA – 01	73
5.3.4.2	Perfil PB-01.....	73
5.3.4.3	Perfil PC-01	74
5.3.4.4	Perfil PE-01.....	74
5.3.4.5	Perfil PSN PA.....	75
5.3.4.6	Perfil PSN PB.....	75
5.4	Concentraciones totales por FRX de elementos seleccionados.....	76
5.4.1.1	Perfil PA-01.....	76
5.4.1.2	Perfil PB-01.....	77
5.4.1.3	Perfil PC-01	78
5.4.1.4	Perfil PE-01.....	79
5.4.1.5	Perfil PSN – PA.....	80
5.4.1.6	Perfil PSN – PB.....	81
5.5	Difracción de Rayos X (DRX)	82
5.5.1	Composición mineral de la roca tipo del yacimiento.....	82
5.5.2	Mineralogía de arcillas	83
5.5.2.1	Mineralogía de arcillas en jal sin oxidar	83
5.5.2.2	Mineralogía de arcillas en jal oxidado	84
5.5.2.3	Mineralogía de arcillas en jal en contacto con agua negra.....	85
5.5.2.4	Mineralogía de arcillas en suelo natural	86

6. DISCUSIÓN.....	87
6.1 Formación y transformación de minerales arcillosos.....	87
6.2 Efecto del agua residual sobre los jales mineros.....	89
6.2.1 Condiciones fisicoquímicas.....	89
6.2.2 Contenido de restos orgánicos y bioturbación.....	91
6.2.3 Elementos mayores y menores en las muestras de jales.....	92
6.2.4 Rasgos micromorfológicos determinantes.....	94
6.3 Suelo natural de la isla en contacto con jales.....	94
6.3.1 Condiciones fisicoquímicas.....	94
6.3.2 Contenido de restos orgánicos y bioturbación.....	94
6.3.3 Concentración de elementos mayores y menores en la isla.....	95
6.3.4 Rasgos micromorfológicos determinantes.....	96
6.4 Suelos naturales fuera de la presa de jales.....	96
6.4.1 Condiciones fisicoquímicas.....	96
6.4.2 Contenido de restos orgánicos y bioturbación.....	96
6.4.3 Concentración de elementos mayores y menores en los suelos naturales..	97
6.4.4 Rasgos micromorfológicos determinantes.....	99
6.5 Fertilidad y cationes intercambiables.....	99
6.5.1 Materia orgánica y elementos nutritivos.....	99
6.5.2 Cationes intercambiables.....	101
6.6 Diferencias entre Technosol en jales y suelos naturales.....	104
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
7.1 Conclusiones de los efectos del agua residual en los jales.....	107
7.1.1 Conclusiones.....	107
7.1.2 Recomendaciones.....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

Lista de figuras

Figura	Título	Página
3.1	Localización	22
3.2	Provincias fisiográficas de Sonora	26
3.3	Regiones hidrográficas	27
3.4	Edafología de Sonora	28
3.5	Temperatura	29
3.6	Precipitaciones	30
3.7	Vegetación	30
4.1	Puntos de muestreo	40
5.1	Perfil PA-01	50
5.2	Perfil PB-01	51
5.3	Perfil PC-01.....	52
5.4	Perfil PE-01	53
5.5	Perfil PSN PA	54
5.6	Perfil PSN PB	55
5.7	Micromorfología de los perfiles PA-01 y PA-02	58
5.8	Micromorfología del perfil PB-01	59
5.9	Micromorfología del perfil PC-01	60
5.10	Micromorfología del perfil PE-01	61
5.11	Micromorfología del perfil PSN PA	63
5.12	Micromorfología del perfil PSN PB	65
5.13	M.O, y elementos nutritivos en PA01 y PA02	69
5.14	M.O, y elementos nutritivos en PB01 y PB02	70
5.15	M.O, y elementos nutritivos en PC01 y PD02	71
5.16	M.O, y elementos nutritivos en PSN	72
5.17	Colores en el perfil PA-01	73
5.18	Colores en el perfil PB-01	73
5.19	Colores en el perfil PC-01	74
5.20	Colores en el perfil PE-01	74
5.21	Colores en el perfil PSN PA	75
5.22	Colores en el perfil PSN PB	75

5.23	Elementos mayores en PA-01	76
5.24	Elementos menores en PA-01	77
5.25	Elementos mayores en PB-01	77
5.26	Elementos menores en PB-01	78
5.27	Elementos mayores en PC-01	78
5.28	Elementos menores en PC-01	79
5.29	Elementos mayores en PE-01	79
5.30	Elementos menores en PE-01	80
5.31	Elementos mayores en PSN PA	80
5.32	Elementos menores en PSN PA	81
5.33	Elementos mayores en PSN PB	81
5.34	Elementos menores en PSN PB	82
5.35	Mineralogía total de la roca del yacimiento	83
5.36	Mineralogía de arcillas en jal sin oxidar	84
5.37	Mineralogía de arcillas en jal oxidado	84
5.38	Mineralogía de arcillas del jal en contacto con agua residual	85
5.39	Mineralogía de arcillas del suelo natural	86

Lista de tablas

Tabla	Título	Página
3.1	Concentración de PTE's	32
3.2	Valores de precipitación	37
4.1	Datos de muestras	41
5.1	Descripción del perfil PA-01	50
5.2	Descripción del perfil PB-01	51
5.3	Descripción del perfil PC-01	52
5.4	Descripción del perfil PE-01	53
5.5	Descripción del perfil PSN PA	54
5.6	Descripción del perfil PSN PB	55
5.7	pH y CE	66
5.8	Cationes intercambiables	67

RESUMEN.

Las actividades mineras impactan directamente en el medio ambiente, particularmente al explotar minerales metálicos económicamente rentables. Los jales mineros contienen diferentes residuos derivados del proceso de beneficio. Estos suelos, clasificados por la WRB como Technosols, generalmente presentan bajos contenidos de materia orgánica, pH ácido, baja actividad biológica, poca o nula estructura de suelo y altas concentraciones de metales pesados. Otro inconveniente puede ser el drenaje ácido de mina, originado por la oxidación e hidrólisis de sulfuros metálicos. El objetivo de esta investigación fue identificar los procesos pedogenéticos que ocurren en los jales de la presa No. 3, en Buenavista del Cobre, específicamente, los ubicados en una zona en la que han ocurrido descargas de agua residual, y compararlos con jales en zonas sin descarga de esta, y también con suelos naturales ubicados en las inmediaciones de esta presa. Con lo anterior se pretende determinar si la adición de agua residual ha disminuido la oxidación de sulfuros y si además ha favorecido el desarrollo de procesos pedogenéticos que de otra forma no se tendrían en la zona en un periodo corto de tiempo. Se realizaron descripciones de perfiles excavados en las diferentes zonas y se colectaron muestras inalteradas de cada horizonte descrito en campo. Los análisis de laboratorio ayudaron a caracterizar física y químicamente cada horizonte y señalar las diferencias entre las distintas zonas. Los valores de pH en la zona con mayor influencia del agua residual varían entre 7.3 y 7.79. En las zonas con nula influencia de esta se tienen valores entre 5.76 y 6.19; mientras que en la zona de transición el pH se encuentra entre 6.78 y 7.27. Para los suelos naturales los valores se encuentran entre 5.27 y 6.09. Las muestras analizadas presentaron concentraciones relativamente bajas de metales pesados. Las mayores concentraciones se obtuvieron para elementos como hierro, cobre y manganeso. Los suelos en los jales se clasificaron como diferentes tipos de Spolic Technosol. Los resultados de observaciones micromorfológicas en las láminas delgadas determinaron que los procesos pedogenéticos dominantes en los jales con descarga de agua residual son la acumulación de materia orgánica, bioturbación y poca intensidad en la oxidación de sulfuros. Mientras que en los jales sin descarga de agua residual se observa mayor intensidad en la oxidación de sulfuros, poca o nula acumulación de materia orgánica y menores evidencias de bioturbación. Los procesos pedogenéticos de mayor intensidad en los suelos naturales son la acumulación de materia orgánica, bioturbación, acumulación de óxidos e iluviación de arcillas. En conclusión, los suelos estudiados presentan características del material parental y muestran diferentes procesos pedogenéticos, que en el caso de los suelos en el jal, parecen estar influenciados por la zona a la que pertenecen, dentro o fuera de la influencia del agua residual; mientras que los suelos naturales presentan mayor tiempo de desarrollo y acumulación de óxidos y arcillas. Lo anterior nos da una idea de que la adición de agua residual sí tiene un efecto que favorece y que podría emplearse como técnica de restauración en zonas de jales.

ABSTRACT.

Mining activities heavily impact on the environment, especially in metallic profitable minerals cases. Tailings contain different residues derived from the benefit process. According with the WRB these soils are defined as Technosols and generally have no organic matter content, low pH, very low biological activity, little or no soil structure, and high concentrations of potentially toxic elements (PTE's). One threat associated with this deposits can be acid mine drainage, caused by the oxidation of metal sulfides. The aim of our research was to identify pedogenetic processes that occur in the tailings of the dam No. 3, in Buenavista del Cobre, specifically those located in an area in which wastewater discharges have occurred in recent years and compare it with tailings in areas without waste water discharge, and also with natural soils located in the vicinity of this dam. With this we want to determine if non intentional addition of wastewater has limited the sulfide oxidation and if it has been favored the development of pedogenetic processes that otherwise would not occur in the area in a short period of time. Descriptions of profiles excavated in the different zones were made and undisturbed samples of each horizon described in the field were collected. Physical and chemical analysis were made in each sample to characterize horizons and point out the differences between the different zones. In the area with the greatest influence of wastewater pH is between 7.3 and 7.79. In the areas with no influence there are values amongst 5.76 and 6.19; while in the transition zone the pH is between 6.78 and 7.27. For natural soils, the interval is among 5.27 and 6.09. The analyzed samples presented relatively low concentrations of PTE's. The highest concentration were for elements such as iron, copper and manganese. The soils in the tailings were classified as different types of Spolic Technosol. The results of micromorphology in thin sections show that the dominant pedogenetic processes in the tailings with wastewater discharge are the accumulation of organic matter, bioturbation processes and low sulfide oxidation. While in the tailings without discharge of wastewater, greater intensity is observed in the oxidation of sulfides, little or no accumulation of organic matter and less evidence of bioturbation. Whereas in natural soils the most intense pedogenetic processes are organic matter accumulation, bioturbation, accumulation of oxides and clay illuviation. In conclusion, studied soils have characteristics of the parent material and show different pedogenetic processes, which in the case of the tailings seem to be influenced by their position in the dam, inside or outside the influence of wastewater; while natural soils have a longer evolution time and accumulation of oxides and clays. With this we strongly think that addition of wastewater represent an alternative tool that could be used as a restoration supportive technique in tailings areas.

1. INTRODUCCIÓN

Los depósitos de jales mineros representan riesgos ambientales potenciales, asociados con el desbordamiento de las represas que los contienen, transporte de material por agua y viento, y lixiviación de acidez y metales potencialmente tóxicos hacia el agua subterránea. Estos depósitos son inadecuados para el crecimiento de las plantas, debido a las condiciones de alta acidez, bajo contenido de carbono y nitrógeno, condiciones salinas y elevados contenidos de metales tóxicos que se presentan (Conesa et al., 2006; Ottenhof et al., 2007). Por otro lado, diversos investigadores han estudiado los problemas de contaminación de suelos y acuíferos, asociados con la presencia de metales, causados por actividades mineras (Förstner y Wittman, 1979; EPA, 1996; McGregor et al., 1998; Blowes y Jambor, 1990; Blowes y Ptacek, 1994; Dold y Fontboté, 2001; Al et al., 2000; Blowes et al., 2004; Lottermoser, 2003; Jambor et al., 2003; Navarro et al., 2006a; Romero et al., 2007).

Los jales mineros constituyen un tipo de suelo denominado Technosol. Los Technosols se definen de acuerdo con la World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2015), como aquellos suelos cuyas propiedades y pedogénesis están dominadas por su origen técnico. Los Technosoles son básicamente suelos antropogénicos que contienen más de 20% de "artefactos" por volumen en los 100 cm superiores, o que tienen material técnico duro (capa fabricada) en, o cerca de, la superficie del suelo. Se caracterizan por la presencia de materiales fabricados, alterados o expuestos por tecnología humana que de otro modo no estarían presentes en la superficie de la Tierra.

En un intento por recuperar estos espacios alterados por la industria minera, se han tomado dos enfoques. El primero consiste en tomar suelo fértil de un espacio inalterado y colocarlo en el área que desea rehabilitarse, con las consecuencias ambientales que esto supone

para el sitio del que se extraen los materiales. El segundo enfoque consiste en tomar los materiales de desecho (jales mineros en este caso) para que formen parte del material edáfico del Technosol, en combinación con materiales adicionales con los que se busca mejorar las propiedades de este. En nuestro estudio, nos apegaremos a la idea del segundo enfoque, dadas las condiciones del sitio de estudio.

Asociado a estos, una técnica para lograr la rehabilitación de los depósitos de jales consiste en la revegetación. Esta práctica es una de las mejores y más exitosas técnicas de manejo disponibles para la rehabilitación de depósitos de jales mineros en todo el mundo (Norland y Veith, 1995; Freitas et al., 2004; Ottenhof et al., 2007; Mendez y Maier, 2008). La dispersión de contaminantes a través del viento y agua, se ha disminuido mediante la fitoestabilización, por un lado mejora la estética de los paisajes que previamente se encontraban sin vegetación (Vangronsveld y Cunningham, 1998; Ernst, 2005), y por otro lado tiene capacidad de disminuir el efecto dañino de acidez y elementos tóxicos encontrados en los jales. Sin embargo, para lograr que la vegetación sea capaz de establecerse, se requiere un sistema de suelo que la soporte y le aporte los nutrientes (Wong, 2003) y los requerimientos de agua necesarios para las plantas y los organismos asociados.

En general, algunos investigadores han reportado que los Technosoles derivados de los residuos mineros se caracterizan por tener poca o nula estructura, bajo contenido de restos orgánicos, bajo pH, altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos, y baja actividad biológica en el suelo (Lilić et al, 2014; Huot et al, 2015; Pellegrini et al, 2015). Adicionalmente, es muy difícil identificar una capa de suelo reconocible que contenga humus formado in situ, probablemente debido a la edad del suelo, la falta de cobertura

vegetal y desechos orgánicos, así como a otras condiciones desfavorables del entorno de la mina.

Se sabe que, cuando hay suelos incipientes presentes en las represas de jales mineros, a menudo tienen bajos contenidos de materia orgánica, por lo que ha sido necesario añadir enmiendas orgánicas que ayuden a mejorar su nivel de fertilidad, lo que facilita que las plantas puedan establecerse en ese suelo. Para lograr esto, se han utilizado desechos orgánicos, por ejemplo lodos de depuradora o estiércol, ya que pueden considerarse como fuentes de nutrientes de liberación lenta (Wong, 2003). El uso de lodos de depuradora en los depósitos de jales mineros se basa en el suministro de nutrientes para promover el crecimiento de las plantas (Theodoratus et al., 2000; Simon, 2005), para mejorar la producción de biomasa (Pichtel et al., 1994) y evaluar la disponibilidad de metales después de la aplicación de lodos (Forsberg y Ledin, 2006).

Además de suministrar nutrientes a las plantas, el lodo puede promover la inmovilización y la absorción de algunos metales por las plantas. El uso de compost de estiércol y lodos de depuradora en jales ha mostrado aumento en el pH y disminución en la conductividad eléctrica (CE) de los jales (Chiu et al., 2006).

En la zona minera de Buenavista del Cobre en Cananea se encuentra la presa de jales No. 3, en la cual se han vertido los residuos mineros durante varias décadas, lo que ha originado una enorme cantidad de residuos producto de las actividades de extracción de cobre. Recientemente, una parte de los jales mineros en Buenavista del Cobre han sido expuestos a descarga de aguas residuales en la margen noroeste de la presa de jales No. 3. Lo anterior se ha dado por la falta de agua en la zona. El agua residual se bombea hacia la

presa de jales y se busca que por efecto de la pendiente el agua llegue al final de la presa de jales y se incorpore al proceso de beneficio.

Diferentes autores han definido a las aguas residuales tratadas como una fuente importante de nutrientes y pueden usarse para riego bajo condiciones controladas (Jimenes-Cisneros, 1995 y Angin et al., 2005). En 2003 Yadav et al., realizaron un estudio para identificar los diferentes parámetros fisicoquímicos y biológicos de las aguas residuales colectadas de diferentes pueblos en la India. Entre otras cosas informaron que dicho efluente puede aportar nutrientes tales como N, P, K, Zn, Fe y Cu.

De acuerdo con los resultados de Ottenhof et al., en 2007, la agregación del suelo por la descomposición de la materia orgánica de las especies pioneras representa una etapa temprana de la formación del suelo en los depósitos de desechos mineros. La adición de desechos orgánicos en los jales mineros puede promover una agregación favorable para la formación de la estructura del suelo (Zanuzzi et al., 2009). Por ello, se ha identificado al agregado del suelo como uno de los mejores indicadores para un suelo fértil porque une la física y la bioquímica de los sistemas del suelo (Young y Crawford, 2004).

En este sentido, se entiende que la estructura del suelo se refiere al tamaño, la forma y la disposición de los sólidos y los huecos, la continuidad de los poros, su capacidad para retener y transmitir fluidos y sustancias orgánicas e inorgánicas, y la capacidad de soportar el crecimiento y desarrollo vigoroso de las raíces (Lal, 1991). La estructura favorable del suelo y la alta estabilidad de los agregados son importantes para mejorar la fertilidad del suelo, aumentar la productividad agronómica, mejorar la porosidad y disminuir la capacidad de erosión (Bronick y Lal, 2004). También afecta el crecimiento de las plantas al influir en la distribución de las raíces y la capacidad de absorber agua y nutrientes (Rampazzo et al.,

1998; Pardo et al., 2000). Además, una estructura adecuada puede facilitar la infiltración de oxígeno, así como mejorar la capacidad de almacenamiento de agua (Franzluebbers, 2002).

Este estudio tiene como objetivo evaluar los rasgos micromorfológicos presentes y describir las diferencias en los procesos pedogenéticos que existen entre los perfiles excavados en sedimentos de la presa de jales, los cuales tienen o no influencia de descargas de agua residual, y posteriormente compararlos con suelos naturales de la zona minera. Se espera que el agua residual acelere estos procesos al influir en la presencia de actividad biológica y probablemente en el desarrollo de estructura en los residuos mineros.

1.1 Planteamiento del problema

La actividad minera en Cananea se ha llevado a cabo por más de cien años (Portal Oficial del Municipio de Cananea, 2017). Pertenece a la lista de las 10 minas de cobre más grandes del mundo tomando como base su producción anual (Mining Global, 2018). Como resultado de esta enorme actividad se han generado grandes cantidades de desechos conocidos como jales mineros, que se convierten en elementos de riesgo potencial de contaminación de suelos y acuíferos. Por tal motivo resulta importante estudiar los jales mineros de la zona de Cananea y evaluar si existen evidencias que indiquen desarrollo de procesos pedogenéticos y formación de suelo.

1.2 Justificación

Este estudio permitirá conocer si existen evidencias de procesos pedogenéticos y si estos pueden ser considerados como una primera referencia del potencial que tienen estos materiales para su eventual formación de un suelo adecuado para el crecimiento y desarrollo de especies vegetales. Además se desea conocer si la interacción con agua

residual disminuye la oxidación de los sulfuros presentes en el jal, si reduce la acidez y ayuda a elevar el pH, y si la presencia o ausencia de estas aguas tiene algún efecto en el desarrollo de las propiedades presentes en cada perfil de suelo. Esta investigación podría sustentar la idea de que la adición de aguas residuales a jales mineros que ocasionan drenajes ácidos de mina es una técnica que puede apoyar en el tratamiento y disminución de este problema, y que además es adecuada para favorecer ciertos procesos pedogenéticos que podrían promover el desarrollo de estructura en el Technosol. Lo anterior daría argumentos para sugerir que ambos materiales pueden complementarse y que el agua residual puede ser útil como materia prima que ayude a restaurar las zonas degradadas por las actividades de la industria minera de la zona (en particular las zonas de jales mineros), y posteriormente aplicarse procedimientos similares en otras zonas mineras. Además, se fortalecería la idea de que el agua residual puede ser un recurso útil y no solamente un residuo.

1.3 Hipótesis

La interacción de los jales con las aguas residuales acelerará los procesos pedogenéticos asociados a la actividad biológica al favorecer el incremento de la concentración de materia orgánica y el amortiguamiento del pH.

1.4 Objetivos

Evaluar el desarrollo de procesos pedogenéticos en jales expuestos a aguas residuales en Cananea, Sonora.

- Identificar rasgos micromorfológicos relacionados con procesos pedogenéticos en suelos naturales y jales derivados del aprovechamiento de cobre en Cananea, Sonora.

- Cuantificar las propiedades físicas y químicas de los suelos naturales y jales con y sin exposición a aguas residuales en Cananea, Sonora.
- Comparar los rasgos químicos, físicos y micromorfológicos relacionados con la evolución de las características pedogenéticas presentes entre suelos naturales, jales con y sin exposición a la presencia de aguas residuales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Explotación minera

La explotación de los recursos mineros genera gran cantidad de residuos y la disposición final de estos ocasiona gran variedad de problemas ambientales. Entre ellos podemos mencionar la pérdida de cobertura vegetal, la introducción al ambiente de sustancias tóxicas mediante los procesos de beneficio, estructuras susceptibles a la erosión eólica, y la generación de acidez y EPT's al exponer a los minerales de los yacimientos a un ambiente oxidante (Moore y Luoma, 1990; Dudka y Domy, 1997; Gray, 1997; Larocque y Rasmussen, 1998).

La generación de acidez ligada a la meteorización de sulfuros se ha convertido, en las últimas décadas, en uno de los principales problemas medioambientales debido a su enorme potencial contaminante. Generalmente, en este tipo de aguas ácidas se incluyen aquellas originadas por exposición subaérea de sulfuros metálicos, ya sea por causas naturales, debido a los procesos geológicos (conocido como *Acid Rock Drainage* o ARD), o por causas antropogénicas (fundamentalmente por la movilización de materiales geológicos para la extracción minera o para la construcción de edificios u otras infraestructuras). Dicha exposición al oxígeno atmosférico desestabiliza los sulfuros y hace que éstos tiendan a descomponerse, lo que desencadena la aparición de complejos procesos de disolución oxidativa que pueden dar lugar a la aparición de aguas ácidas.

Desde el punto de vista geoquímico, este tipo de aguas se caracteriza por su elevada acidez (altas concentraciones de H^+ disuelto), con valores de pH que típicamente varían entre 2 y 4 (Nordstrom y Alpers, 1999; Nordstrom *et al.*, 2000) y por las altas concentraciones disueltas de sulfato (SO_4^{2-}), hierro y otros elementos potencialmente contaminantes (Al, As, Sb, Cu, Cd, Zn etc.) (Lottermoser, 2003).

Como se ha indicado, la acidez se puede generar de forma natural ligada a los procesos geológicos. Sin embargo, es muy frecuente que sean las labores de minería las responsables de su aparición. De hecho, la mayor parte de los estudios realizados hasta el momento se centran en el denominado Drenaje Ácido de Minas (*Acid Mine Drainage* o *AMD* en inglés). La gran magnitud de la problemática de generación de drenaje ácido de mina se asocia a la enorme cantidad de materiales ricos en sulfuros que se movilizan y procesan para su explotación minera, fundamentalmente para la obtención de distintos metales (Cu, Pb, Zn, Sn, Ni, Mo, W, Au, Ag, Pt, etc.) pero también para la explotación de yacimientos de uranio, fosfatos, carbón o hidrocarburos.

2.1.1 Procesos geoquímicos que generan acidez

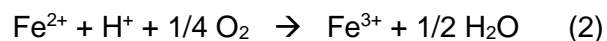
Diversos autores han desarrollado revisiones con distinto nivel de detalle sobre los procesos geoquímicos generales involucrados en la formación de aguas ácidas, entre ellos se pueden mencionar a Banks *et al.* (1997), Nordstrom y Southam (1997), Nordstrom y Alpers (1999), Holmes y Crundwell (2000) o Blowes *et al.* (2005). Es ampliamente reconocido que el sulfuro metálico más frecuente en la naturaleza y por lo tanto el más presente también en las explotaciones y residuos mineros de este tipo es la pirita (FeS_2). Los mecanismos y velocidades para las reacciones de oxidación de este mineral han sido extensamente estudiadas por Moses y Herman (1991), Evangelou (1995), Williamson y Rimstidt (1994), Rimstidt y Vaughan (2003) o Descostes *et al.* (2004).

La oxidación de la pirita puede simplificarse para expresarla en tres pasos básicos que corresponden con tres reacciones químicas globales. El primer paso consiste en la oxidación del azufre, según una reacción que puede simplificarse como (reacción 1):

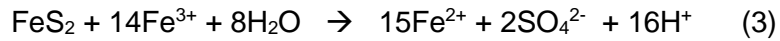


donde se muestra que, por cada mol de pirita oxidado se generan directamente 2 moles de hidrogenión (H^+), lo cual se traduce generalmente en un aumento de la acidez de la solución y, por tanto, en un descenso del pH. Una importante implicación para la generación de aguas ácidas que se puede derivar de la reacción (1) es que, para oxidar pirita por este mecanismo es necesaria la presencia tanto de agua como de oxígeno. Es decir, tanto la ausencia de agua (ej. en climas áridos o en zonas bien drenadas) como de oxígeno (ej. en medios completamente saturados de agua) conllevan la detención en la producción de aguas ácidas.

El Fe^{2+} liberado mediante la reacción (1), puede a su vez, ser oxidado posteriormente según muestra la reacción (2):



Como se puede observar, esta reacción consume parte de la acidez generada por la disolución oxidativa de la pirita (reacción 1). En soluciones acuosas a pH inferior a 4, la oxidación abiótica del Fe(II) es bastante lenta y su velocidad es prácticamente independiente del pH (Singer y Stumm, 1970). No obstante, en presencia de microorganismos, esta reacción puede acelerarse hasta 5 o 6 órdenes de magnitud (Nordstrom y Southam, 1997; Nordstrom y Alpers, 1999; Nordstrom, 2003). A medida que el pH de las soluciones acuosas va aumentando por encima de aproximadamente 4, la velocidad de oxidación de Fe(II) a Fe(III) aumenta rápidamente (Singer y Stumm, 1970). De hecho, a pH cercano a 7, la velocidad abiótica de oxidación del Fe(II) es tan rápida que la presencia de catálisis bacteriana no ha sido demostrada y tampoco es necesaria para explicar las velocidades observadas (Nordstrom y Southam, 1997). El Fe^{3+} generado puede, a su vez, promover la oxidación de la pirita de acuerdo con la reacción (3):



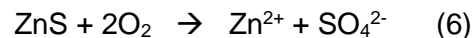
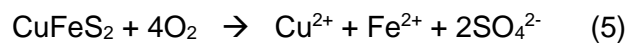
Esta reacción es mucho más rápida que la reacción (1), pero está limitada por la generación de Fe^{3+} mediante la reacción (2), que a su vez, depende de la presencia de microorganismos (Nordstrom y Alpers, 1999) y de la disponibilidad de oxígeno. Según Singer y Stumm (1970), la oxidación de pirita con Fe^{3+} como agente oxidante es predominante en soluciones ácidas mientras que, a valores de pH cercanos a la neutralidad, el principal oxidante es el O_2 , debido fundamentalmente a la baja solubilidad del Fe^{3+} en esas condiciones. Aunque aparentemente la reacción (3) genera mucha más acidez que la reacción (1), hay que tener en cuenta que, para que el proceso pueda continuar en el sistema, es necesario generar el Fe(III) consumido a partir del Fe(II) producido. Para ello, de acuerdo con la reacción (2), se consume 1 mol de H^+ por cada mol de Fe(II) oxidado, con lo que se deduce que la reacción neta de oxidación férrica (combinación de reacciones 2 y 3) de 1 mol de pirita produce 2H^+ , al igual que la de oxidación por oxígeno (reacción 1). Por otra parte, el Fe^{3+} puede hidrolizarse y precipitar, de acuerdo con reacciones similares a la reacción (4):



Esta reacción de hidrólisis genera aún más acidez. En realidad, lo más común en drenajes ácidos es que se produzca la precipitación de fases férricas más complejas, como los hidróxidos, oxihidróxidos y oxihidróxisulfatos denominados coloquialmente en conjunto como “ocres” (o también yellow boys o Boulder coats, en inglés). Entre estas fases, las más frecuentes son posiblemente la schwertmannita ($\text{Fe}_8\text{O}_8\text{SO}_4(\text{OH})_6$), la jarosita ((K, Na, H_3O) $\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), la goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) y la ferrihidrita ($\text{Fe}_5\text{OH}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

Debido al habitual predominio de la pirita sobre otros sulfuros, ha recibido mayor atención con estudios para comprender su proceso de oxidación.

La galena (PbS), la esfalerita (ZnS), la calcopirita (CuFeS₂), la marcasita (FeS₂) o la arsenopirita (FeAsS), se puede expresar de forma similar a la de la pirita. No obstante, es importante destacar que la disolución de estos sulfuros minoritarios no siempre produce acidez por sí misma, aunque se pueden generar hidrogeniones libres por la hidrólisis posterior de los metales liberados (Banks *et al.*, 1997). Por ejemplo, la disolución oxidativa de la calcopirita, la esfalerita o la galena responde a las siguientes reacciones (5), (6) y (7), respectivamente:

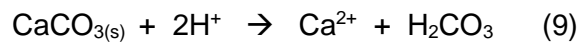


2.2 Atenuación natural por reacciones de carbonatos y silicatos

La composición inicial de las aguas afectadas por drenaje ácido de minas está condicionada por la oxidación de los sulfuros, que provoca la acidificación del medio. Sin embargo, su composición puede variar debido al ataque y disolución de otros minerales como carbonatos y aluminosilicatos contenidos en los minerales de la ganga o en los materiales que constituyen el cauce de los ríos afectados por AMD. La elevada acidez de los lixiviados mineros provoca el ataque de estos minerales, movilizandando una gran cantidad de elementos que pasan a estar en disolución. De este modo, la concentración de Mn, Al, Si, Ca y Mg en las aguas ácidas de mina puede llegar a ser muy elevada, aunque ninguno de ellos forma parte de los sulfuros.

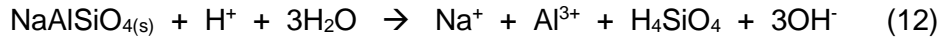
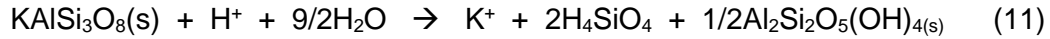
La disolución de estos minerales consume acidez, en el caso de que en el medio tengamos materiales carbonatados se neutralizan los protones liberados durante la oxidación de sulfuros, constituyéndose como un mecanismo de atenuación natural de la contaminación. La abundancia de estos minerales en las proximidades de los sulfuros y su capacidad de neutralización determinará si el lixiviado resultante presenta acidez o condiciones neutras.

La calcita (CaCO_3) es el principal agente neutralizador de la acidez dado que es el carbonato más común dentro de un amplio rango de ambientes geológicos y presenta una elevada velocidad de reacción en condiciones ácidas. La calcita neutraliza la acidez liberando Ca^{2+} y bicarbonatos (reacción 8) o ácido carbónico en condiciones ácidas (reacción 9). La dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), aunque menos abundante en la naturaleza que la calcita, también es muy eficaz en la neutralización de acidez (reacción 10).



Los silicatos, a pesar de poseer una menor capacidad de neutralización debido a que la velocidad de las reacciones de hidrólisis es menor, constituyen a menudo el principal material con el que reacciona el agua ácida debido a su gran abundancia en la corteza terrestre. La disolución incongruente de los silicatos provoca el consumo de acidez, la movilización de cationes disueltos (K^+ , Ca^{2+} , Na^+), ácido silícico y la formación de minerales secundarios, como la hidrólisis de feldespato potásico y la formación de caolinita (reacción 11), es lo que se conoce como disolución incongruente de los silicatos. Sin embargo, los silicatos también se pueden disolver de manera congruente (Álvarez et al., 2010), lo cual

implica la total disolución de los silicatos en componentes disueltos (reacción 12, hidrólisis de la albita).



En el caso de los aluminosilicatos su disolución inicialmente consume acidez. Sin embargo, si la disolución del silicato se produce de manera congruente, la movilización de Al^{3+} provoca un aumento en la acidez potencial del lixiviado.

2.3 Drenajes Ácidos de Mina

Los drenajes ácidos de mina se caracterizan por contener gran cantidad de sólidos en suspensión y un alto contenido en sulfato y metales disueltos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.), alcanzando sus concentraciones las decenas y centenas de miligramos por litro. Estos elementos en tales concentraciones son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cuerpos de agua, y además esas aguas pueden llegar a dañar la estructura y la cimentación de construcciones.

Con el paso del tiempo la situación se ha agravado debido al enorme costo que supone el tratamiento de la acidez en depuradoras convencionales, por el tiempo prolongado que perdura el fenómeno de generación de aguas ácidas en antiguas zonas mineras. Por ello es necesario encontrar una solución a este problema.

Una alternativa al tratamiento convencional (tratamientos activos) de los drenajes ácidos de mina, tanto si las instalaciones se encuentran en operación o en abandono, lo constituyen

los métodos de tratamiento pasivo, debido a su bajo coste de construcción, fácil operación y mantenimiento, y buena eficiencia en el tratamiento de aguas ácidas.

Los métodos de tratamiento pasivo más utilizados son los humedales artificiales (aerobios o anaerobios), los drenajes anóxicos calizos, los sistemas de producción de alcalinidad, y cuando el problema se manifiesta en aguas subterráneas, las barreras reactivas permeables. El objetivo principal en todos ellos es la supresión de la acidez, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de los sólidos en suspensión. Para ello actúan cambiando las condiciones de Eh y pH del influente de forma que se favorezca la formación de especies insolubles que precipiten y retengan la carga contaminante.

2.3.1 Problemática de los drenajes ácidos de mina

Muchos autores describen como aguas ácidas de mina a los drenajes con un pH comprendido entre 2 y 4, y altos contenidos de metales disueltos. En relación con estos drenajes ácidos existen informes sobre la mortandad de peces y crustáceos de ríos, afecciones al ganado, y destrucción de cultivos y riberas; siempre asociado a una coloración ocre-amarillenta de los lechos de ríos y lagos afectados, y un incremento de la turbidez de las aguas. La contaminación que producen los drenajes ácidos de mina ha sido profusamente descrita por numerosos investigadores (Nordstron y Alpers, 1999; Morin y Hutt, 2001; Mills, 1995).

Debido a las dificultades prácticas que conlleva la inhibición de la formación de AMD, a menudo, la única alternativa es minimizar el impacto que estos desechos contaminantes ocasionan en las corrientes y ríos receptores, y en el medio ambiente en general. Este enfoque implica medidas de control de la migración. Estos se han dividido en procesos activos y pasivos. Los primeros generalmente (aunque no exclusivamente) se refieren a la

aplicación continua de materiales alcalinos para neutralizar las aguas ácidas de las minas y precipitar metales, mientras que los segundos se refieren al uso de ecosistemas de humedales naturales y contruidos. Los sistemas pasivos tienen la ventaja de requerir relativamente poco mantenimiento y costos menores (y menos frecuentes) que los sistemas activos; aunque al inicio pueden ser costosos y/o poco prácticos de instalar. En realidad, todas las tecnologías de tratamiento pasivo requieren una cierta cantidad de costos de mantenimiento. Otra subdivisión, que a menudo puede resultar útil, es entre aquellas tecnologías de remediación que dependen de actividades biológicas y aquellas que no. Dentro de estos grupos principales, hay procesos que pueden describirse como activos o pasivos.

En los apartados siguientes se describirán únicamente, y de forma breve, las estrategias pasivas de remediación que tienen similitud con lo que ocurre en la presa de jales No. 3, en Buenavista del Cobre.

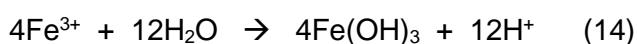
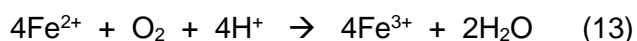
2.4 Estrategias de remediación biológica

La base de la biorremediación del AMD se deriva de la capacidad de algunos microorganismos para generar alcalinidad e inmovilizar metales, invirtiendo esencialmente las reacciones responsables de la génesis de la acidez. Los procesos microbiológicos que generan alcalinidad neta son en su mayoría procesos reductores e incluyen desnitrificación, metanogénesis, reducción de sulfato y reducción de hierro y manganeso. La amonificación (la producción de amonio a partir de compuestos orgánicos que contienen nitrógeno) también es un proceso generador de álcali.

2.4.1 Tecnología pasiva

2.4.1.1 Humedales aerobios

Los humedales aerobios generalmente se construyen para tratar aguas de mina que presentan alcalinidad neta. Esto se debe a que la reacción remediadora principal que ocurre en ellos es la oxidación del hierro ferroso y la posterior hidrólisis del hierro férrico producido, que es una reacción neta generadora de ácido (ecuaciones 13 y 14).



Con estos humedales artificiales se pretenden reproducir los fenómenos y procesos de los humedales naturales (pantanos, marismas, turberas, etc.), creando un ambiente propicio para el desarrollo de ciertas plantas (*Tipha*, *Equisetum*, carrizo, juncos, etc.), comunidades de organismos (algas, protozoos y bacterias) y musgos (*Sphagnum*), los cuales participan en la depuración del agua (Kadlec y Knight, 1996). Estos humedales ocupan una gran superficie y tienen una somera lámina de agua que inunda el substrato sobre el que se desarrolla la vegetación. El lento fluir del agua en el humedal permite alcanzar el tiempo de retención necesario para que tengan lugar los lentos procesos depuradores del agua.

Los sistemas aerobios favorecen el contacto entre el agua contaminada y el aire atmosférico mediante el empleo de plantas acuáticas, al liberar éstas oxígeno por sus raíces y rizomas; para que la vegetación emergente actúe de este modo el espesor de la lámina de agua no debe superar los 30 cm (Skousen et al., 1998). El substrato oxigenado del humedal propicia la formación de un hábitat para que se desarrollen ciertas colonias de bacterias que actúan como catalizadoras en la reacción de oxidación de los contaminantes

presentes en el humedal, transformando en el caso del hierro el Fe^{2+} a Fe^{3+} , el cual finalmente precipita en forma de hidróxido.

Entre los numerosos procesos que se dan en un humedal aerobio se tienen la filtración de la materia en suspensión, la adsorción de metales e intercambio iónico en los materiales del substrato, la bioacumulación de metales en las raíces y partes emergentes de las plantas, además de la precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos a través de reacciones de oxidación e hidrólisis (Eger, 1994). El pH y la alcalinidad neta del agua son muy importantes debido a que ambos influyen en la solubilidad de los hidróxidos y en la cinética de las reacciones de oxidación e hidrólisis de los metales.

2.4.1.2 Humedales anaerobios

En los humedales anaerobios, para favorecer las condiciones anóxicas que se requieren para su correcto funcionamiento, la altura de la lámina de agua ha de superar los 30 cm. Esta lámina cubre un substrato permeable de un espesor de 30-60 cm formado mayoritariamente por material orgánico (70-90% de estiércol, compost, turba, heno, serrín, etc.), que está entremezclado o bien dispuesto sobre una capa de caliza. La finalidad del substrato orgánico es eliminar el oxígeno disuelto, reducir el Fe^{3+} a Fe^{2+} , y generar alcalinidad mediante procesos químicos o con intervención de microorganismos. Sobre el conjunto de este substrato se desarrolla la vegetación emergente característica de los humedales, la cual ayuda a estabilizar el substrato además de aportar materia orgánica adicional.

Estos sistemas operan en permanente inundación, fluyendo parte del agua horizontalmente a través del substrato orgánico. En éste, se desarrollan bacterias anaerobias sulfuro-reductoras (*Desulfovibrio* y *Desulfomaculum*) capaces de utilizar su reacción con la materia

orgánica del sustrato y el sulfato disuelto en el agua intersticial como fuente de energía para su metabolismo.

2.5 Importancia del estudio de estos suelos en jales mineros

Es evidente que los jales mineros presentan muchos riesgos asociados, pero también representan una oportunidad en el tema ambiental. Ante la acelerada degradación del suelo y los problemas relacionados con esto, se hace indispensable buscar metodologías que ayuden, entre otras cosas, a mejorar las propiedades de este tipo de suelos asociados a zonas de residuos mineros. Si es factible mejorar las propiedades presentes en los suelos que se desarrollan sobre jales mineros, será posible: a) utilizar estos materiales en la elaboración de Technosoles, b) establecer Technosoles que soporten vegetación propia de las zonas mineras, c) restaurar zonas de jales mineros con mejores oportunidades de desarrollo a futuro, y d) anticipar riesgos asociados con este tipo de materiales.

2.6 Aguas residuales

Las aguas residuales son aguas usadas que han sido afectadas por usos domésticos, industriales y/o comerciales. Por lo tanto, la composición del agua residual cambia constantemente y es muy variable, por lo que es tan difícil encontrar una definición singular de la palabra misma.

La composición de las aguas residuales es 99,9% agua y el 0,1% restante es lo que se retira. Este 0,1% contiene materia orgánica, microorganismos y compuestos inorgánicos. Las aguas residuales también incluyen la escorrentía de las tormentas, ya que las sustancias nocivas se lavan de las carreteras, los estacionamientos y los techos.

Las aguas residuales domésticas se originan en actividades como el uso en baños, el aseo personal, la preparación de alimentos y el lavado de ropa. Aguas residuales comerciales de fuentes no domésticas, como salones de belleza o talleres de reparación de automóviles, por ejemplo. Estas aguas residuales pueden contener materiales peligrosos y requieren un tratamiento o eliminación especial. Las aguas residuales industriales se originan en procesos de fabricación industriales o comerciales, como la agricultura, y suelen ser más difíciles de tratar que los desechos domésticos. La composición de las aguas residuales industriales varía según la industria.

2.6.1 Contenido orgánico de las aguas residuales

El contenido orgánico de las aguas residuales se compone de heces humanas, proteínas, grasas, vegetales y azúcares de la preparación de alimentos, así como jabones. Parte de este contenido orgánico se disuelve en el agua y parte existe como partículas separadas. La porción de materia orgánica que no se disuelve pero permanece suspendida en el agua se conoce como sólidos suspendidos. Las aguas residuales se tratan para eliminar la mayor cantidad de material orgánico posible.

Las bacterias naturales del suelo y del agua se comen los desechos orgánicos de las aguas residuales y los utilizan como alimento y fuente de energía para crecer rápidamente. En un ambiente de agua natural donde hay mucho oxígeno disuelto en el agua, las bacterias aeróbicas consumen el material orgánico. Si las aguas residuales crudas se dejan sin tratar, las bacterias anaeróbicas descomponen el material orgánico residual y liberan gases como el sulfuro de hidrógeno. También pueden liberarse gases inodoros como el metano y el dióxido de carbono.

2.6.2 Materia inorgánica

Los minerales inorgánicos, los metales y los compuestos, como el sodio, el cobre, el plomo y el zinc, son comunes en las aguas residuales tanto de alcantarillado como de aguas que son resultado de procesos industriales. Estos materiales pueden tener su origen en fuentes industriales y comerciales, aguas pluviales y afluencia e infiltración de tuberías rotas. La mayoría de las sustancias inorgánicas son estables y los organismos de las aguas residuales no las pueden descomponer fácilmente.

2.6.3 Nutrientes

El exceso de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno puede causar eutrofización, que también puede ser tóxica para los organismos. Esto también promueve el crecimiento excesivo de plantas y reduce la disponibilidad de oxígeno, alterando los hábitats y poniendo en peligro potencialmente a ciertas especies.

2.6.4 Otros contaminantes de las aguas residuales

Las bacterias, los virus y los patógenos que causan enfermedades en las aguas residuales pueden contaminar las playas y las poblaciones de organismos presentes, por ejemplo. Las bacterias coliformes fecales en los desechos humanos generalmente son inofensivas, pero existen patógenos que pueden afectar negativamente la salud humana. Estos pueden ser bacterias como la fiebre tifoidea o virus como la hepatitis B, por ejemplo. El contacto directo con estos patógenos o la contaminación del suministro de agua pueden causar infecciones como resultado.

3. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 Localización

El municipio de Cananea está ubicado en la parte norte del estado de Sonora, en el Noroeste de México. Su cabecera es la población de Cananea y se localiza entre las coordenadas 30° 59' 00" latitud norte y 110° 18' 05" longitud oeste (INAFED, s.f.). Dentro del municipio se encuentra el distrito minero de Cananea, que se localiza en la parte norte, a aproximadamente 250 km al noreste de Hermosillo. Se encuentra a una elevación promedio de 1654 metros sobre el nivel del mar. El municipio se encuentra limitado por los municipios Santa Cruz y Naco al Norte, Fronteras al Este, Ímuris al Oeste y Bacoachi y Arizpe al Sur (Figura 3.1).

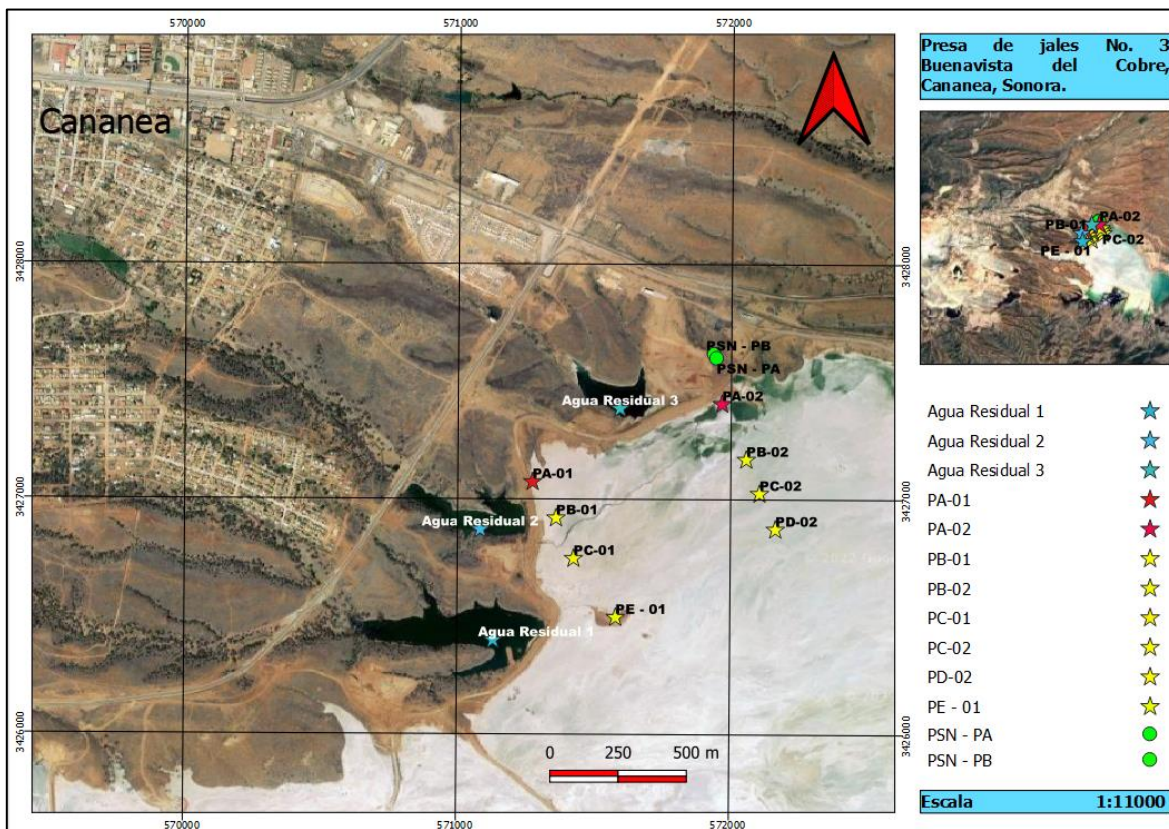


Figura 3.1. Localización. Se muestra una porción de la ciudad de Cananea y de la presa de jales No. 3 en Buenavista del Cobre. Ubicación de los puntos de muestreo y los repesos de agua residual.

3.2 Reseña histórica

El municipio de Cananea, originalmente fue una ranchería habitada por indios Pimas (Servicio Geológico Mexicano, 2012). La historia minera se remonta al año de 1700, cuando misioneros jesuitas descubren y explotan minerales ricos en oro y plata en la mina Cobre Grande. En 1868 el General I. Pesqueira, sistematiza la explotación de las minas de Cananea, el mineral se beneficiaba y se transportaba a lomo de mula hasta el puerto marítimo de Guaymas, de donde se embarcaba a Inglaterra. En 1899, W. C. Green, funda The Cananea Consolidated Cooper Company, S. A. (Portal Oficial del Municipio de Cananea, 2017), realizando la explotación subterránea de los yacimientos El Capote y Oversight, beneficiando el mineral con una concentradora de 600 t/d y fundiendo con hornos de soplo. En 1911, se funden concentrados de cobre en hornos de reverbero. En 1917, la compañía fue adquirida por The Anaconda Cooper Mining Company. En 1927, se descubre el yacimiento La Colorada, que produjo 7 millones de toneladas con 6% de cobre y 0.4% de molibdeno. En 1969, inician la explotación del tajo Cananea, un año después y hasta la fecha, toda la explotación se realiza a cielo abierto. En 1971, el 51% de las acciones pasa a inversionistas mexicanos, cambiando el nombre a Compañía Minera de Cananea, S. A. (Portal Oficial del Municipio de Cananea, 2017). En 1982, inicia la mexicanización quedando el capital de la empresa 100% mexicano y administrada por el Gobierno Federal. En 1986, el Grupo México adquiere del gobierno mexicano la mina continuando la operación de esta hasta la fecha (Grupo México, 2017). Grupo México, a través de su compañía filial Buenavista del Cobre, explota a cielo abierto la reserva mineral del depósito Buenavista del Cobre, comprendido dentro del distrito minero Cananea. La reserva de este depósito consta de 7140 Mt de mineral con una ley de 0.42 % de Cu, 0.008 % de Mo, 0.58 g/ton de Ag y 0.012 g/ton de Au (Singer *et al.*, 2005).

3.3 Geología

El distrito minero de Cananea se encuentra en una región subyacente en el Cratón precámbrico de América del Norte. El basamento precámbrico pertenece a la provincia Paleoproterozoica Mazatzal (1.6–1.7 Ga), que se extiende a través del sur de Arizona, Nuevo México y el norte de Sonora (Amato et al., 2008). Este basamento se identifica en Sonora por el esquisto Pinal, que está intrusionado por el granito anorogénico Cananea Mesoproterozoico (Anderson y Silver, 1977), que consta de dos facies magmáticas: (1) uno granitoide con fenocristales de cuarzo en una matriz de feldespato potásico, cuarzo y oligoclasa; (2) granitoide de grano grueso a pegmatítico menos abundante compuesto de feldespato potásico, oligoclasa, cuarzo y hornblenda, magnetita y apatita (Valentine, 1936). El conjunto proterozoico es sobreyacido discordantemente por rocas paleozoicas de la plataforma norteamericana que incluyen las formaciones Bolsa, Abrigo, Martín y Escabrosa, y el Grupo Naco (Mulchay & Velasco, 1954), (Velasco, 1966) y (Meinert, 1982).

Las rocas proterozoicas y paleozoicas están superpuestas de forma discordante por rocas volcánicas mesozoicas (Valentine, 1936; Busby-Spera, 1988; Rodríguez-Castañeda y Anderson, 2011), e intrusionadas por granitos de edad Jurásica (Anderson y Silver, 1977). Las rocas volcánicas más antiguas corresponden a riolitas y andesitas, intercaladas con arenisca y cuarcita de la Formación Elenita Triásica-Jurásica (Valentine, 1936; Wodzicki, 1995). La Formación Jurásica Henrietta de 1700 m de espesor se superpone a la Formación Elenita (Valentine, 1936), y está compuesta de tobas y flujos dacítico a riolíticos, con contenido potásico medio a alto, y calcialcalinas (Wodzicki, 1995). La contraparte intrusiva de las rocas volcánicas jurásicas es la sienita El Torre de 175 Ma, que intrusiona a las formaciones Elenita y Henrietta (Wodzicki, 1995).

Las rocas volcánicas y plutónicas del Cretácico tardío-Paleógeno temprano del arco laramídico están muy extendidas en el distrito. Según Meinert (1982), la base de la secuencia es la diabasa Mariquita, que consiste en flujos de andesita basáltica e intrusiones

que atraviesan las rocas de la Formación Henrietta (Wodzicki, 1995). La Formación Mesa se superpone a la diabasa Mariquita. Esta formación tiene un espesor de 1500 m, y consiste principalmente en rocas volcánicas intermedias, intercaladas con depósitos clásticos y volcánicos (Valentine, 1936; Wodzicki, 2001).

Las rocas del Precámbrico al Cretácico fueron intrusionadas por plutones laramídicos e intrusiones porfídicas. Las intrusiones laramídicas más antiguas son la diorita Tinaja, la granodiorita de Cuitaca y la monzo-diorita Chivato (Valentine, 1936). Estos dos últimos intrusivos presentan edades U-Pb en circones de 64 ± 3 Ma y 69 ± 1 Ma, respectivamente (Anderson y Silver, 1977). Para una etapa más tardía se encuentran plutones de composición cuarzo-feldespática y troncos de composición riolítica (Valencia et al., 2006), con edades entre 59.9 ± 2 y 57.4 ± 1.6 Ma (Wodzicki, 2001 en Valencia et al., 2006), considerados los principales conductos para la actividad hidrotermal y la mineralización (Del Río et al., 2015) del distrito de Cananea.

La mina Buenavista del Cobre actualmente produce Cu a partir de la mineralización de un pórfido cuprífero, que se aloja principalmente en rocas volcánicas. La litología de este pórfido presenta cuarzo-monzonita, monzodiorita y granodiorita, acompañadas de sericita y skarns ricos en zinc-plomo-cobre con estratos ligados a depósitos de óxido de hierro y sulfuro de alta ley (Meinert, 1982; Ochoa-Landín et al., 2011).

3.4 Fisiografía

De acuerdo con las Provincias Fisiográficas de Raisz (SGM, 2012) el área de Cananea queda comprendida en la provincia Sierra Madre Occidental (Figura 3.2) dentro de la subprovincia Sierras y Llanuras del Norte (INEGI, 2020), la cual se caracteriza por un conjunto de fosas y pilares alargados con dirección Norte-Sur, que son producto del fallamiento extensional producido entre hace 27 y 10 Ma (Stewart y Roldán, 1994 en González-León, 2010).

La provincia Sierra Madre Occidental se caracteriza por montañas paralelas orientadas NW-SE, separadas por valles intermontanos, y estructuralmente representan bloques desplazados por fallas normales, provocando una alternancia de bloques levantados y hundidos (horst y graben), reflejo de los eventos tectónicos distensivos mayores.

Los elementos orogénicos están representados por la sierra Los Ajos, sierra El Manzanal y la porción sureste de la sierra La Elenita. La subprovincia Sierras y Llanuras del Norte está formada por extensos valles aluviales formados principalmente por conglomerados, se llega a observar pequeños afloramientos de rocas ígneas intrusivas ácidas, en estos valles se intercalan algunas sierras.

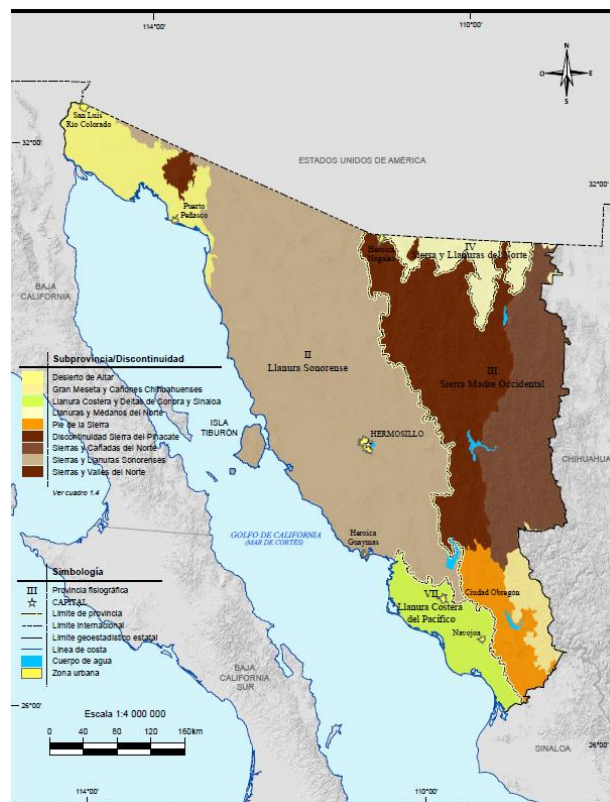


Figura 3.2. Provincias fisiográficas de Sonora. Tomada de Anuario estadístico y geográfico de Sonora, 2017.

3.5 Hidrografía

La zona de Cananea queda dentro de la región hidrológica Sonora Sur (RH9), esta región ocupa el 63.64% de la superficie territorial de Sonora. Tiene un relieve con fuertes contrastes altimétricos; la mayoría de sus corrientes nacen en la sierra Madre Occidental y la integran las cuencas siguientes: cuenca río Mayo, cuenca río Yaqui, cuenca río Mátape, cuenca río Sonora y cuenca río Bacoachi (Figura 3.3). La cuenca río Sonora cubre una superficie de 14.78% de la superficie de la región hidrológica Sonora sur (RH 9), en ésta se encuentra la presa Abelardo Rodríguez, cuyas aguas son empleadas para riego, control de avenidas y uso doméstico.

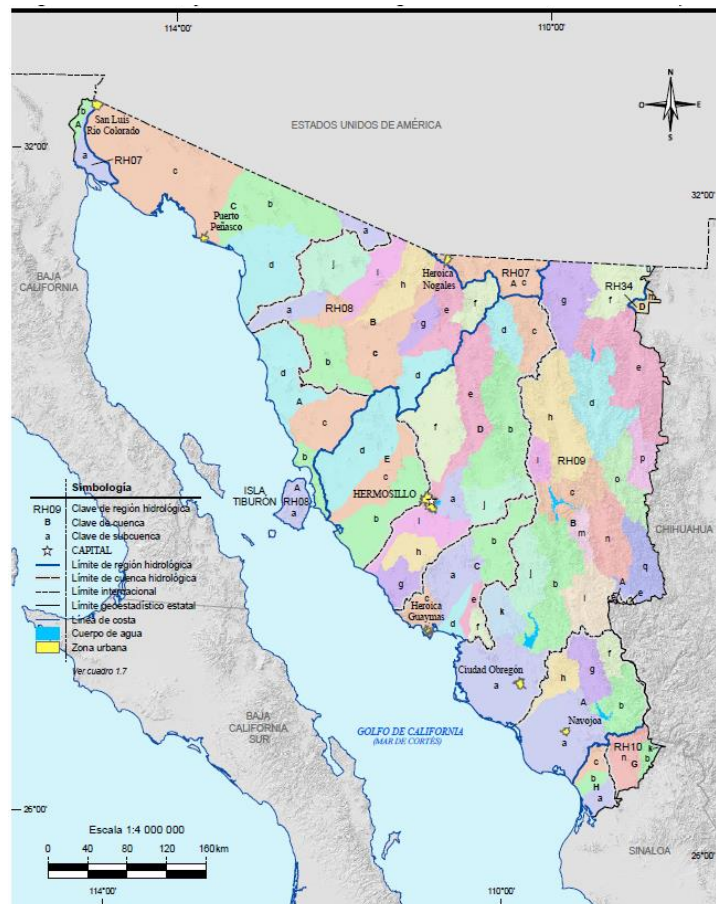


Figura 3.3. Regiones hidrográficas. Regiones, cuencas y subcuencas hidrológicas. Tomada de Anuario estadístico y geográfico de Sonora, 2017.

3.6 Edafología

De acuerdo con el mapa de suelos dominantes del estado de Sonora (INEGI, 2017), escala 1:4000000, y como se puede apreciar en la Figura 3.4, los suelos que predominan alrededor de la zona de estudio son Leptosols, Regosols, Phaeozems, Planosols y Calcisols. Para la clasificación de estos tipos de suelo el INEGI se apegó a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo de la WRB de 2015.

Los perfiles estudiados se encuentran dentro de una zona dominada por la presencia de materiales detríticos residuales, que son los remanentes del proceso de beneficio y que han sido acumulados en las presas de jales. Estas acumulaciones se clasifican como Technosols (WRB, 2015), pues sus propiedades y edafogénesis están dominadas por su origen técnico y contienen gran cantidad de artefactos (>20%).

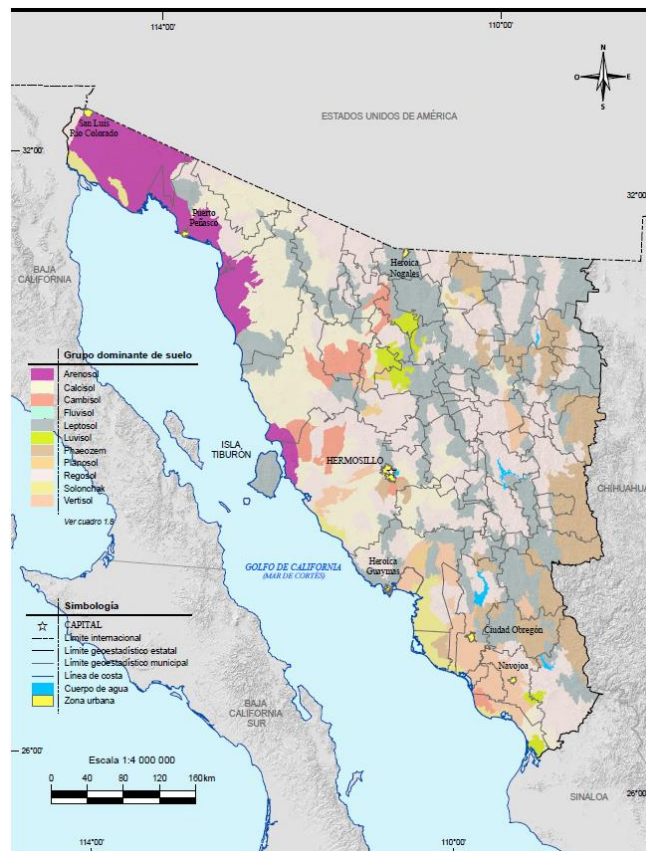


Figura 3.4. Edafología de Sonora. Mapa edafológico del estado de Sonora. Tomada de Anuario estadístico y geográfico de Sonora, 2017.

3.7 Clima y vegetación

De acuerdo con el INEGI (2017), la región de Cananea está dominada por un clima semiseco semicálido. Según datos climatológicos, que comprenden desde el año 1951 hasta 2010, de la estación meteorológica 00026126 CANANEA (FFCC), con coordenadas geográficas 30°58'00" latitud Norte y 110°20'00" longitud O y elevación de 1489 msnm (SMN, s.f.), la temperatura media normal anual es de 18.2°C (Figura 3.5), siendo el mes de enero el más frío con 9.4°C y el mes de agosto el más cálido con 26.4°C (Romero, 2018). La precipitación tiene un régimen de lluvias bimodal, presentándose la principal temporada de lluvias en los meses de julio a septiembre y otra en los meses de diciembre a marzo (Figura 3.6), que representan 545 mm anuales (Atlas de Riesgos del Estado de Sonora, 2021). En la figura antes mencionada se aprecia el comportamiento de la temperatura y las precipitaciones del año 2020, el cual muestra correspondencia con los valores acumulados desde el año de 1951, reportados por Romero en 2018.

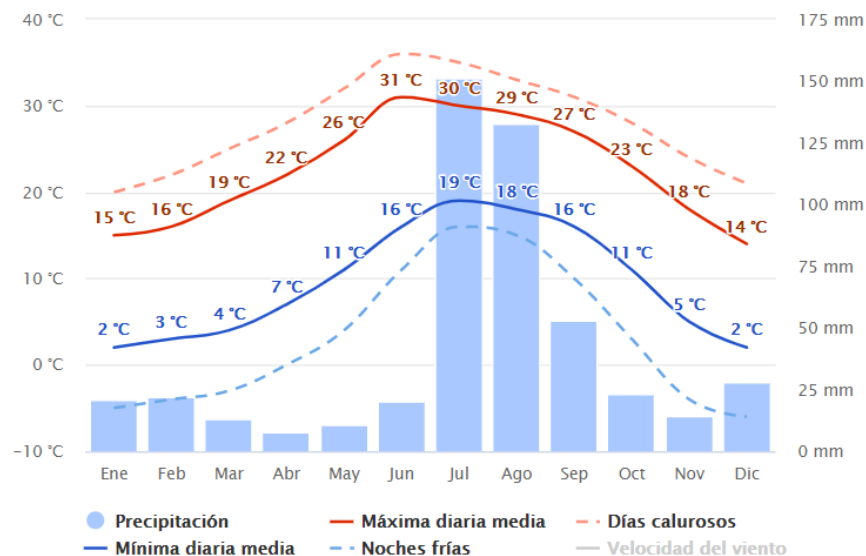


Figura 3.5. Temperatura. Temperaturas medias y precipitaciones del año 2020 en Cananea, Sonora. Tomada de Meteoblue, 2021.

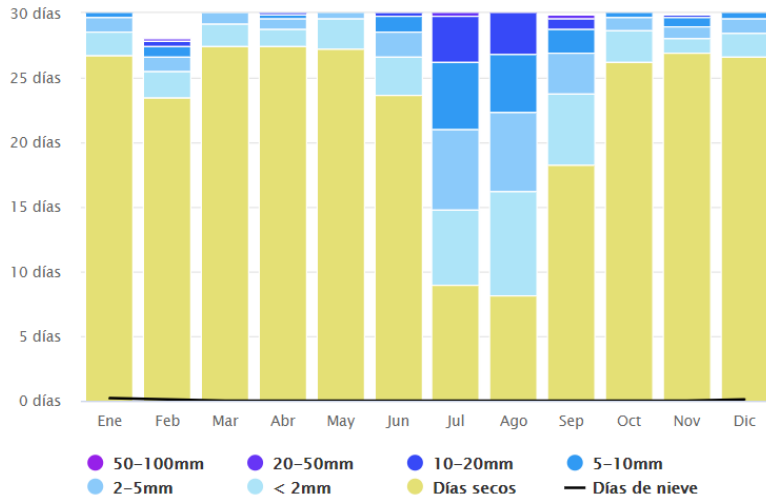


Figura 3.6. Precipitaciones. Cantidad de precipitación del año 2020 en Cananea, Sonora. Tomada de Meteoblue, 2021.

En cuanto a la vegetación (Figura 3.7), en general, hay áreas extensas con cobertura de pastizal, y en las partes altas predomina el bosque, así como zonas de cultivo (INEGI, 2017).

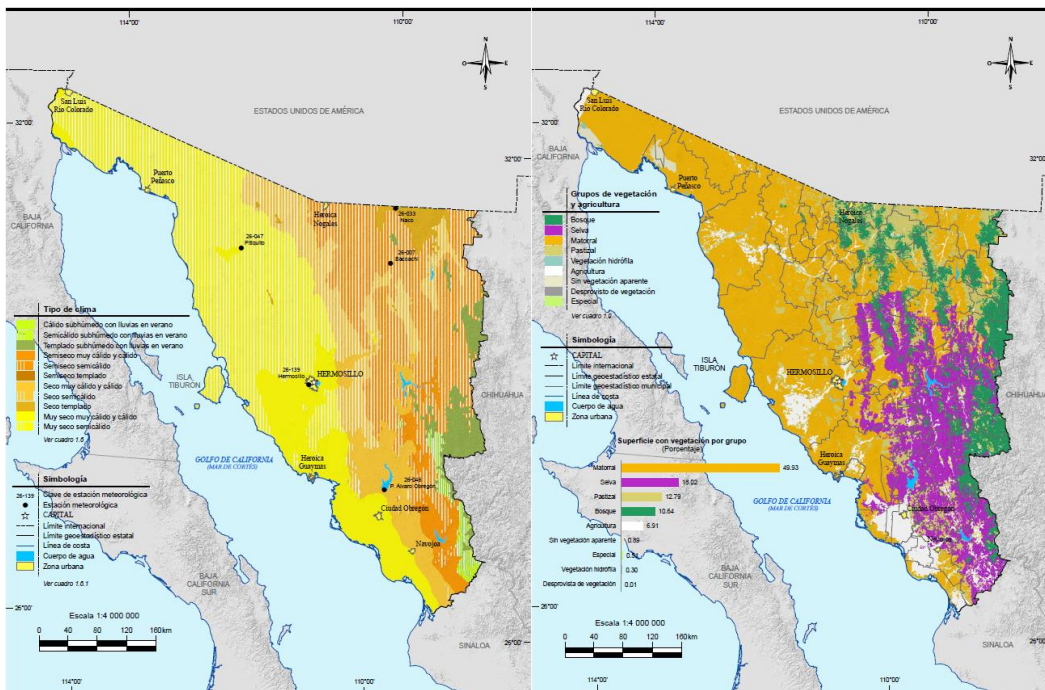


Figura 3.7. Vegetación. En la Imagen del lado izquierdo (a) se aprecia un mapa de climas en Sonora. Del lado derecho (b) un mapa de vegetación dominante en el estado. Tomadas de Anuario estadístico y geográfico de Sonora, 2017.

3.8 Proceso de beneficio

En la zona minera de Cananea se extraen 360,000 toneladas por día de material; de los cuales 76,000 toneladas por día son enviadas a la planta de beneficio, 63,300 toneladas por día de mineral van a lixiviación y 120,000 toneladas por día es tepetate. Lo que indica que la relación roca mineral es de 1.5-1. El material extraído de la mina con contenido >0.30% de Cu va a la planta concentradora, de donde sale con una ley de concentrado de 25 a 26% de Cu con recuperación de 86%. Las leyes de Cu > 0.14 hasta 0.30% de Cu es enviado a los terreros de lixiviación y las colas con contenido de 0.1% de Cu son enviadas a la presa de Jales (SGM, 2012).

Se sabe que en la mina Buenavista del Cobre el mineral de media ley (que se denomina material lixiviable) se deposita en terreros especiales en la periferia de la mina para iniciar el proceso de lixiviación, es decir, riego con ácido y agua. Por su parte, el material de mayor ley se transporta a las quebradoras en el interior de la mina para comenzar con el proceso de trituración.

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener cobre del material que presenta ley media, el cual contiene óxidos y/o sulfuros secundarios. En los patios de lixiviación se apila el material en terrazas de aproximadamente 30 metros de altura. Estas pilas de material se riegan con soluciones diluidas de ácido sulfúrico y agua. El líquido ácido pasa a través del material apilado, reacciona con el mineral y forma una solución de sulfato de cobre. Esta solución baja a los sistemas de bombeo que las llevan hasta unos repesos y luego a pilas de concentración, antes de ser trasladada a una planta ESDE (Extracción por Solventes y Deposición Electrolítica). En la planta se transforman las soluciones de cobre impuro en una solución pura de sulfato de cobre.

3.8.1 Riesgo asociado al proceso de beneficio

Derivado de las operaciones que se llevan a cabo en la mina, existen múltiples riesgos asociados con los diferentes procesos que se realizan todos los días. En particular se destacará el riesgo inherente al proceso de beneficio. Como se mencionó en el apartado anterior, en la mina se utilizan grandes cantidades de ácido sulfúrico que ayuda en el proceso de lixiviación del material que es económicamente rentable. Estas soluciones, al ser almacenadas en grandes represas, representan riesgos potenciales. Aquí se menciona un caso particular ocurrido en las instalaciones de Buenavista del Cobre, con lo que se pretende hacer notar que, incluso mediante condiciones naturales existentes (propias del sitio), puede presentarse amortiguamiento de los elementos potencialmente tóxicos.

3.8.1.1 Estudio de caso en la zona

El 6 de agosto de 2014, cerca de 40000 m³ de solución de ácido, para extracción de cobre, se derramaron desde la Represa Tinajas 1, de la mina Buenavista del Cobre, al arroyo Tinajas (17,6 km), al río Bacanuchi (64 km) y el río Sonora (190 km).

Gutierrez-Ruiz y Romero (2015) mencionan que, por un lado, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reportó las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la solución ácida como se muestra en la Tabla 3.1:

Elemento	Concentración [mg / L]
Fe	1080
Al	461
Cu	114
Mn	98
Zn	51
As	42.7
Ni	11
Cd	7.8
Pb	2.5
Cr	1.5

Tabla 3.1. Concentración de PTE's. Se muestran los datos de concentraciones de elementos potencialmente tóxicos reportados por la CONAGUA. Datos tomados de Rivera-Uria et al., 2019.

Por otro lado, el laboratorio privado ABC Analytic (2014) también informó altas concentraciones de EPT's (Al, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb, Sb y Zn) en muestras de agua superficial y subterránea obtenidas de la Cuenca del río Sonora después del derrame. En mediciones posteriores, se reportó que tres meses después todas las concentraciones de EPTs estuvieron por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; Informe Analítico ABC, 2014). A pesar de que las concentraciones de Fe, Al y Mn fueron elevadas, sus concentraciones se consideraron naturales y asociadas a la fracción de arcilla ($\leq 0.45 \mu\text{m}$).

Adicionalmente, Rivera-Uria et al., (2018) estudiaron la micromorfología de los suelos afectados por el derrame. Estos autores identificaron cambios de color, pH ácido y precipitación de material ferruginoso asociados a la formación de yeso. La cuantificación micromorfométrica de esta precipitación mostró un incremento asociado al efecto de la solución ácida de la mina. Aquí, la hipótesis de trabajo fue que los carbonatos presentes en los suelos y sedimentos del río Bacanuchi y su entorno tenían la capacidad de neutralizar las aguas ácidas derramadas. Como consecuencia, los metales pesados presentes en la solución ácida fueron inmovilizados por diferentes mecanismos, principalmente precipitación, disminuyendo así sus concentraciones en la solución. Para estos carbonatos pedogénicos, Rivera-Uria et al. (2018), demostraron (utilizando una prueba de columna) que la interacción de carbonatos secundarios y la solución ácida promovió la precipitación de los PTEs y la formación de minerales secundarios, como yeso y jarosita.

Romero (2018), como resultado de su investigación referente a suelos y paleosuelos en el arroyo Tinajas, concluyó que un proceso pedogénico adicional es la formación de carbonatos. Su origen se asocia a procesos recientes y podría deberse a la alteración de

minerales primarios (plagioclasas) y/o a su precipitación, en los periodos de secas, a partir del agua del arroyo Tinajas, la cual es bicarbonatada cálcica (Vega-Granillo et al., 2011).

Además estableció que la zona de estudio está dominada por paquetes de rocas ígneas de composición intermedia-ácida con intercalaciones de volcanoclásticos que presentan alteración hidrotermal como propilitización, argilización y oxidación. La asociación mineral de la alteración propilitica incluye a la illita y a la esmectita y en la alteración argílica están presentes arcillas como caolinita, illita y esmectita (Arribas, 1995), así como interestratificaciones de illita-montmorillonita (Mykietiuik et al., 2005). Por lo anterior se puede pensar que los minerales arcillosos de los suelos de la zona ya constituían la mineralogía de las rocas antes de que sus fragmentos fueran trasportados por las corrientes fluviales y depositados aguas abajo.

Lo anterior corresponde con las conclusiones realizadas por Ibarra-Arzave et al., (2019), que establecieron que, los suelos más profundos presentes en la zona son diferentes a los paleosuelos más jóvenes y el suelo moderno. Estos paleosuelos antiguos se caracterizan por presentar mayor porosidad biogenica e iluviación de arcilla, cuya formación requiere lapsos de varios miles de años. Sin embargo, la mineralogía de la fracción arcilla sugiere que existe una contribución importante de arcilla por parte de las rocas con alteración hidrotermal de la zona. De esta forma, el proceso de iluviación de arcilla ocurre en periodos más cortos toda vez que no es necesaria la producción de este material, ya que está originalmente contenida en el material parental (Romero, 2018).

Como puede observarse, incluso bajo condiciones de eventos extremos, existen materiales que, de forma natural, ayudan a mitigar los efectos adversos que estas soluciones ácidas pueden ocasionar en el entorno. Sirva esto como ejemplo de lo que esperamos encontrar

durante nuestra investigación de los jales al estar sometidos a la interacción con agua residual.

3.9 Características reportadas de los jales de la Presa No. 3

En la operación minera existen múltiples riesgos asociados. Como vimos en los apartados anteriores, los riesgos pueden diferenciarse incluso por procesos. En particular nos enfocaremos en la propia operación minera, que para obtener materiales económicamente rentables genera desechos, los cuales representan un riesgo por sí mismos.

Ante esto, es importante señalar algunas de las características más importantes que se han detectado a través de estudios previos en la zona, con el objeto de conocer un poco de las condiciones que encontraremos en la zona de estudio (la presa de jales No. 3).

Algunos investigadores han señalado que estos jales superficiales se caracterizan por las relativamente altas concentraciones totales de Fe, Mn, Cu y Zn. También resaltan que estos jales se caracterizan por las relativamente bajas concentraciones de elementos de naturaleza tóxica como As, Cr, Cd y Pb. Además resaltan que las concentraciones de Ag, Se y Hg no fueron detectadas por las técnicas de análisis utilizadas (Romero et al, 2019).

Mediante las concentraciones totales determinadas lograron concluir que:

- Las concentraciones totales de Pb, Cr, Ba, Cd, Mo y Zn son inferiores a los límites permisibles en suelos de uso residencial.
- En 97% de las muestras, las concentraciones totales de Cu son inferiores a los límites permisibles en suelos de uso residencial; pero en un 100% son inferiores a los límites permisibles en suelos de uso industrial.

- En 89% de las muestras, las concentraciones totales de Mn son inferiores a los límites permisibles en suelos de uso residencial; pero en un 100% son inferiores a los límites permisibles en suelos de uso industrial.
- En 88% de las muestras, las concentraciones totales de Fe son inferiores a los límites permisibles en suelos de uso residencial; pero en un 100% son inferiores a los límites permisibles en suelos de uso industrial.
- En 35% de las muestras, las concentraciones totales de As son inferiores a los límites permisibles en suelos de uso residencial; pero en un 100% son inferiores a los límites permisibles en suelos de uso industrial.

Mediante diversos estudios, los investigadores han establecido que los jales superficiales, de la presa de jales No.3, presentan un valor promedio de pH igual a 4.1, que indica condiciones medianamente ácidas, con un alto valor de conductividad eléctrica (CE, media = 3152 $\mu\text{S}/\text{cm}$), que indica la presencia de sales solubles (Romero et al, 2019).

Los valores CE y pH presentan una correlación lineal negativa, lo que indica que a menor valor de pH (mayor acidez) se corresponde mayor conductividad eléctrica que estaría gobernada por la presencia de los iones de H^+ y SO_4^{2-} , que son los principales productos de la oxidación de los sulfuros metálicos en una presa de jales. Así mismo, los valores de CE tienen una correlación lineal y positiva con las concentraciones totales de Zn, Mn y Cu, lo que parece indicar que los valores de CE están relacionados con la presencia de sales solubles de estos metales, que podrían ser de la familia de los sulfatos.

3.9.1 Valores de pH y pronóstico de movilidad de los EPTs

Derivado del estudio de Romero et al (2019), se sabe que los valores de pH varían entre 2.3 y 8.1 con un valor promedio de 4.1. Lo anterior les permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- El 35% de los valores de pH son menores a 3.5, que indica condiciones ácidas.
- El 42% de los valores de pH varían entre 3.6 y 4.5, que indica condiciones medianamente ácidas.
- El 25% de los valores de pH ($n = 74$) varían entre 4.6 y 8.1, que indica condiciones de medianamente ácidas a cercanas a la neutralidad y hasta ligeramente alcalinas.

Lo anterior, sumado a los valores teóricos de precipitación de los principales metales, mostrados en la Tabla 3.2, permiten pronosticar la movilidad o inmovilidad de los principales metales en la presa de jales No. 3 de Buenavista del Cobre.

Metal	pH
Hierro férrico, Fe^{3+}	3.5
Aluminio, Al^{3+}	4.5
Plomo, Pb^{2+}	6.5
Cobre, Cu^{2+}	7
Zinc, Zn^{2+}	8.5
Manganeso, Mn^{2+}	10.1

Tabla 3.2. Valores de precipitación. Valores de pH teórico de precipitación de diferentes metales. Tomado de Romero et al., 2019.

Es así como concluyeron que, de los metales más abundantes en los jales estudiados, se puede predecir que en la mayor parte de esta presa, donde el pH varía entre 3.5 y 8.1, metales como el Fe, Al, Pb y Cu deben estar relativamente inmóviles, debido a la precipitación de los respectivos minerales secundarios; en cambio, se esperaría mayor movilidad de metales como el Zn y Mn.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Plan de trabajo

Se realizó una salida a campo hacia las instalaciones de la mina Buenavista del Cobre. Se seleccionaron puntos de muestreo dentro de la presa de jales No. 3, en los cuales se realizaron excavaciones de perfiles. También se establecieron puntos de muestreo en suelos naturales de la zona, y otro en el contacto entre los jales de la presa No. 3 con un perfil de suelo aparentemente natural.

4.2 Selección de perfiles de suelo en campo

4.2.1 Muestreo

Para el muestreo de suelos, sedimentos y jales, se seleccionaron diez puntos, ubicados en tres áreas de interés. Estos puntos de muestreo se dividen como se mencionan a continuación.

- Siete se encuentran directamente en los jales de la presa, es decir, fueron excavados en el material de jales mineros.
- Uno está ubicado en lo que se denominó isla en la presa de jales, y se trata de un perfil en suelo aparentemente natural pero que está justo en contacto con jales mineros.
- Los dos restantes se encuentran en suelo natural y están ubicados fuera del perímetro de la presa de jales No. 3.

Cabe aclarar que por cuestiones de permisos otorgados por la mina y tiempo asignado para trabajar en la presa de jales, ambos derivados de la situación de contingencia sanitaria ocasionada por la pandemia de COVID-19 y por seguridad inherente al trabajo que se realiza en este tipo de sitios, se pudieron excavar cuatro de los siete perfiles hasta las profundidades deseadas o pertinentes por seguridad. Los otros tres (PB-02, PC-02 y PD-

02) sólo se pudieron excavar superficialmente hasta la base del primer horizonte. Esto nos ayuda para determinar las condiciones que existen en superficie en ese punto y nos proporciona una idea muy clara de lo que se tiene en ese sector de la presa de jales. El tiempo y las condiciones de trabajo fueron determinantes para tomar estas medidas y se decidió tener un transecto completo (desde PA-01, pasando por PB-01 y finalizando en PC-01) y excavar un perfil más en un sitio en donde se sabe que la influencia del agua residual también es máxima (PA-02).

La selección de los sitios se realizó tomando en consideración el grado de afectación por las descargas de aguas residuales. Para esto se definió una catena, la cual abarca desde la zona con mayor presencia de agua residual hasta la zona en la que, en teoría, no se tiene presencia de dicha agua. Esto significa que algunos perfiles fueron excavados en la zona que muestra la mayor influencia por el agua residual, es decir, que se encuentra inundada por periodos largos de tiempo (PA-01 y PA-02). Otros perfiles se excavaron en la zona del repeso en la que no se aprecia afectación superficial ni somera del agua residual (PB-01), es decir, difícilmente se ve afectada por la descarga de estas. Finalmente, también se realizó excavación de perfil en zona de transición (PC-01), en donde la influencia del agua residual es periódica y/o de corta duración. De estos siete puntos en los jales se obtuvieron un total de 32 muestras (dos por cada horizonte descrito). Un kilogramo de muestra en bolsa para análisis de laboratorio, y una muestra inalterada para posterior análisis micromorfológico.

También se describió un perfil en un punto de contacto entre los jales vertidos en la presa y suelo aparentemente natural. Aquí se obtuvieron ocho muestras (dos por cada horizonte descrito). De igual forma, se tomaron muestras de suelo natural en dos puntos de interés, en dos sitios en los que no se vierten jales mineros (es decir, están fuera de la presa de

jales No. 3). Para estos se seleccionaron dos puntos, uno de suelo en la parte alta de una ladera (con un total de ocho muestras), mientras que el otro suelo se encuentra en la parte baja de la ladera (con diez muestras colectadas). Para cada uno de estos perfiles se tomó un kilogramo de muestra en bolsa para análisis de laboratorio, y una muestra inalterada para posterior análisis micromorfológico. La Figura 4.1 muestra la distribución espacial de los puntos de muestreo. En ella se diferencian los puntos con el siguiente código de colores: los marcadores rojos y amarillos corresponden con los sitios de estudio dentro de la presa de jales, los puntos en color verde son las ubicaciones de los suelos naturales seleccionados y los puntos en azul son las ubicaciones de los repesos de agua residual. Resaltar que los marcadores rojos indican la ubicación de los perfiles con fuerte influencia del agua residual.

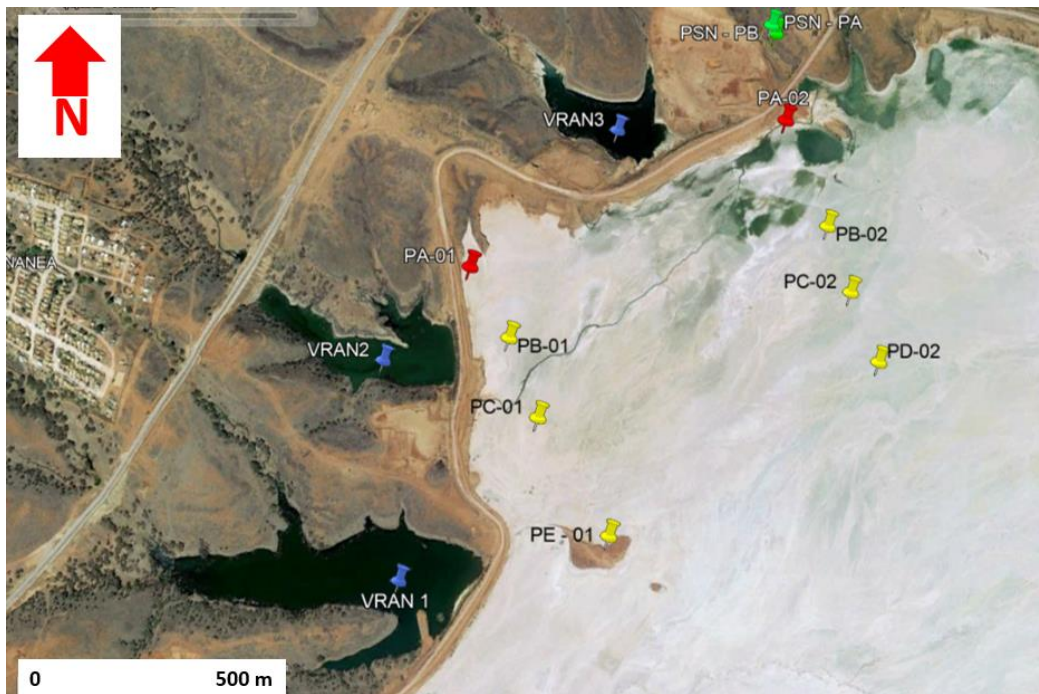


Figura 4.1. Puntos de muestreo. Ubicación espacial de los sitios de excavación de perfiles y toma de muestras. Los rasgos de la imagen no reflejan las condiciones existentes el día del muestreo. Modificada de Google Earth, 2021.

En la Tabla 4.1 se presentan los datos espaciales, de profundidad e identificadores asignados a cada una de las muestras recolectadas durante el trabajo de campo.

Para realizar la excavación de los perfiles se utilizaron palas rectas y palas redondas. Los perfiles intentaron excavar a una profundidad de más de 60 cm, cuando fue posible. La extracción de muestras para análisis de laboratorio y/o micromorfológico, se realizó con una cuchara de acero inoxidable, para evitar contaminación de la muestra, y se almacenaron en bolsas de polietileno, bien selladas, para evitar la pérdida de material. Además se tomaron las muestras inalteradas para elaborar secciones delgadas.

Sitio	Mnemónico	Coordenadas		Perfil	Muestra	Profundidad [cm]	Consecutivo
		X	Y				
Presa de jales No. 3	Perfil A	571277	3427075	PA - 01	20-SONCHN-PA01-M01	0 - 7	1
Presa de jales No. 3	Perfil A	571277	3427075	PA - 01	20-SONCHN-PA01-M02	7 - 30	2
Presa de jales No. 3	Perfil B	571359	3426918	PB - 01	20-SONCHN-PB01-M01	0 - 12	3
Presa de jales No. 3	Perfil B	571359	3426918	PB - 01	20-SONCHN-PB01-M02	12 - 18	4
Presa de jales No. 3	Perfil B	571359	3426918	PB - 01	20-SONCHN-PB01-M03	18 - 50	5
Presa de jales No. 3	Perfil B	571359	3426918	PB - 01	20-SONCHN-PB01-M04	50 - 60	6
Presa de jales No. 3	Perfil B	571359	3426918	PB - 01	20-SONCHN-PB01-M05	60 - 85	7
Presa de jales No. 3	Perfil C	571393	3426915	PC - 01	20-SONCHN-PC01-M01	0 - 10	8
Presa de jales No. 3	Perfil C	571393	3426915	PC - 01	20-SONCHN-PC01-M02	10 - 22	9
Presa de jales No. 3	Perfil C	571393	3426915	PC - 01	20-SONCHN-PC01-M03	22 - 33	10
Presa de jales No. 3	Perfil C	571393	3426915	PC - 01	20-SONCHN-PC01-M04	33 - 60	11
Presa de jales No. 3	Perfil C	571393	3426915	PC - 01	20-SONCHN-PC01-M05	60 - 73	12
Presa de jales No. 3	Perfil A2	571963	3427376	PA - 02	20-SONCHN-PA02-M01	0 - 5	13
Presa de jales No. 3	Perfil B2	571963	3427376	PB - 02	20-SONCHN-PB02-M01	0 - 10	15
Presa de jales No. 3	Perfil C2	571961	3427250	PC - 02	20-SONCHN-PC02-M01	0 - 10	16
Presa de jales No. 3	Perfil D2	572004	3426874	PD - 02	20-SONCHN-PD02-M02	0 - 15	18
Presa de jales No. 3	Isla en la presa	571579	3426496	PE - 01	20-SONCHN-PE01-M01	0 - 10	19
Presa de jales No. 3	Isla en la presa	571579	3426496	PE - 01	20-SONCHN-PE01-M02	10 - 20	20
Presa de jales No. 3	Isla en la presa	571579	3426496	PE - 01	20-SONCHN-PE01-M03	20 - 40	21
Presa de jales No. 3	Isla en la presa	571579	3426496	PE - 01	20-SONCHN-PE01-M03	20 - 40	21
Suelo natural	S. N. Parte baja	571934	3427619	SN - 01	20-SONCHN-SN01-M01	0 - 5	22
Suelo natural	S. N. Parte baja	571934	3427619	SN - 01	20-SONCHN-SN01-M02	5 - 20	23
Suelo natural	S. N. Parte baja	571934	3427619	SN - 01	20-SONCHN-SN01-M03	20 - 50	24
Suelo natural	S. N. Parte baja	571934	3427619	SN - 01	20-SONCHN-SN01-M04	50 - 90	25
Suelo natural	S. N. Parte baja	571934	3427619	SN - 01	20-SONCHN-SN01-M05	90 - 150	26
Suelo natural	S. N. Parte alta	571943	3427602	SN - 02	20-SONCHN-SN02-M01	0 - 4	27
Suelo natural	S. N. Parte alta	571943	3427602	SN - 02	20-SONCHN-SN02-M02	4 - 20	28
Suelo natural	S. N. Parte alta	571943	3427602	SN - 02	20-SONCHN-SN02-M03	20 - 45	29
Suelo natural	S. N. Parte alta	571943	3427602	SN - 02	20-SONCHN-SN02-M04	45 - 90	30

Tabla 4.1. Datos de muestras. Se muestran datos de los sitios seleccionados para excavación de perfil y toma de muestras.

4.3 Preparación de las muestras

4.3.1 Muestras alteradas

Las muestras de jales, suelos y sedimentos obtenidas se sometieron a un proceso de secado, al introducirlas a una estufa BINDER a 40 °C de temperatura. Posteriormente fueron cuarteadas, tamizadas a un tamaño de partícula <2 mm (malla 10) y envasadas en bolsas de polietileno para los análisis de pH y CE.

Para realizar los análisis de la concentración de elementos totales por FRX, las muestras fueron cuarteadas y se obtuvo una porción de 50 gramos, y pulverizadas en un molino pulverizador de anillos concéntricos marca Herzog con recipiente de carburo de tungsteno, finalmente se procedió a un nuevo tamizado de un tamaño de partícula de 250 [µm] (malla 60).

4.3.2 Muestras inalteradas

Las muestras inalteradas que fueron utilizadas para los análisis micromorfológicos también se sometieron a un procedimiento de preparación. Antes de iniciar con la preparación de las secciones delgadas es importante eliminar la humedad de las muestras. Para ello se someten los bloques inalterados a un proceso de secado, al introducirlos a una estufa BINDER con temperatura de 40°C, durante 24 horas.

4.4 Análisis de laboratorio

4.4.1 Parámetros fisicoquímicos (determinación de pH y CE)

Para llevarlo a cabo se utilizaron 50 gramos de muestra disgregada y tamizada en malla 10. Posteriormente se añadieron 50 ml de agua desionizada (agua Milli Q). Esta solución se agitó a 200 rpm durante 30 minutos. Al finalizar, la solución se dejó reposar durante una hora y posteriormente se realizó la lectura del pH y la CE.

La medición de pH se realizó con un equipo Denver Instrument UltrabBASIC (UB) 10, calibrado con las soluciones buffer de pH = 4, pH = 7 y pH= 10.

La medición de la CE se realizó en un equipo OAKTON CON 700, calibrado con una solución de 1413 [μ S/cm].

4.4.2 Análisis textural

De acuerdo con la FAO-UNESCO (2009), la textura del suelo es la proporción relativa de las clases granulométricas (arena, limo y arcilla) en un volumen de suelo dado. Para determinar la clase textural a la que corresponde cada una de las muestras colectadas se empleó la metodología establecida en el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al.*, 2016).

El procedimiento que se realiza es el determinado como la "prueba al tacto". Para realizarla se humedece una pequeña muestra de la fracción fina del suelo (< 2mm) tomada del horizonte a caracterizar. No debe presentar exceso de humedad al momento de presionarla; la muestra se encuentra entonces a "capacidad de campo". Posteriormente se observan las características de moldeado, consistencia y granulometría de la muestra, presionándola y palpándola entre los dedos y moldeándola para formar esferas y rollos. Se hace uso de una tabla que contiene una clave para la designación de la clase textural. A partir de un diagrama de texturas se puede determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla que corresponde a cada clase textural.

4.4.3 Color

El color del suelo responde a su composición y a las condiciones de óxido-reducción presentes y/o pasadas. Un color oscuro se atribuye a la presencia de materia orgánica humificada, colores amarillos, pardos, anaranjados y rojos se relacionan con la presencia de óxidos de hierro, mientras que el color negro puede deberse a óxidos de manganeso. El color también puede deberse al del material parental (FAO-UNESCO, 2009).

Para determinar el color al que corresponde cada una de las muestras colectadas se empleó la metodología establecida en el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al.*, 2016). Los colores referencia fueron consultados en la tabla de colores de suelo Munsell (Munsell Color, 2013). Para ello la muestra deberá ser humedecida, para permitir la comparación de un horizonte con otro. La notación de las tablas de color es una designación sistemática con letras y números de las tres propiedades del color: matiz, pureza (de oscuro a claro) e intensidad.

4.4.4 Concentraciones totales por FRX

Se realizó la determinación de concentraciones totales de la suite de elementos: As, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Ti, V y Zn; empleando el analizador portátil de FRX “Niton XL3t Ultra” de Thermo Scientific, en su modo de suelos con tres filtros y un tiempo de análisis de 30 s por cada filtro de acuerdo con el método estandarizado US-EPA 6200 (US EPA, 2007).

La concentración total se midió en cada muestra usando 5 gramos de suelo pulverizado en mortero de ágata, tamizados a malla 60 y colocados en una bolsa de plástico para su análisis mediante FRX. El equipo de medición se calibró con una muestra blanco y después se determinó por triplicado la concentración de los elementos mayores y traza en el estándar certificado MONTANA 2710a.

Para evaluar la calidad del análisis se determinó el porcentaje de exactitud (% E) de las mediciones de los elementos en los estándares certificados y el porcentaje del coeficiente de variación (% CV) de las concentraciones determinadas para cada elemento en las muestras de suelo. Los resultados se consideraron aceptables cuando el %E fue ≥ 80 % y el % CV fue ≤ 20 % (Geboy & Engle, 2011; Pollution Control Agency, 2017).

4.5 Difracción de Rayos X (DRX)

La DRX es una técnica utilizada en la identificación de los minerales que poseen una estructura interna ordenada, y está basada en la interferencia de un haz de rayos X con la red cristalina del material (Carretero y Pozo, 2008). La técnica fue aplicada a un conjunto limitado de muestras seleccionadas representativas: una muestra de roca del yacimiento, una muestra de jal sin oxidar, una muestra de jal oxidado, una muestra de jal que está en contacto con el agua residual y una muestra de suelo natural. Este estudio se realizó con el objetivo de identificar su composición mineralógica total y determinar la mineralogía de las arcillas, que son componentes importantes para el desarrollo de estructura y formación de compuestos organominerales.

4.5.1 Procedimiento para la obtención de difractogramas

Los difractogramas se obtuvieron en un Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D. Las muestras para estudio de composición mineralógica total se homogeneizaron mediante un mortero de ágata y se midieron utilizando un portamuestras de aluminio de doble carga. La medición se realizó en el intervalo angular 2θ de 5° a 70° en escaneo por pasos con un "step scan" de 0.003° (2 Theta) y un tiempo de integración de 40s por paso. La identificación y semicuantificación de las fases se realizó mediante el software HIGHScore v4.5 y las bases de datos del ICDD (International Center for Diffraction DATA) y ICSD (Inorganic Crystal Structure Database).

4.5.2 Mineralogía total y mineralogía de arcillas

Su determinación se realizó en muestras homogenizadas con partículas menores a $75\ \mu\text{m}$ (malla 200). Las arcillas se analizaron en muestras orientadas. La aplicación de la técnica de DRX en muestras orientadas sirve para medir el espaciamiento interlamilar de las arcillas e identificar el grupo al que pertenecen, de acuerdo a la posición de los picos en el

difractograma y que está determinada por la Ley de Bragg: $n\lambda = 2d \cdot \sin\Theta$ (λ = longitud de onda de los rayos X).

4.5.3 Muestras de arcilla orientada

Para la preparación de arcillas orientadas se utilizaron aproximadamente 20 gramos de cada muestra tamizada (malla #10 para muestras de suelo y malla #62 para muestras de roca), se colocaron en frascos plásticos con 10 ml de dispersante $(\text{NaPO}_3)_6$ y 50 ml de agua destilada, sometiéndose a agitación orbital durante 24 horas para después colocarse en probetas que se aforaron a un litro con agua destilada. Para el caso de las muestras en que su sedimentación era muy rápida, se añadió $(\text{NaPO}_3)_6$ adicional directamente en la probeta cuidando de no rebasar el volumen de 1 litro.

Después de agitar vigorosamente el contenido de cada probeta, se dejó sedimentar por aproximadamente 7 horas para después recuperar la fracción arcilla contenida en los primeros 300 mililitros mediante sifoneo, este paso se repitió varias veces hasta obtener una cantidad considerable de muestra. La muestra recuperada se colocó en vasos plásticos para saturar las arcillas con cloruro de magnesio (MgCl_2) 1M hasta que éstas se sedimentaran. Una vez que las arcillas sedimentaron, se retiró el agua sobrenadante mediante sifoneo. Las arcillas fueron enjuagadas de 3 a 5 veces con agua destilada, usando una centrífuga ROTANTA 46 marca Hettich, a 3000 RPM durante 3 minutos para después colocar por triplicado un volumen conocido de muestra en vidrios de reloj previamente pesados. Cuando se secaron las muestras, se volvieron a pesar los vidrios de reloj para determinar el contenido de arcilla.

Ya que distintos minerales arcillosos presentan picos característicos similares, para una identificación más certera, el análisis de cada muestra se realizó por triplicado, aplicándose en una muestra de arcilla orientada sin ningún tratamiento, en una muestra glicolada y en

una muestra calentada a una temperatura ≥ 450 °C. Dichos tratamientos diferenciales se aplicaron en las muestras debido a que en las arcillas expandibles el espacio interlaminaar incrementa de $\sim 12-14$ a ~ 17 Å cuando son glicoladas, y se reduce a ~ 10 Å cuando las arcillas son sometidas a calentamiento (~ 400 °C). Por otro lado, la estructura de las arcillas caoliníticas colapsa cuando son sometidas a calentamiento (~ 550 °C) (USGS, s.f.).

4.6 Análisis de fertilidad de suelos

Se realizó una selección de muestras representativas, las cuales comprenden: muestras de perfiles ubicados dentro de la presa de jales, del perfil que muestra la mayor afectación por agua residual (PA01), del perfil que tiene nula o escasa interacción con la misma agua (PB01), así como el perfil que se ubica en la zona de transición (PC01), todos pertenecientes al primer transecto. Del segundo transecto se enviaron muestras de los perfiles PA02, PB02 y CD02.

Estas muestras se enviaron para su análisis al laboratorio Fertilab, que es un laboratorio mexicano de análisis agrícolas que cumple con la Norma NMX-EC-17025-IMNC-2018 (ISO/IEC 17025:2017), está certificado por ISO 9001:2015 y acreditado en México y EUA por los programas de Intercomparación NAPT (North American Proficiency Testing), CAP (Compost Analysis Proficiency), MAGRUDER y la SMCS.

Este es un servicio que determina el contenido de nutrimentos en el suelo y algunas propiedades físicas que permiten evaluar desbalances nutrimentales y limitantes para la producción. Mediante la interpretación de este análisis se pueden, por ejemplo, lograr altos rendimientos gracias a una adecuada nutrición de los cultivos, reduciendo el gasto en fertilizantes y conservando la fertilidad del suelo.

4.7 Micromorfología

4.7.1 Elaboración de secciones delgadas y análisis micromorfológico

La micromorfología es una técnica para describir, interpretar y medir componentes y características del suelo a escala microscópica (Bullock et al., 1985 en Soil Science Society of America, 2017), por lo cual fue utilizada para observar rasgos edáficos que permitan hacer una interpretación de las condiciones de formación del suelo así como determinar la mineralogía original y la de neoformación.

La elaboración de las láminas delgadas se inició al eliminar la humedad de los bloques de suelo inalterados extraídos en campo. Para ello fueron sometidos a 40 °C dentro de una estufa BINDER durante 24 horas. Después se impregnaron con una mezcla consistente de resina de poliéster, monómero de estireno, peróxido de metil etil cetona y catalizador K-2000, y se introdujeron en una cámara de vacío a una presión de aproximadamente 22 atmósferas por 30 minutos para favorecer el ingreso de la resina dentro de los poros. Posteriormente, los bloques fueron expuestos a la luz solar para su total endurecimiento. Cuando los bloques de suelo se encuentran completamente endurecidos, se realiza el corte, utilizando una cortadora MK PRO SERIES con disco de diamante. Una de las caras se pulió con lijas de agua del número 120, 220, 360 y 400 para después pegarse en un portaobjetos petrográfico (previamente lijado), con resina ultravioleta. Posteriormente se adelgaza en una cortadora petrográfica BUEHLER. El adelgazamiento de la lámina se concluyó con lijas de agua de los números ya mencionados y con abrasivo de carburo de tungsteno en polvo hasta dejarla con un grueso de aproximadamente 30 micras. Una vez pulidas con óxido de silicio, se colocó un cubreobjetos a cada lámina.

Para efectos de este estudio se utilizó un microscopio petrográfico Olympus América BX51 con objetivos 2X, 4X, 10X y 40X, equipado con una cámara fotográfica CoolSNAP-Pro COLOR de MEDIA CYBERNETICS. Para discriminar entre los minerales de hierro y los de manganeso, se utilizó una lámpara de luz transmitida CL 1500 ECO marca ZEISS.

5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos (textura, colorimetría, pH, CE) y micromorfológicos realizados para las muestras de los perfiles y los bloques de suelo estudiados. También se presentan los resultados de FRX de las muestras analizadas.

5.1 Estudios morfológicos de campo

Se realizó el análisis textural en cada una de las muestras colectadas. Los resultados se presentan a continuación, como parte de la descripción del perfil.

El perfil más intensamente afectado por el agua residual (Figura 5.1) presenta texturas (Tabla 5.1) franco arcillo arenosa (CRA) y arcillo limosa (RL), para el horizonte más superficial y el inmediato inferior, respectivamente. Los otros dos perfiles que se encuentran en el interior de la presa de jales (PB-01 y PC-01) tienen texturas arcillo limosa (RL) y arenosa franca (AC), intercaladas una a una en sus horizontes, siendo la textura del horizonte más superficial la arcillo limosa.

En el perfil de la isla en la presa de jales (PE-01) se observaron las texturas siguientes: franco arcillosa (CR), franco limosa fina (CLf), franco arcillosa (CR) y arcillo arenosa (RA), para cada uno de los horizontes, de superficie a base, respectivamente.

El perfil de suelo natural en la parte alta de la ladera (PSN PA), presentan las siguientes texturas: franco limosa fina (CLf), arcillo limosa (RL), arcillo arenosa (RA) y arcillo arenosa (RA), nombrados del más superficial al más profundo. Para el perfil de suelo natural ubicado en la parte baja de la ladera (PSN PB) se determinaron las texturas siguientes: franco arcillo

arenosa (CRA), arcillo arenosa (RA), franco arcillo limosa (CRL), franco arcillo limosa (CRL) y arcillo arenosa (RA), nombrados del más superficial al más profundo

A continuación se presentan las descripciones realizadas en campo para cada uno de los perfiles.

5.1.1 Perfil PA-01

PA-01	Profundidad	Descripción en campo
Ah	0 – 10 cm	Horizonte con aparente contenido orgánico. Abundante presencia de raíces finas a muy finas. Muy poroso. Se determinó una textura franco arcillo arenosa (CRA). Color marrón amarillento (10YR 5/4). Agregados sub angulosos a sub redondeados. Se aprecian fragmentos de cuarzo y presencia de óxidos. Se observa una capa de materiales oxidados muy cerca de la superficie. Presencia de algas verdes en los primeros milímetros de la capa.
C ₁	10 – 30 cm	Horizonte de textura arcillo limosa (RL). Color gris (5Y 6/1). Fragmentos sub angulosos a sub redondeados. Muy poroso y completamente saturado con agua. Después de realizar la excavación el nivel freático se recuperó a 18 cm de profundidad. Se aprecian costras de sal en superficie. Ligera presencia de raíces muy finas.

Tabla 5.1. Descripción del perfil PA-01. Se aprecian los datos de la descripción del perfil realizada en campo.

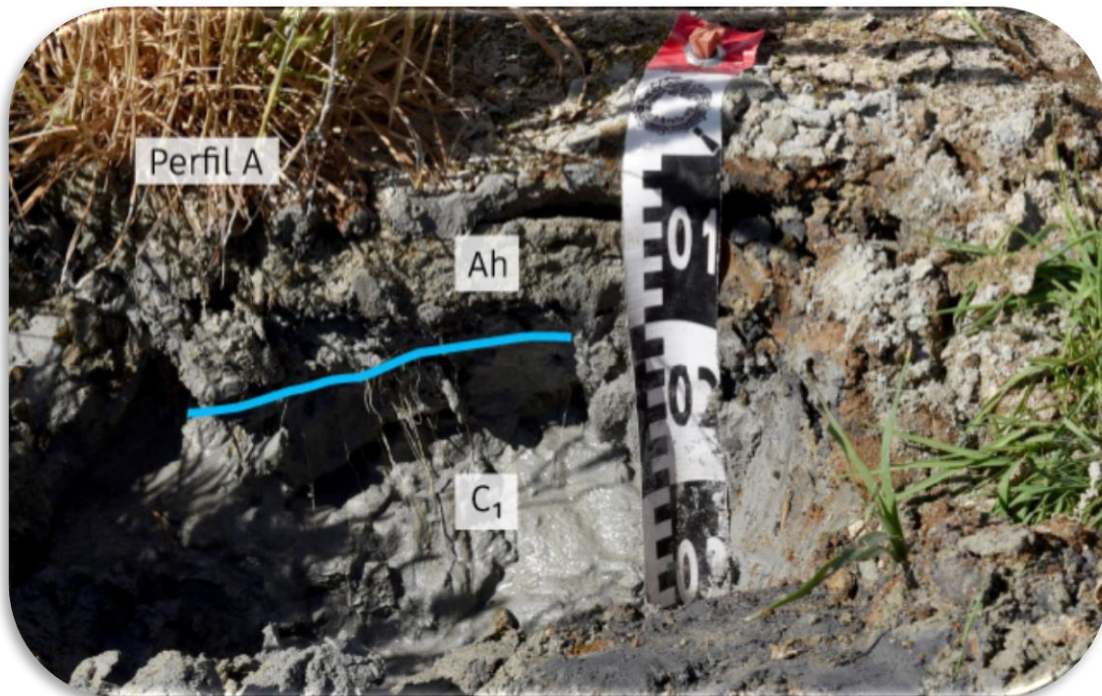


Figura 5.1. Perfil PA-01. Detalle del perfil A (PA-01). Se aprecian los dos horizontes descritos en el perfil.

5.1.2 Perfil PB-01

PB-01	Profundidad	Descripción en campo
C ₁	0 – 10 cm	Textura arcillo limosa (RL). Color gris (5Y 6/1). Se observan residuos de cobre en superficie. También se aprecia oxidación. Horizonte con abundante efecto de intemperismo. No se aprecian raíces.
C ₂	10 – 20 cm	Textura arenosa franca (AC). Color gris parduzco claro (2.5Y 6/2). Se aprecia abundante presencia de residuos de sulfuros (probablemente pirita). Horizonte poroso. No se observó presencia de raíces.
C ₃	20 – 50 cm	Horizonte de textura arcillo limosa (RL). Color gris (5Y 6/1). Se aprecian grietas y motas de oxidación. No se aprecia evidencia de raíces.
C ₄	50 – 60 cm	Horizonte de textura arenosa franca (AC). Color gris parduzco claro (10YR 6/2). Se aprecian residuos de cobre, pero en menor cantidad que en los horizontes superiores. No se observó evidencia de raíces.
C ₅	60 – 85 cm	Horizonte de textura arcillo limosa (RL). Color gris (5Y 6/1). Se aprecian pocas grietas. Sin rastro de raíces.

Tabla 5.2. Descripción del perfil PB-01. Se aprecian los datos de la descripción del perfil realizada en campo.

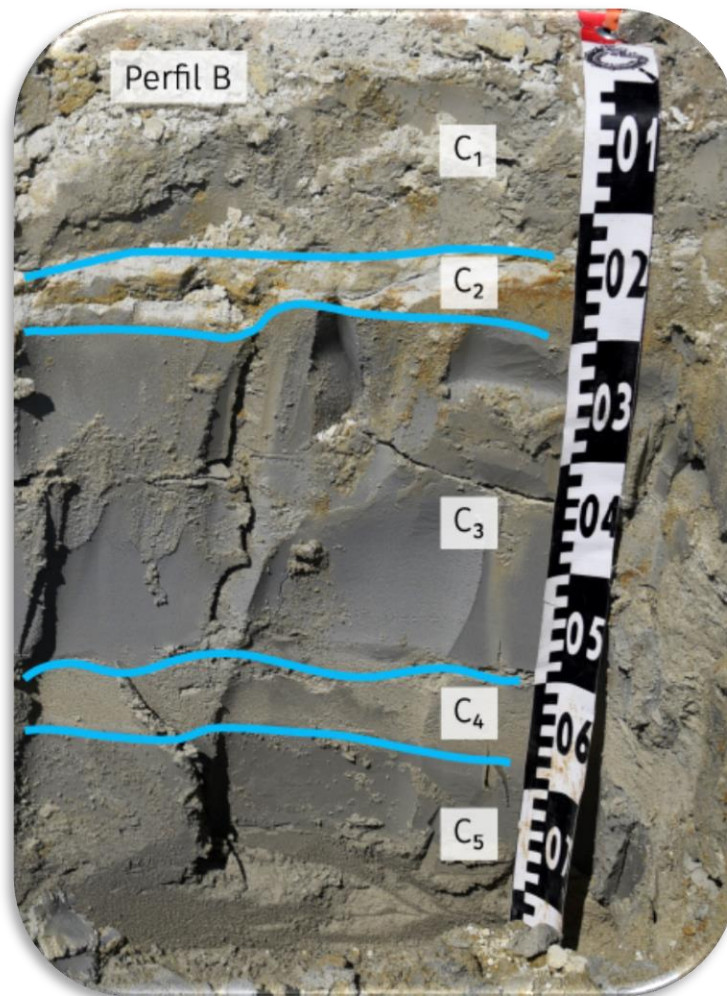


Figura 5.2. Perfil PB-01. Detalle del perfil B (PB-01). Se aprecian los cinco horizontes descritos en el perfil.

5.1.3 Perfil PC-01

PC-01	Profundidad	Descripción en campo
C ₁	0 – 10 cm	Horizonte de textura arcillo limosa (RL). En el primer centímetro se aprecia una zona oxidada y algas verdes. Color gris (5Y 6/1). Estructura compacta. Se observan varias zonas fracturadas dentro de este horizonte. No se aprecia evidencia de raíces.
C ₂	10 – 22 cm	El horizonte presenta textura arenosa franca (AC). Color marrón amarillento claro (2.5Y 6/3). Se aprecian sectores de cambio de color, posiblemente asociado a mayor oxidación. Horizonte poroso. Fácilmente deleznable en muestra de mano. No se observa rastro de raíces.
C ₃	22 – 33 cm	Horizonte de textura arcillo limosa (RL). Color gris (5Y 6/1). Estructura compacta. Se aprecia presencia de raíces y motas de oxidación, probablemente el patrón es biogénico. Se observan grietas rellenas con el material arenoso proveniente del horizonte superior.
C ₄	33 – 60 cm	Horizonte de textura arenosa franca (AC). Color gris parduzco claro (2.5Y 6/2). Horizonte poroso. Fácilmente deleznable en muestra de mano.
C ₅	60 – 73 cm	Horizonte de textura arcillo limosa (RL). Color gris (5Y 6/1). Estructura compacta. Parece ser el más húmedo de los tres horizontes arcillo limosos. Se observan raíces muy finas en el horizonte.

Tabla 5.3. Descripción del perfil PC-01. Se aprecian los datos de la descripción del perfil realizada en campo.

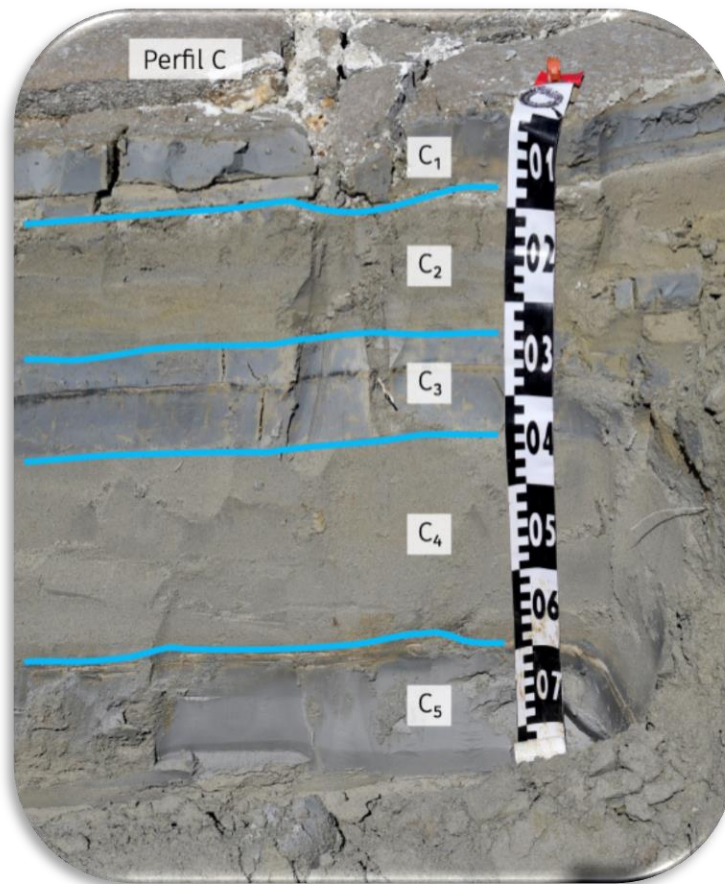


Figura 5.3. Perfil PB-01. Detalle del perfil C (PC-01). Se aprecian los cinco horizontes descritos en el perfil.

5.1.4 Perfil PE-01

PE-01	Profundidad	Descripción en campo
AB	0 – 9 cm	Horizonte de textura franco arcillosa (CR). Color 2.5YR 3/4. Estructura granular y subangular. Fragmentos angulosos a sub redondeados. Se aprecian fragmentos de roca y de cuarzo. Pedregosidad menor al 5%. Material muy poroso, con presencia de muchas raíces medias, finas y muy finas.
Bw	9 – 35 cm	Horizonte de textura franco limosa fina (CLf). Color 2.5YR 4/4. Estructura en bloques subangulares. Presencia de raíces medianas a finas. Se aprecian fragmentos de cuarzo y de roca. Pedregosidad aproximada del 10%. El material se rompe con relativa facilidad.
BC ₁	35 – 117 cm	Horizonte con textura franco arcillosa (CR). Color 2.5 YR 3/4. Presenta porosidad media y es difícil de romper. Se observa pedregosidad mayor al 15%, con clastos entre 3 y 10 cm. Estructura angular a subangular que rompe a subangular en bloques.
BC ₂	117 – 173 cm	Horizonte de textura arcillo arenosa (RA). Color 2.5YR 3/6. Se observa pedregosidad mayor al 25%, con clastos entre 3 y 10 cm. Estructura angular a subangular que rompe a subangular en bloques. Este horizonte es aún más compacto que el superior.

Tabla 5.4. Descripción del perfil PE-01. Se aprecian los datos de la descripción del perfil realizada en campo.

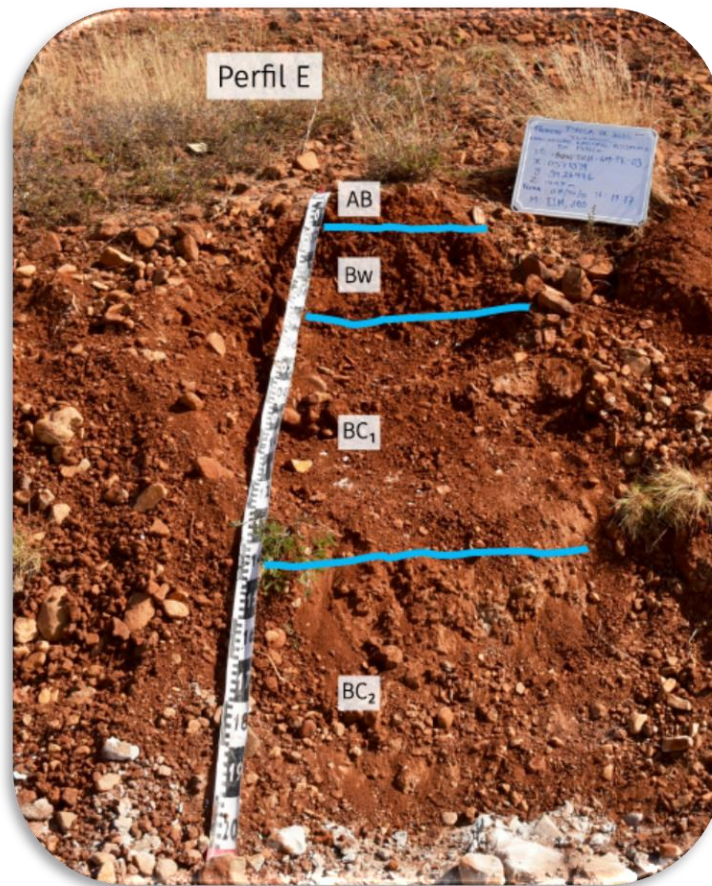


Figura 5.4. Perfil PE-01. Detalle del perfil E (PE-01). Se aprecian los cuatro horizontes descritos en el perfil.

5.1.5 Perfil PSN PA

Suelo natural parte alta	Profundidad	Descripción en campo
BA	0 – 3 cm	Horizonte de material fino compacto. Textura franco limosa fina (CLf). De color 7.5YR 3/4. Estructura subangular en bloques. Se aprecia pedregosidad mayor al 25%. Se observa evidencia de raíces en el horizonte.
Bw	3 – 20 cm	Horizonte de textura arcillo limosa (RL). Color 5YR 3/4. Estructura subangular. Con abundantes raíces finas y pedregosidad mayor al 50%.
Bt(g)	20 – 45 cm	Horizonte de textura arcillo arenosa (RA). Color 5YR 4/6. Estructura subangular. Se aprecia pedregosidad mayor al 70%. Muy poca presencia de raíces.
Bt(c)	45 – 90 cm	Horizonte de textura arcillo arenosa (RA). Color 2.5 YR 4/6. Estructura subangular. Se aprecian manchas o motas, que probablemente sean de Fe y/o Mn. Se observa pedregosidad aproximada del 50%. Se observa escasa evidencia de raíces.

Tabla 5.5. Descripción del perfil PSN PA. Se aprecian los datos de la descripción del perfil realizada en campo.

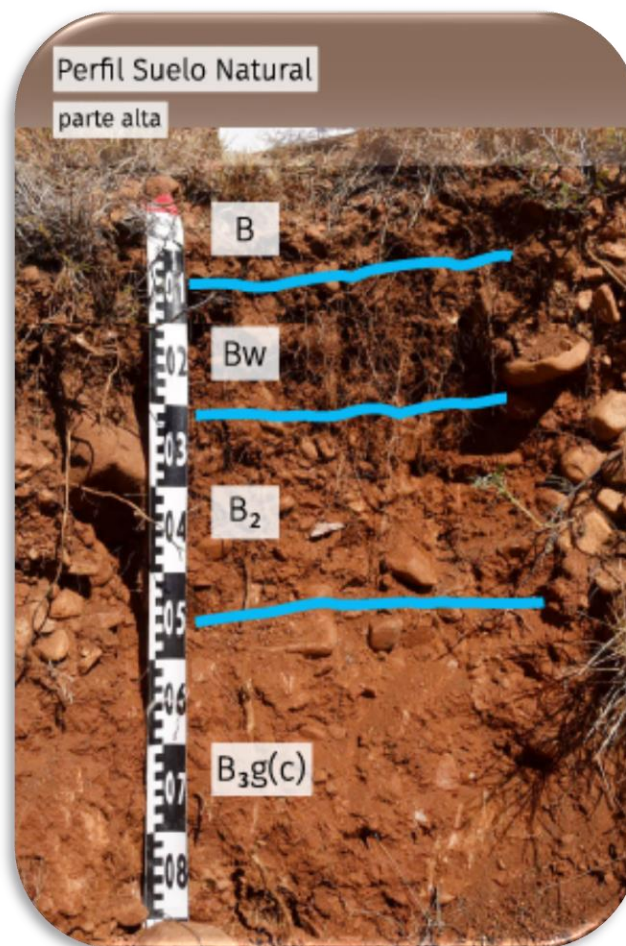


Figura 5.5. Perfil PSN PA. Perfil de suelo natural en parte alta de la ladera (PSN PA).

5.1.6 Perfil PSN PB

Suelo natural parte baja	Profundidad	Descripción en campo
BA	0 – 5 cm	Horizonte de material fino compacto de color marrón oscuro (7.5YR 3/3). Textura franco arcillo arenosa (CRA). Se observa presencia de raíces. No se aprecia pedregosidad.
Bw ₁	5 – 20 cm	Horizonte con textura arcillo arenosa (RA). Color 5YR 3/2. Se aprecian algunas raíces muy finas. Estructura subangular y pedregosidad aproximada del 10%, con fragmentos menores a 2.5 cm.
Bw ₂	20 – 50 cm	Horizonte de textura franco arcillo limosa (CRL). Color 7.5YR 2.5/3. Estructura subangular. Pedregosidad aproximada del 30% de fragmentos mayores a 5 cm. Con pocas raíces finas.
Bg	50 – 90 cm	Horizonte de textura franco arcillo limosa (CRL). Color 5YR 3/4. Estructura subangular. Pedregosidad aproximada del 45%. Pocas raíces medias. Probables concreciones de Fe y Mn. No se observaron raíces.
BCtg	90 – 150 cm	Horizonte de textura arcillo arenosa (RA). Color 5YR 3/4. Con pedregosidad mayor al 70%. Probables concreciones de óxidos de Fe y/o Mn. No se apreciaron raíces.

Tabla 5.6. Descripción del perfil PSN PB. Se aprecian los datos de la descripción del perfil realizada en campo.

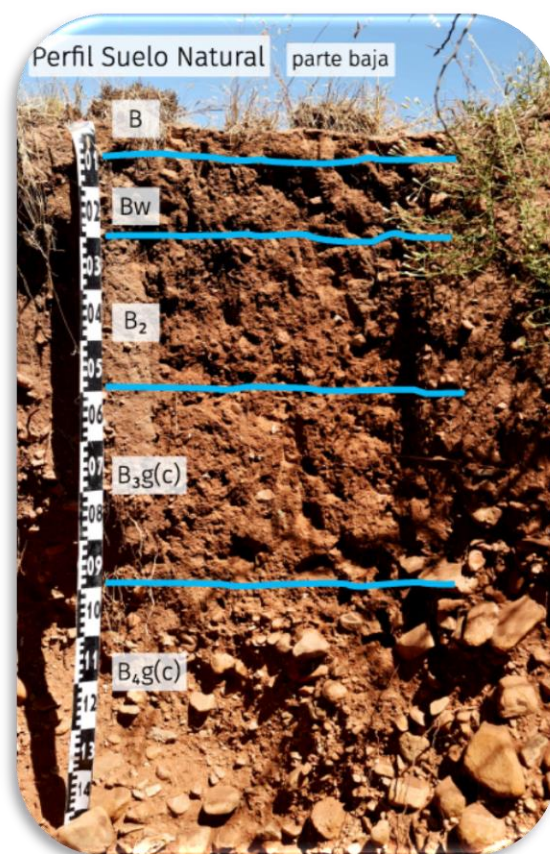


Figura 5.6. Perfil PSN PB. Perfil de suelo natural en parte baja de la ladera (PSN PA).

5.2 Secciones delgadas y análisis micromorfológico

Se elaboraron treinta secciones delgadas mediante la técnica descrita en el apartado de materiales y métodos. A continuación se presentan las observaciones derivadas del estudio de estas.

5.2.1 Micromorfología en los perfiles de la presa de jales No. 3

En la presa de jales No. 3 se excavaron cuatro perfiles. Los tres primeros corresponden con una catena que se definió en una sección que abarca desde la zona con mayor presencia de agua residual hasta la zona en la que, en teoría, no se tiene afectación por agua residual. El perfil restante se ubicó en otra zona con la máxima influencia del agua, pero alejado de la zona de colecta de la primera muestra, con el fin de comparar el efecto que producen estas aguas sobre los jales.

La micromorfología de los perfiles (PA-01 y PA-02) que presentan la mayor influencia del agua residual muestra granos de minerales como cuarzo y feldespatos, que presentan distintos tamaños, siendo los mayores de aproximadamente 120 μm . Estos fragmentos están en contacto grano a grano, algunos muestran poca evidencia de oxidación y se aprecian subangulares a sub redondeados. Se aprecia abundante contenido de restos de raíces (Figura 5.7) y bioturbación producida por estas, así como poca presencia de oxidación de sulfuros (en comparación con muestras evaluadas de las otras zonas). También se pudieron definir proto agregados, que se distinguen por la acumulación de partículas minerales alrededor de las raíces.

En estas secciones delgadas se aprecia una zona de coloración parda, próximas a los sitios en los que se encontraron las acumulaciones de raíces. En las zonas en las que se observan los restos de raíces, se aprecia mayor porosidad, poros más grandes ocasionados

por la bioturbación. Los fragmentos de raíces varían desde medianamente preservadas hasta avanzado de descomposición. El fragmento observado de mayor tamaño es de poco más de 600 µm. También se aprecian minerales opacos, que en este caso corresponden con los residuos sulfurosos y óxidos que resultan del proceso de beneficio de la mina, lo que se comprueba al observarlos sin analizador y con luz reflejada, momento en el que se perciben destellos dorados y rojos, respectivamente.

En la zona en la que existe muy escasa a nula influencia del agua residual se tiene al perfil PB-01. La micromorfología de estas secciones delgadas refleja oxidación de sulfuros y de los minerales en general (oxidación bastante más intensa que en los perfiles previos). En estas muestras no se encontró evidencia de fragmentos de raíces ni porosidad asociada a la bioturbación.

En general, se aprecian fragmentos minerales muy finos que otorgan la apariencia de una matriz que embebe a pocos fragmentos minerales más gruesos. Se detectó gran presencia de cuarzos y de feldespatos en menor medida. Los granos se encuentran desde angulares hasta subangulares. Los minerales opacos observados varían desde anhedrales hasta euhedrales (Figura 5.8), algunos formando parte de la matriz de las muestras y otros que aún forman parte de los fragmentos de roca originales en los que se encontraban.

La oxidación presente en estas muestras puede describirse como más intensa que la observada en el perfil que presenta el mayor impacto del agua residual. También se encontró evidencia de materiales arcillosos que forman parte de la matriz de las secciones.

Si se evalúan las muestras de forma vertical aumentando la profundidad, se encontró un aumento de los fragmentos minerales, es decir, los elementos más finos se observaron en

los horizontes más superficiales mientras que los más gruesos están en los horizontes más profundos.

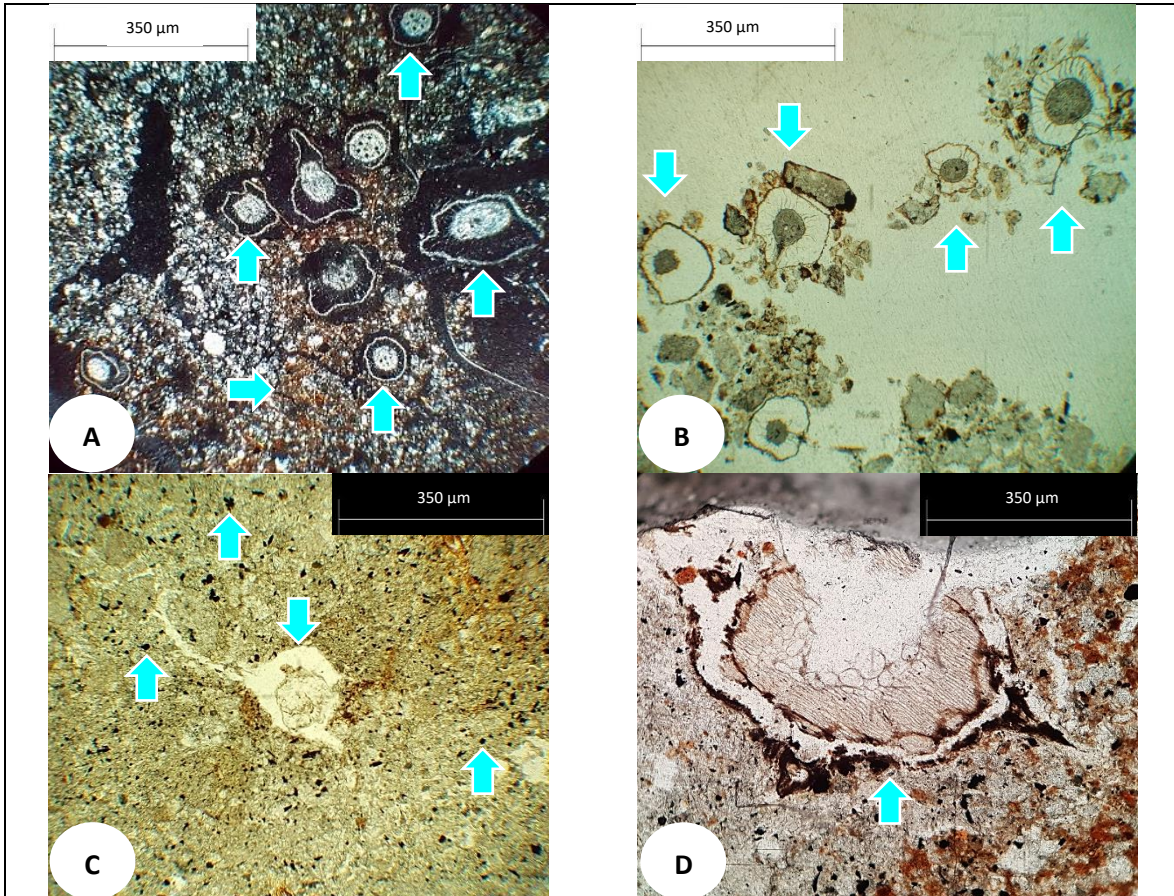


Figura 5.7. Micromorfología de los perfiles PA-01 y PA-02. Microestructura en materiales de desecho minero en un perfil en la presa de jales No. 3 en Cananea, Sonora. El perfil PA01 cuenta con dos horizontes. También se incluye aquí la sección delgada del horizonte superficial del perfil PA02, pues ambos perfiles se encuentran en contacto con agua residual. (A) Nícoles cruzados. Se aprecia la forma en la que las raíces se abren paso a través del suelo (↑) en el horizonte A. Se distingue una de coloración marrón que puede estar ocasionada por la descomposición de materia orgánica y oxidación de minerales (⇒). (B) Sin analizador. Se aprecian formaciones de proto agregados (↓, ↑) generados por las raíces. (C) Sin analizador. Presencia de raíces que generan porosidad (↓) en el horizonte C. En este la cantidad de raíces es menor que en el horizonte A. Adicionalmente se aprecia gran presencia de sulfuros (↑) que en luz transmitida se aprecian como puntos negros. (D) Sin analizador. Raíz en el horizonte C que muestra evidencias de coloración (↑) por la descomposición de sus tejidos.

La micromorfología del perfil PC-01 (Figura 5.9), que se encuentra en zona de transición, es decir, tiene influencia de agua residual por periodos de tiempo y posteriormente se encuentra sin influencia de esta, refleja oxidación de sulfuros (aunque en menor medida que lo observado en el perfil PB-01), tiene presencia de raíces, bioturbación originada por las raíces y presencia de materiales arcillosos que forman parte de la matriz.

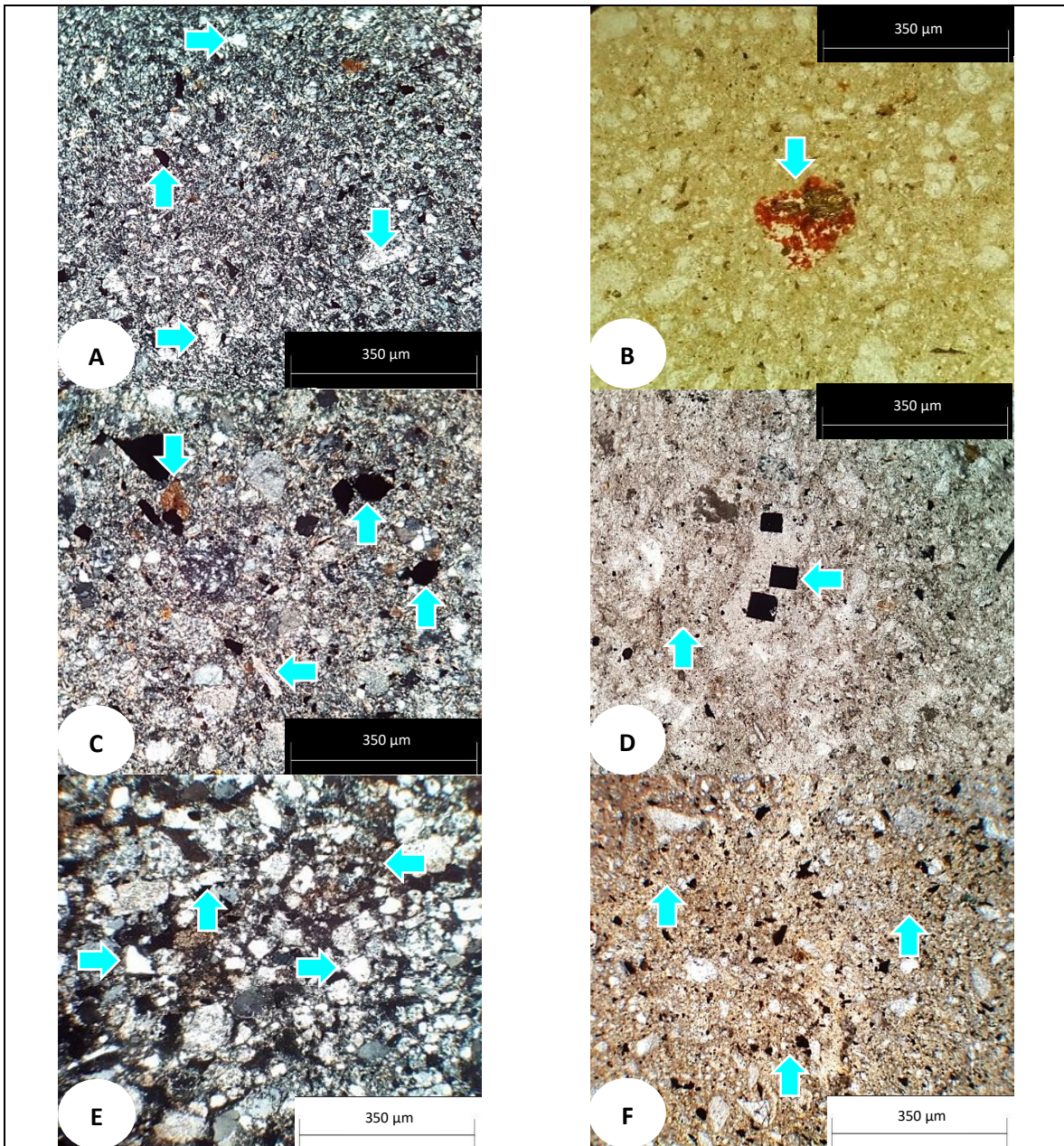


Figura 5.8. Micromorfología del perfil PB-01 Microestructura en materiales de desecho minero en un perfil de la presa de jales No. 3 en Cananea, Sonora. Este perfil cuenta con cinco horizontes. (A) Nícoles cruzados. Se aprecian granos de cuarzo (\Rightarrow) y feldespatos (\Downarrow) embebidos en una matriz fina. También contiene abundancia de sulfuros ($\hat{\uparrow}$). (B) Luz transmitida + luz reflejada. Evidencia de oxidación de los sulfuros (\Downarrow). Los bordes de ataque son irregulares. (C) Nícoles cruzados. Presencia de sulfuros ($\hat{\uparrow}$), feldespatos (\Leftarrow) y minerales oxidados (\Downarrow). (D) Sin analizador. Evidencia de sulfuros de hierro (\Leftarrow) poco alterados en el horizonte más profundo del perfil excavado. La coloración ocre en la matriz ($\hat{\uparrow}$) es debida a la presencia de materiales arcillosos. (E) Nícoles cruzados. Una porción de la sección delgada con fragmentos minerales más gruesos. Se resaltan fragmentos de cuarzo (\Rightarrow), feldespatos ($\hat{\uparrow}$) y zona con presencia de material fino arcilloso (\Leftarrow). (F) Sin analizador. Con las flechas se señala la matriz con evidencias de oxidación en la sección delgada.

Las raíces visibles en estas secciones varían desde muy bien preservadas hasta avanzado estado de descomposición, en la que observa la coloración parda rojiza propia de dicho estado.

La matriz se compone de granos de cuarzo, feldespatos y minerales opacos. Los fragmentos varían en tamaño y se encuentran angulares hasta subredondeados. Algunos incluso presentan formas tabulares alargadas.

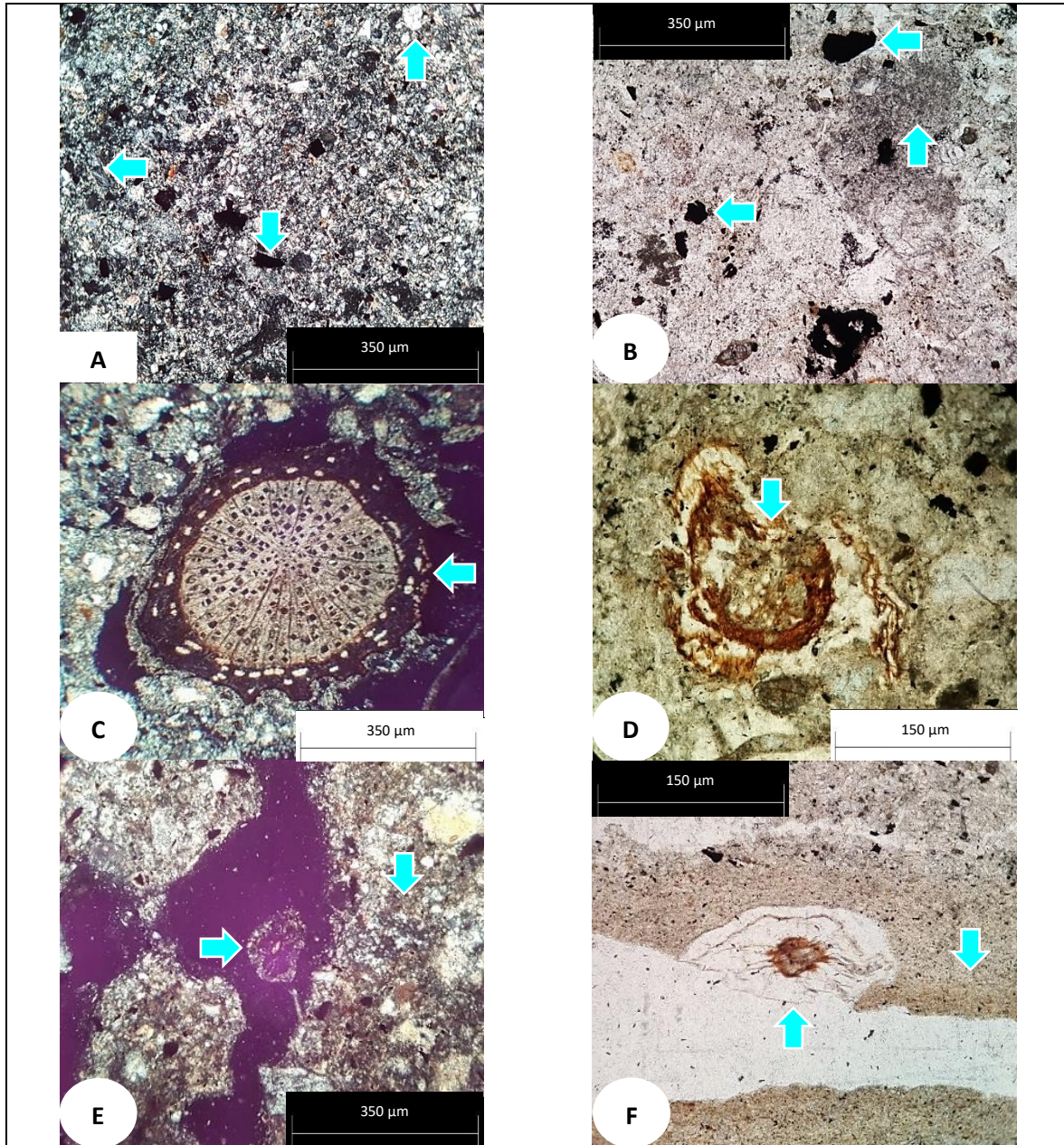


Figura 5.9. Micromorfología del perfil PC-01. Microestructura en materiales de desecho minero en un perfil en la presa de jales No. 3 en Cananea, Sonora. Este perfil cuenta con cinco horizontes. (A) Nícoles cruzados. Se aprecian granos de cuarzo (↑) y feldespatos (⇔) embebidos en una matriz fina. También contiene abundancia de sulfuros (⇐). (B) Sin analizador. Presencia de sulfuros y/o minerales opacos (⇐) en distintos tamaños. Se aprecia evidencia de material arcilloso (↑) en la matriz. (C) Nícoles cruzados. Presencia de raíz fresca (⇐) y bien preservada que produce bioturbación. (D) Sin analizador. Restos de raíz en descomposición que produce coloración parda (↓). (E) Nícoles cruzados. Raíz en espacio poroso del sedimento (⇒). La matriz presenta coloración (↓) por alteración. (F) Sin analizador. Raíz que generó bioturbación en el sedimento (↑) del horizonte más profundo del perfil. Pigmentación rojiza (↓) por degradación de materia orgánica.

5.2.2 Micromorfología en el suelo de la isla en la presa de jales No. 3

Dentro de la presa de jales No. 3 se encuentra un punto en el que hay una especie de “isla”, en este punto se limpió un perfil disponible y se obtuvieron secciones delgadas (Figura 5.10) del suelo presente.

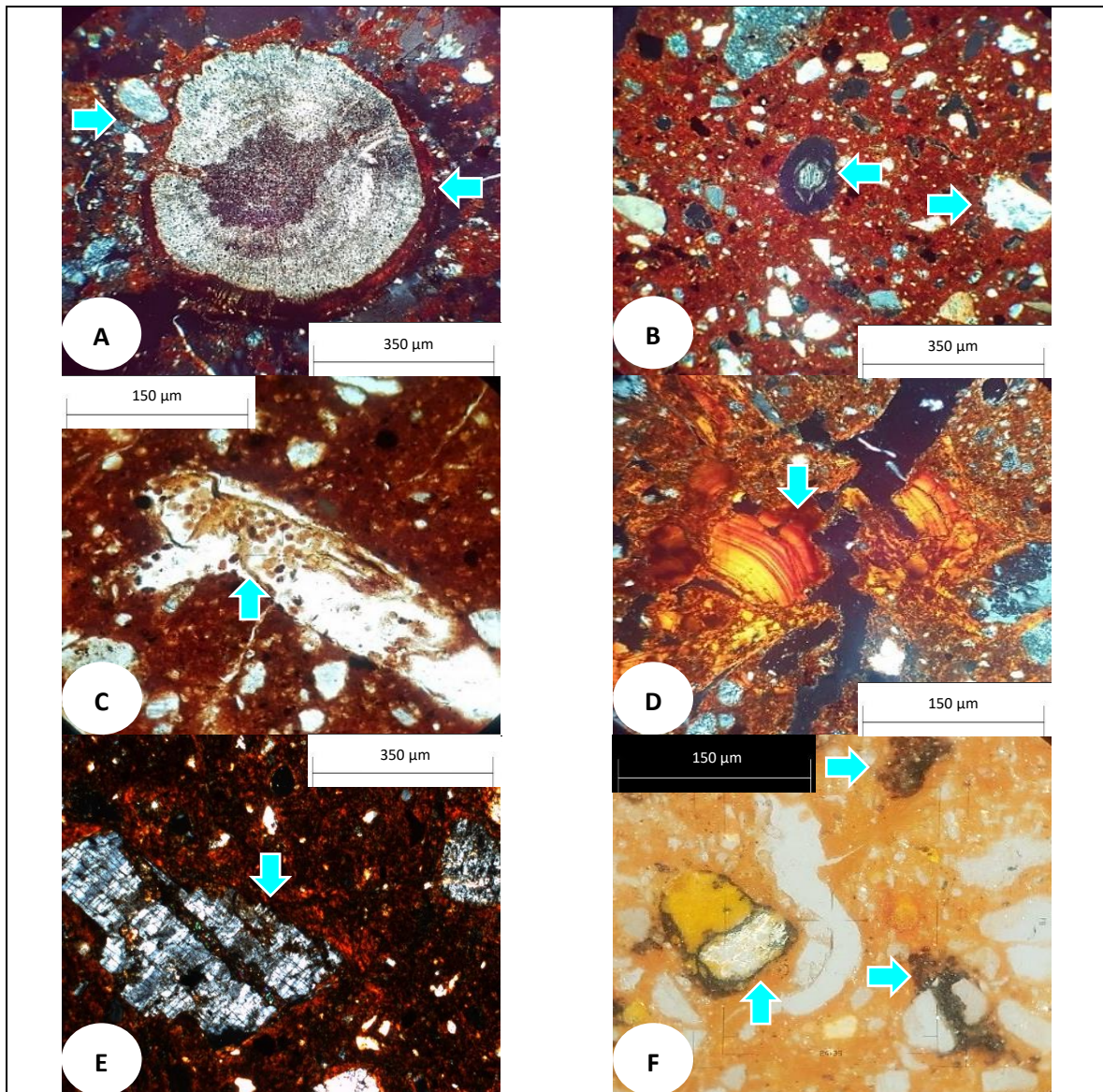


Figura 5.10. Micromorfología del perfil PE-01. Microestructura en materiales de desecho minero en el perfil de una isla en la presa de jales No. 3 en Cananea, Sonora. Este perfil cuenta con cuatro horizontes. Matriz que presenta evidente acumulación de óxidos. (A y B) Nícoles cruzados. Fragmentos de raíz (\Leftarrow) generando porosidad en la matriz del sedimento. La matriz oxidada presenta cristales de cuarzo y feldespatos alterados (\Rightarrow) de diferentes tamaños. (C) Sin analizador. Evidencias de poros biogénicos con coprolitos de mesofauna ($\hat{\uparrow}$). (D) Nícoles cruzados. Fragmentos de cutanes de arcilla (\Downarrow). (E) Nícoles cruzados. Feldespato alterado y fracturado (\Downarrow), con evidencias de óxidos de hierro en los bordes y material arcilloso en las fracturas. (F) Luz transmitida + luz reflejada. Matriz oxidada y fragmentos de sulfuros ($\hat{\uparrow}$). Algunos elementos presentan mayor grado de oxidación (\Rightarrow).

El análisis micromorfológico de estas secciones mostró evidencias de presencia de fragmentos de raíces, las cuales varían desde muy bien preservadas hasta descomposición alta. También varían en tamaños, siendo las más grandes de aproximadamente 450 μm de diámetro.

Las muestras constan de fragmentos grueso y finos embebidos en una matriz fina que presenta coloración rojiza. Se aprecian granos de cuarzo y feldespatos alterados, así como fragmentos de roca propias de la zona. En los feldespatos alterados se identificaron óxidos en los bordes y material arcilloso relleno de las fracturas. Los minerales opacos, como los sulfuros, han experimentado oxidación, lo que se aprecia al incidir luz reflejada, pues los óxidos se tornan más rojizos.

También se encontraron evidencias de poros biogénicos con coprolitos de mesofauna, lo que indica que los organismos animales han estado presentes en el sitio. Adicionalmente, se hallaron fragmentos de cutanes de arcilla, que parecen haber sido fracturados en partes más pequeñas.

5.2.3 Micromorfología en suelos naturales en interior de la zona minera

Se estudiaron dos perfiles de suelo natural, uno en la parte alta de una ladera y otro en la parte baja de otra ladera. De estos perfiles se obtuvieron cuatro y cinco secciones delgadas de forma respectiva.

En el perfil de la parte alta de la ladera (Figura 5.11) se observaron restos de raíces, desde bien preservadas hasta estado de descomposición avanzada. Los fragmentos de raíz más grandes son de aproximadamente 450 μm , en su eje mayor. Estas raíces ocasionan bioturbación en el sedimento y generan porosidad.

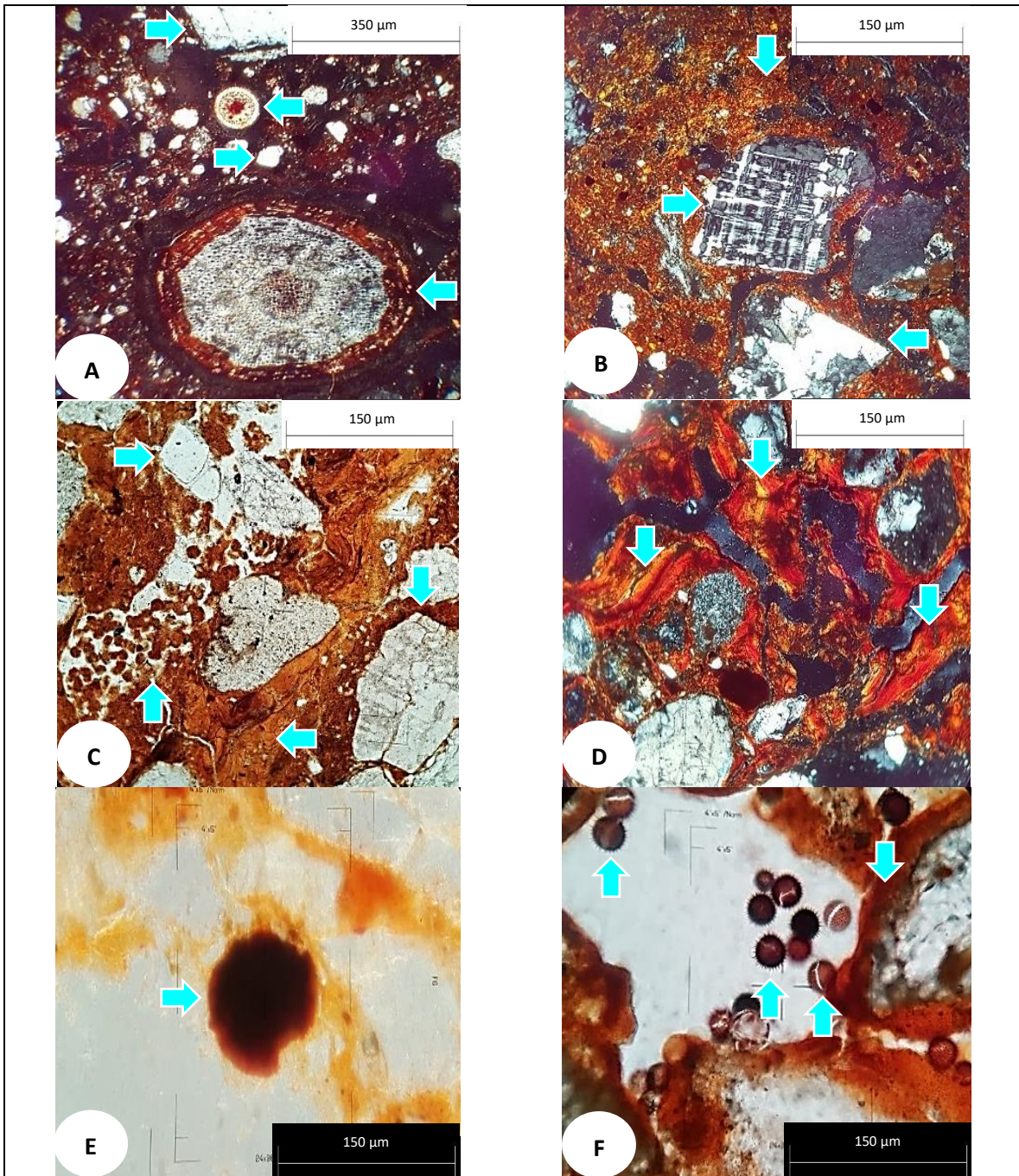


Figura 5.11. Micromorfología del perfil PSN PA. Microestructura en un perfil excavado en un suelo natural ubicado fuera de la presa No. 3, en Cananea, Este perfil cuenta con cuatro horizontes. (A) Nícoles cruzados. Raíces de diferentes tamaños (\Leftarrow) que originaron bioturbación en el sedimento. Fragmentos minerales (\Rightarrow) de distintos tamaños. (B) Nícoles cruzados. Fragmentos de minerales: cuarzo (\Leftarrow) y feldespatos (microclina) (\Rightarrow). La matriz tiene fuerte evidencia de acumulación de óxidos (\Downarrow). (C) Sin analizador. Evidencias de poros biogénicos con coprolitos de mesofauna ($\hat{\cap}$). Relleno de los poros con arcillas (\Leftarrow). También se aprecian fragmentos minerales como cuarzo (\Rightarrow) y feldespatos (\Downarrow). (D) Nícoles cruzados. Evidencia de cutanes de arcilla (\Downarrow) relleno los poros y fracturas. (E) Luz transmitida + luz reflejada. Nódulo de hierro (\Rightarrow). (F) Sin analizador. Esporas de polen ($\hat{\cap}$) en los poros de la muestra. Se aprecian recubrimientos de óxidos en los bordes (\Downarrow) de los fragmentos minerales.

Las muestras constan de fragmentos grueso y finos embebidos en una matriz fina que presenta coloración rojiza. Se aprecian granos de cuarzo y feldespatos alterados, así como fragmentos de roca propias de la zona. Los minerales opacos, como los sulfuros, han experimentado oxidación.

También se encontraron evidencias de poros biogénicos con coprolitos de mesofauna. Adicionalmente, se hallaron abundantes evidencias de cutanes de arcilla que rellenaron los poros y fracturas del sedimento. Hacia la parte más profunda del perfil se encontraron evidencias de formación de nódulos de hierro y restos de esporas de polen en los poros y en las paredes de los fragmentos minerales.

En el perfil de la parte baja de la ladera (Figura 5.12) se observaron restos de raíces, algunas moderadamente preservadas y otras en estado de descomposición avanzada. Estas raíces ocasionan bioturbación en el sedimento y generan porosidad.

Las muestras constan de fragmentos grueso y finos embebidos en una matriz fina que presenta coloración rojiza. Se aprecian granos de cuarzo y feldespatos alterados, así como fragmentos de roca propias de la zona. Los minerales opacos, como los sulfuros, se llegan a observar con fuerte oxidación. En algunas zonas de las secciones delgadas se aprecian contactos grano a grano con lo que parece ser matriz cementante de óxidos.

Se encontraron abundantes evidencias de cutanes de arcilla que rellenaron los poros y fracturas del sedimento. En la parte más profunda del perfil se hallaron evidencias de formación de nódulos de hierro de diferentes tamaños.

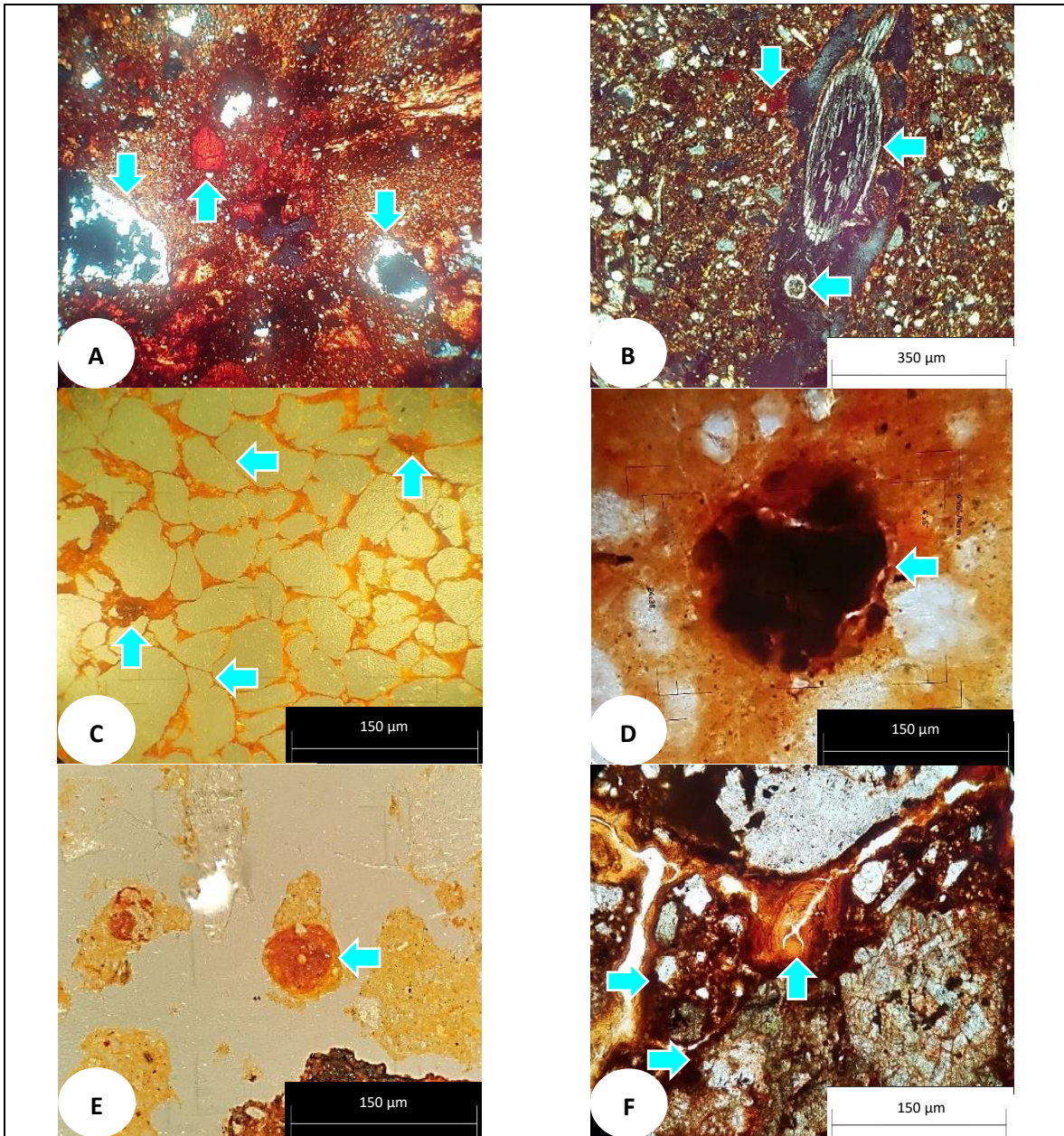


Figura 5.12. Micromorfología del perfil PSN PB. Microestructura en un perfil excavado en un suelo natural ubicado fuera de la presa No. 3, en Cananea, Sonora. Secciones delgadas pertenecientes al perfil PSN-PB, que cuenta con cinco horizontes. (A) Nícoles cruzados. Fragmentos de cuarzo con sulfuros (↓). Minerales afectados (↑) por la intensa acumulación de óxidos. (B) Nícoles cruzados. Fragmentos de raíces (⇐) en discontinuidades de la matriz. Minerales con intensa oxidación (↓). (C) Luz transmitida + luz reflejada. Se aprecia el contacto grano a grano (⇐) de los fragmentos minerales. Mientras los poros están rellenos (↑) con óxidos. (D y E) Luz transmitida + luz reflejada. Nódulos de hierro (⇐). (F) Nícoles cruzados. Poros rellenos con cutanes de arcilla (↑). Los bordes de los fragmentos minerales (⇒) presentan acumulación de óxidos (recubrimientos).

5.3 Parámetros fisicoquímicos

5.3.1 pH y conductividad eléctrica (CE)

Los valores que se obtuvieron al medir el pH y la conductividad eléctrica se muestran en la Tabla 5.7. Los perfiles que se encuentran en la zona de mayor influencia del agua residual (PA-01 y PA-02) tienen valores de pH más altos, incluso por arriba de la neutralidad (variando entre 7.30 y 7.79).

Clave	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	Clave	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)
PA01 – AC	7.79	948	PD02- C ₁	5.84	1393
PA01 – C _r	7.53	432	PE01 – AB	5.85	183.9
PA02 – AC	7.30	511	PE01 – AB _w	6.05	191.4
PB01 – C _{r1}	6.76	2140	PE01 – BC	6.27	117.4
PB01 – C ₂	6.19	428	PE01 – BC ₂	6.32	125.4
PB01 – C _{r3}	6.40	593	PSN P.B. BA	5.66	109.5
PB01 – C ₄	6.75	276	PSN P.B. B _{w1}	5.72	51.1
PB01 – C _{r5}	6.90	637	PSN P.B. B _{w2}	5.92	55
PB02 – C _{r1}	5.87	804	PSN P.B. B _g	5.97	50.4
PC01 – C _{r1}	6.78	962	PSN P.B. B _{Ctg}	6.09	61.9
PC01 – C ₂	6.96	533	PSN P.A. BA	5.27	91.5
PC01 – C _{r3}	7.1	754	PSN P.A. B _w	5.42	36.4
PC01 – C ₄	7.27	352	PSN P.A. B _{t(g)}	5.52	30.8
PC01 – C _{r5}	7.27	726	PSN P.A. B _{t(c)}	6.07	25.2

Tabla 5.7. pH y CE. Se muestran las lecturas de pH y conductividad eléctrica de todas las muestras analizadas.

Los valores de pH para el perfil PB-01, que se encuentra en zona de muy escasa a nula influencia de agua residual, son los más bajos (6.19 – 6.90). Mientras que en el perfil transicional (PC-01), es decir, en donde se registran periodos de influencia de agua residual y periodos sin influencia, se tienen valores intermedios (6.78 – 7.27) entre los registrados en el perfil PA-01 y los registrados en el PB-01. En el caso del perfil de la denominada “isla en la presa de jales” los valores de pH se encuentran entre 5.85 y 6.32. La CE se encuentra entre 117.4 y 191.4 ($\mu\text{S/cm}$). Para el perfil de suelo natural de la parte baja los valores de pH se encuentran entre 5.66 y 6.09, mientras que la CE varía entre 50.4 y 109.5 ($\mu\text{S/cm}$). El perfil de suelo natural de la parte alta tiene valores de pH entre 5.27 y 6.07. La CE varía de 25.2 y 91.5 ($\mu\text{S/cm}$).

Para el caso de la conductividad eléctrica, se observa un claro máximo en el horizonte superficial de cada perfil, tanto en los ubicados en jales como los de suelo natural. También

se muestra una clara diferencia entre estos, siendo más altos los valores de conductividad eléctrica en los jales, intermedios en el perfil de la isla y claramente más bajos en los suelos naturales. En este sentido, el valor más alto de conductividad eléctrica se presenta en el perfil PB-01, alcanzando los 2140 ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

5.3.2 Cationes intercambiables

Los resultados entregados por Fertilab, muestran que la saturación en todas las muestras seleccionadas está dominada por Ca y en menor medida por Mg, K y Na, mientras que el Al y el H intercambiables sólo se detectaron en algunas muestras. Lo anterior se identifica al analizar la Tabla 5.8.

Cationes intercambiables							
Horizonte	Ca ²⁺ (cmol _e /kg)	Mg ²⁺ (cmol _e /kg)	K ⁺ (cmol _e /kg)	Na ⁺ (cmol _e /kg)	Al ³⁺ (cmol _e /kg)	H ⁺ (cmol _e /kg)	CIC (cmol _e /kg)
PA01-AC	10.7	0.94	0.16	0.36	ND	ND	12.2
PA01 – Cr	6.28	0.48	0.07	0.12	ND	ND	6.95
PA02-AC	6.68	0.45	0.07	0.14	ND	ND	7.34
PB01 – Cr ₁	23.1	1.46	0.74	3.20	0.02	ND	28.5
PB01 – C ₂	3.68	0.29	0.07	0.10	0.29	0.209	4.63
PB01 – Cr ₃	11.3	0.44	0.27	0.20	ND	ND	12.2
PB01 – C ₄	6.31	0.13	0.13	0.11	ND	ND	6.68
PB01 – Cr ₅	13.3	0.27	0.23	0.16	ND	ND	14.0
PB02 – Cr ₁	6.68	0.58	0.28	0.47	0.19	0.131	8.33
PC01 – Cr ₁	9.52	0.44	0.74	1.05	ND	ND	11.8
PC01 – C ₂	7.81	0.19	0.17	0.12	ND	ND	8.29
PC01 – Cr ₃	8.91	0.27	0.15	0.13	ND	ND	9.46
PC01 – C ₄	5.91	0.18	0.19	0.14	ND	ND	6.42
PC01 – Cr ₅	9.42	0.26	0.29	0.20	ND	ND	10.2
PD02- C ₁	11.5	1.05	0.87	1.05	ND	ND	14.5
PSN 0-4 cm	4.99	0.97	0.47	0.07	0.25	0.232	6.98
PSN 4-20 cm	6.02	1.21	0.44	0.04	0.09	ND	7.80

Tabla 5.8. Cationes intercambiables. Se muestran los valores obtenidos por el laboratorio Fertilab, referentes a los cationes intercambiables presentes en las muestras seleccionadas para este estudio.

Para el Ca los valores se encuentran entre 23.1 y 3.68 (cmol_e/kg), las de Mg varían entre 1.46 y 0.13 (cmol_e/kg), las de K entre 0.87 y 0.07 (cmol_e/kg), las de Na en un rango de 3.20 a 0.04 (cmol_e/kg), las de Al se encuentran entre 0.29 y 0.02 (cmol_e/kg) y las de H se ubican entre 0.232 y 0.131 (cmol_e/kg). Finalmente, la CIC varía entre 14.5 y 4.63 (cmol_e/kg).

Se observa que prácticamente todas las muestras analizadas de la presa de jales tienen saturación de Ca mayor que en las muestras de suelo natural, o al menos muy similar. Para el caso del Mg el comportamiento es opuesto, pues la saturación en el suelo natural es mayor, salvo en el caso del primer horizonte del perfil PB01, en donde se tiene nula o muy poca presencia de agua residual. Hablando del K, los mayores valores se tienen en los horizontes más superficiales de los perfiles, incluso mayores que los determinados en el suelo natural (salvo en el caso del perfil PA01, en el que se tiene valor menor que en el suelo natural). En el caso del Na se encontró que todas las muestras de la presa de jales tienen mayor saturación que las del suelo natural. Para el Al e H se tienen valores en el suelo natural y en tres horizontes de los perfiles PB (con lo que suman cinco muestras en las que se obtuvieron resultados), en los que la influencia del agua residual es nula o muy escasa.

Finalmente, la CIC es mayor en los horizontes más superficiales de cada perfil de la presa, siendo en algunos de estos casi del doble del valor que la determinada para el suelo natural. Prácticamente en todos los horizontes analizados de los perfiles de la presa de jales se tienen valores mayores que en el suelo natural, y en los pocos que son menores la diferencia es mínima.

5.3.3 Materia orgánica y elementos nutritivos

En este apartado se muestran los resultados entregados por Fertilab, de los cuales se consideraron la concentración de fósforo y potasio, así como el porcentaje de materia orgánica. No se incluye aquí la concentración de nitrógeno disponible porque el valor reportado es muy bajo.

5.3.3.1 Perfiles PA01 y PA02

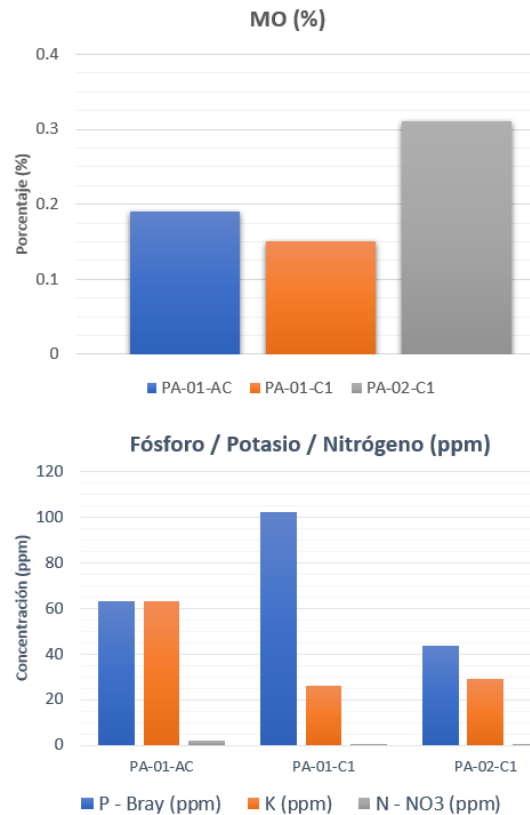


Figura 5.13. M.O. y elementos nutritivos en PA01 y PA02. Arriba, porcentaje de materia orgánica. Abajo, concentración de fósforo (en azul), potasio (en anaranjado) y nitrógeno (en gris).

En la Figura 5.13 se aprecian los valores obtenidos para las muestras seleccionadas de los perfiles PA01 y PA02. Se observa que los valores mayores de concentración de fósforo se tienen para el perfil PA01, siendo el mayor el observado en el horizonte PA01-C1 con 102 ppm. El menor valor se presentó en el horizonte superficial del perfil PA02 (43.6 ppm). Para el caso del potasio, el mayor valor de concentración se tiene para el horizonte más superficial del perfil PA01 (63 ppm), y el menor valor se determinó para el segundo horizonte de este mismo perfil (25.9 ppm). En cuanto al porcentaje de materia orgánica, se determinó que el perfil PA02 presenta el mayor valor con 0.31 %, mientras que en perfil PA01 se tienen valores de 0.19 y 0.15 %.

5.3.3.2 Perfiles PB01 y PB02

En la Figura 5.14 se aprecian los valores obtenidos para las muestras seleccionadas de los perfiles PB01 y PB02. Se observa que los valores mayores de concentración de fósforo se tienen para el perfil PB01, siendo el mayor el observado en el horizonte PB01-C2 con 54.8 ppm. El menor valor se presentó en el horizonte superficial del perfil PB02 (13 ppm). Para el perfil PB01 se aprecia un decremento en la concentración del P al aumentar la profundidad de los horizontes. Para el caso del potasio, el mayor valor de concentración se tiene para el horizonte más superficial del perfil PB01 (290 ppm), y el menor valor se determinó para el segundo horizonte de este mismo perfil (27.3 ppm). En cuanto al porcentaje de materia orgánica, se determinó que el perfil PB01 presenta el mayor valor en el horizonte PB01-C3 con 0.33 %, mientras que el menor valor se tiene en el horizonte PB01-C4 con valor de 0.13 %.

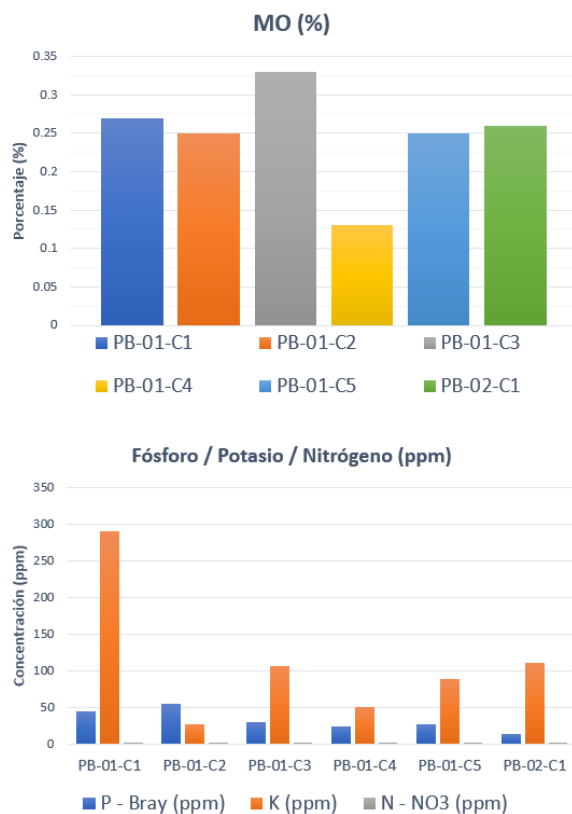


Figura 5.14. M.O. y elementos nutritivos en PB01 y PB02. Arriba, porcentaje de materia orgánica. Abajo, concentración de fósforo (en azul), potasio (en anaranjado) y nitrógeno (en gris).

5.3.3.3 Perfiles PC01 y PD02

En la Figura 5.15 se aprecian los valores obtenidos para las muestras seleccionadas de los perfiles PC01 y PD02. Se observa que los valores mayores de concentración de fósforo se tienen para el perfil PC01, siendo el mayor el observado en el horizonte PC01-C2 con 100 ppm. El menor valor se presentó en el horizonte PC01-C3 (25.3 ppm). Para el caso del potasio, el mayor valor de concentración se tiene en el horizonte más superficial del perfil PD02 (339 ppm), seguido del horizonte más superficial del perfil PC01 con 291 ppm. El menor valor se determinó para el horizonte PC01-C3 de este mismo perfil (58.8 ppm). En cuanto al porcentaje de materia orgánica, se determinó que el perfil PC01 presenta el mayor valor en el horizonte PC01-C2 con 0.35 %, mientras que el menor valor se tiene en el horizonte PC01-C3 con valor de 0.13 %.

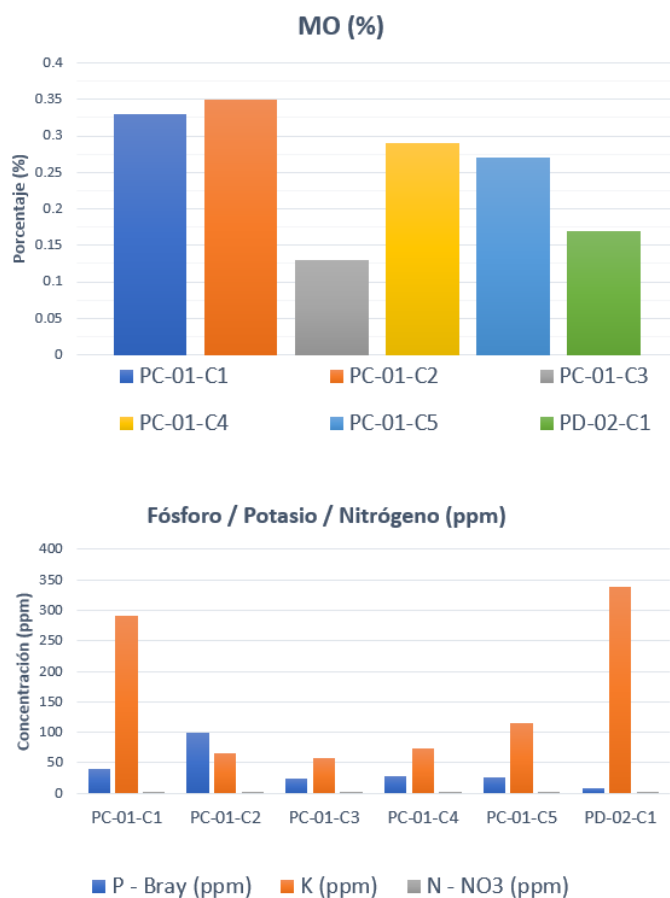


Figura 5.15. M.O. y elementos nutritivos en PC01 y PD02. Arriba, porcentaje de materia orgánica. Abajo, concentración de fósforo (en azul), potasio (en anaranjado) y nitrógeno (en gris).

5.3.3.4 Perfil de suelo natural PSN

En la Figura 5.16 se aprecian los valores obtenidos para las muestras seleccionadas de este perfil, para las profundidades comprendidas entre 0 y 4cm, y de 4 a 20 cm. Se observa que el mayor valor tanto de P como de K se tiene en el horizonte más superficial, con 19 ppm para el primero y 185 ppm para el segundo. En el horizonte comprendido entre 4 y 20 cm se tiene 7.13 ppm y 173 ppm para el fósforo y el potasio respectivamente. En cuanto al porcentaje de materia orgánica, se determinó que el horizonte comprendido entre 0 y 4 cm contiene 4.58 %, mientras que el horizonte entre 4 y 20 cm cuenta con 2.6 % de materia orgánica. Estos valores sin duda más altos que cualquiera de los determinados para las muestras de jales.

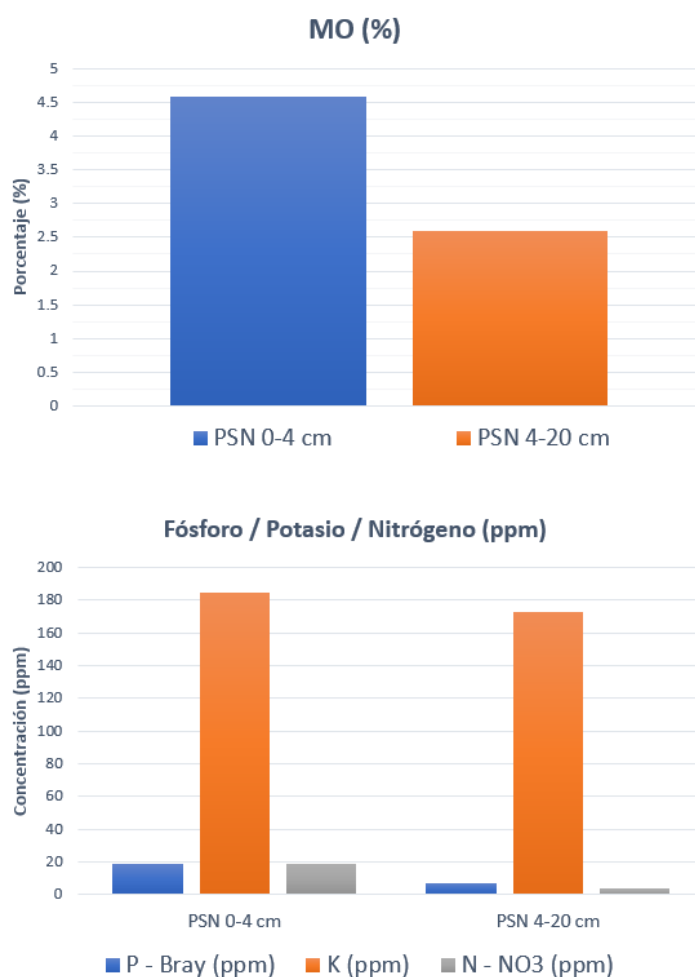


Figura 5.16. M.O. y elementos nutritivos en PSN. Arriba, porcentaje de materia orgánica. Abajo, concentración de fósforo (en azul), potasio (en anaranjado) y nitrógeno (en gris).

5.3.4 Color

Para determinar el color al que corresponde cada una de las muestras colectadas se empleó la metodología establecida en el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe *et al.*, 2016). Los colores referencia fueron consultados en la tabla de colores de suelo Munsell (Munsell Color, 2013).

5.3.4.1 Perfil PA – 01

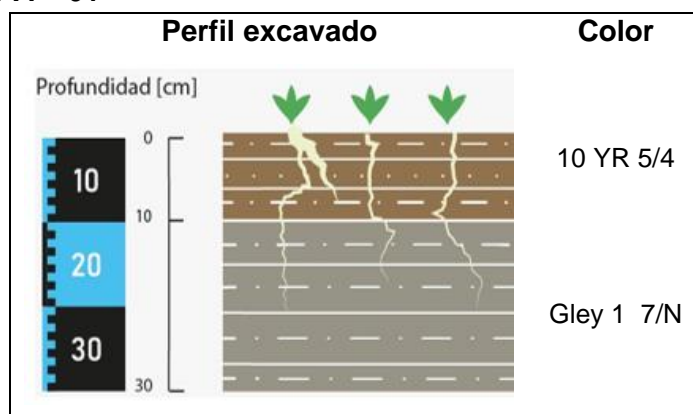


Figura 5.17. Colores en el perfil PA-01. Colores determinados para el perfil PA01 en sus diferentes horizontes. Se indica también la presencia de los fragmentos de raíces en los horizontes.

5.3.4.2 Perfil PB-01

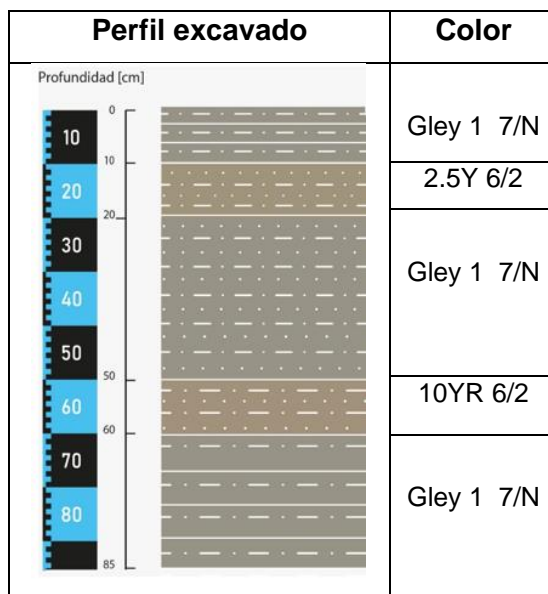


Figura 5.18. Colores en el perfil PB-01. Colores determinados para el perfil PB01 en sus diferentes horizontes.

5.3.4.3 Perfil PC-01

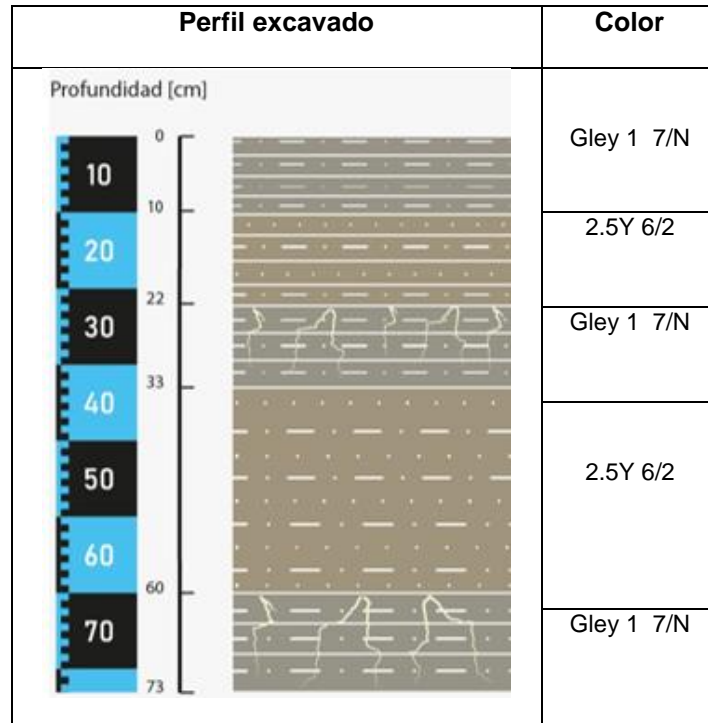


Figura 5.19. Colores en el perfil PC-01. Colores determinados para el perfil PC01 en sus diferentes horizontes. Se indica también la presencia de los fragmentos de raíces en los horizontes.

5.3.4.4 Perfil PE-01

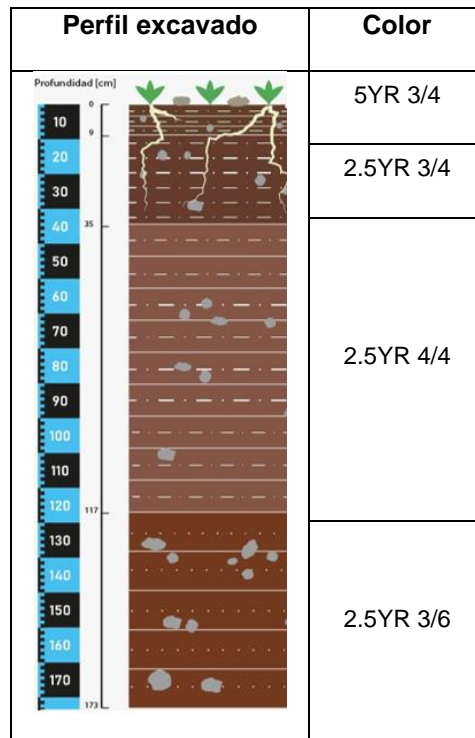


Figura 5.20. Colores en el perfil PE-01. Colores determinados para el perfil PE01 en sus diferentes horizontes. Se indica también la presencia de los fragmentos de raíces en los horizontes y la pedregosidad.

5.3.4.5 Perfil PSN PA

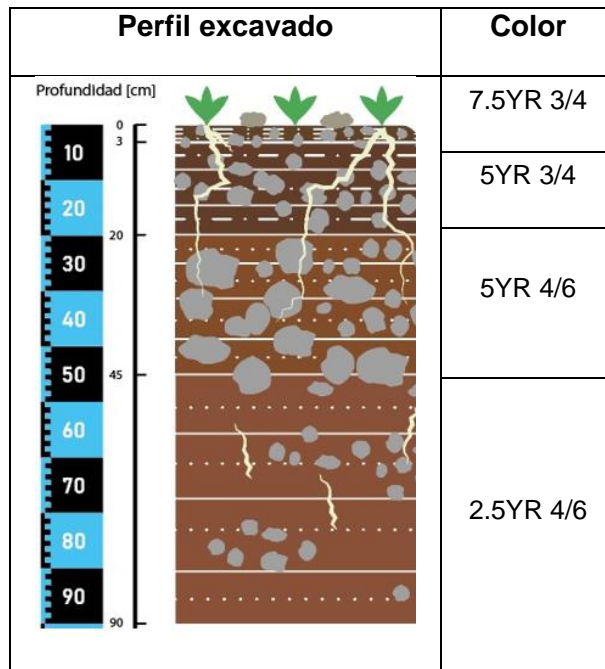


Figura 5.21. Colores en el perfil PSN PA. Colores determinados para el perfil PSN PA en sus diferentes horizontes. Se indica también la presencia de los fragmentos de raíces en los horizontes y la pedregosidad.

5.3.4.6 Perfil PSN PB

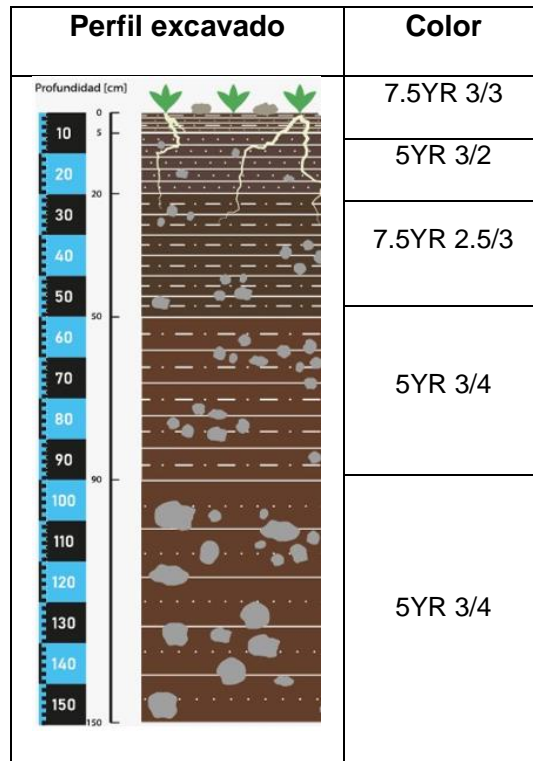


Figura 5.22. Colores en el perfil PSN PB. Colores determinados para el perfil PSN PB en sus diferentes horizontes. Se indica también la presencia de los fragmentos de raíces en los horizontes y la pedregosidad.

5.4 Concentraciones totales por FRX de elementos seleccionados

De los elementos determinados en las muestras, el hierro tiene la mayor concentración, seguido del potasio, calcio y titanio. Estos dos los denominados elementos mayores. Otros elementos como arsénico, plomo, zinc, cobre y manganeso están presentes en menor proporción y constituyen los elementos menores.

5.4.1.1 Perfil PA-01

Para el perfil PA-01, hablando de elementos mayores (Figura 5.23), se observa una alta concentración de hierro y potasio, siendo alta en el horizonte AC e incrementándose en el C1.

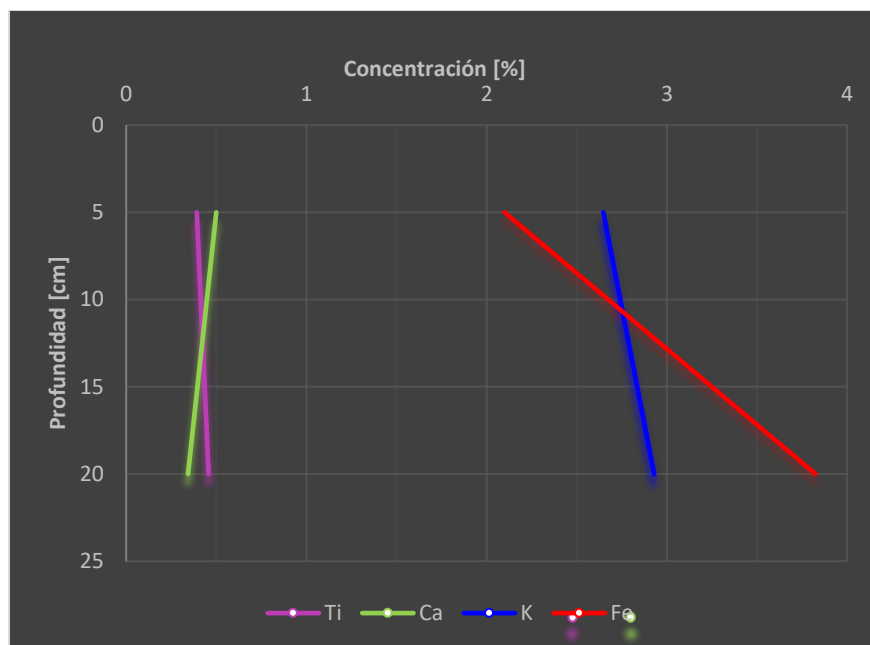


Figura 5.23. Elementos mayores en PA-01. Concentración de los elementos mayores determinados para el perfil PA-01.

En los elementos menores (Figura 5.24) se observa que la mayor concentración corresponde con el Mn, seguida del Cu y el Zn.

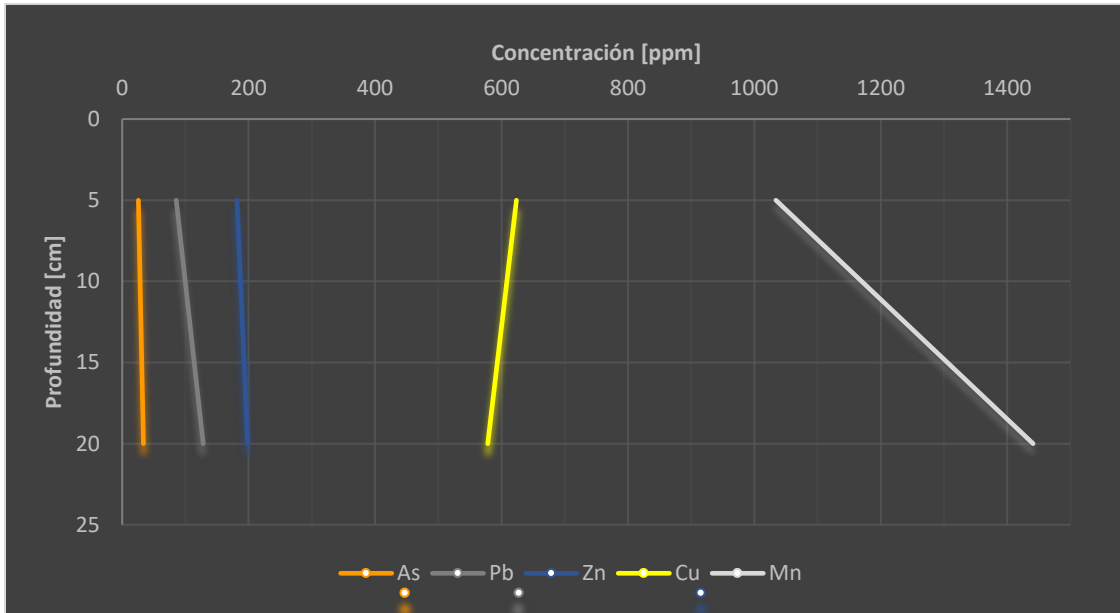


Figura 5.24. Elementos menores en PA-01. Concentración de los elementos menores determinados para el perfil PA-01.

5.4.1.2 Perfil PB-01

Para los elementos mayores en el perfil PB-01 (Figura 5.25), nuevamente se presenta alta concentración de hierro y potasio, siendo para el Fe la más alta en el horizonte C2.

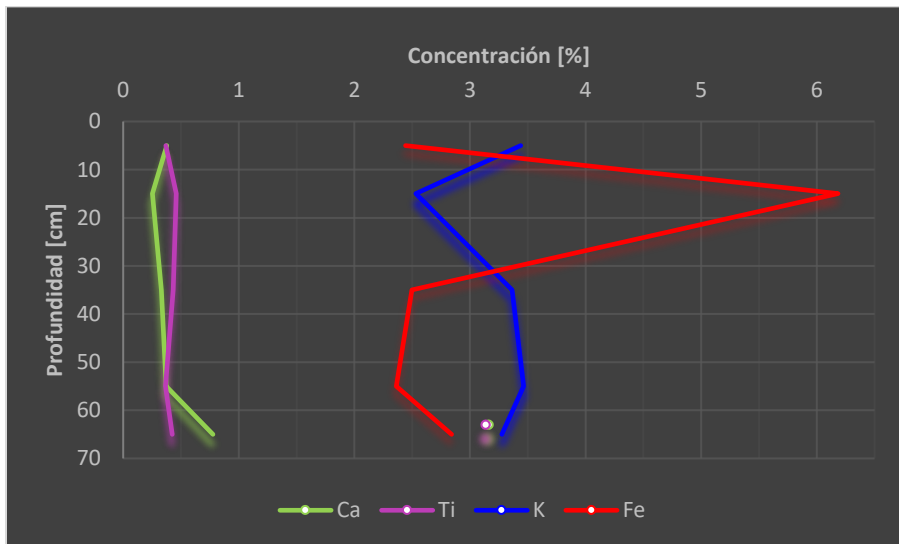


Figura 5.25. Elementos mayores en PB-01. Concentración de los elementos mayores determinados para el perfil PB-01.

Al analizar los elementos menores (Figura 5.26) se observa que el Mn y el Cu tienen la mayor concentración entre estos. Menor concentración presenta el As, Pb y Zn. El segundo horizonte tiene las mayores concentraciones de Mn y Cu.

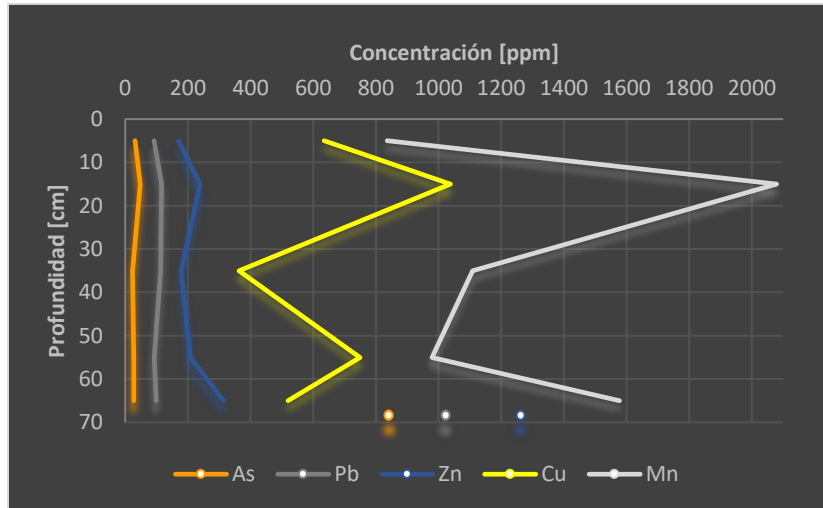


Figura 5.26. Elementos menores en PB-01. Concentración de los elementos menores determinados para el perfil PB-01.

5.4.1.3 Perfil PC-01

En el análisis de elementos mayores del perfil PC-01 (Figura 5.27), se observa alta concentración de Fe y K, presentando intercalación de aumento y disminución a través de los horizontes, es decir, donde se tiene máxima concentración de hierro disminuye el potasio y viceversa.

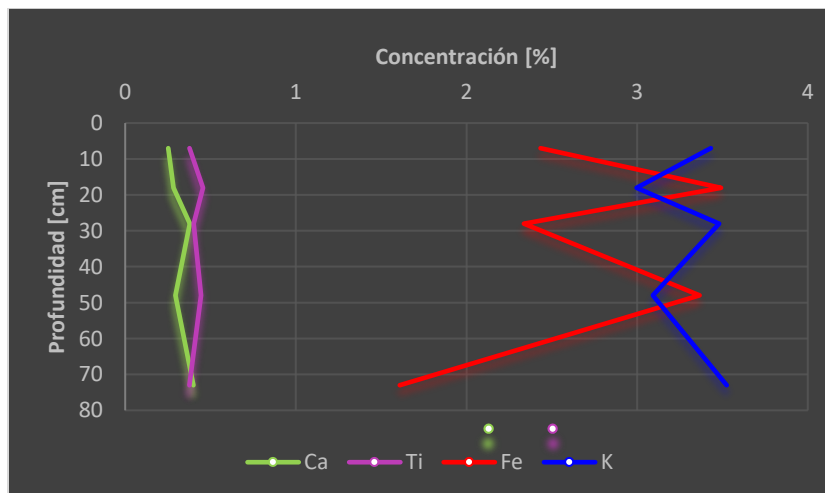


Figura 5.27. Elementos mayores en PC-01. Concentración de los elementos mayores determinados para el perfil PC-01.

Al analizar los elementos menores (Figura 5.28) se observa que el Mn y el Cu tienen la mayor concentración entre estos. Además presenta comportamiento similar al del Fe, con intercalación de valores máximos y mínimos entre horizontes, mostrando máximos en los horizontes de textura más gruesa y mínimos en los de textura más fina.

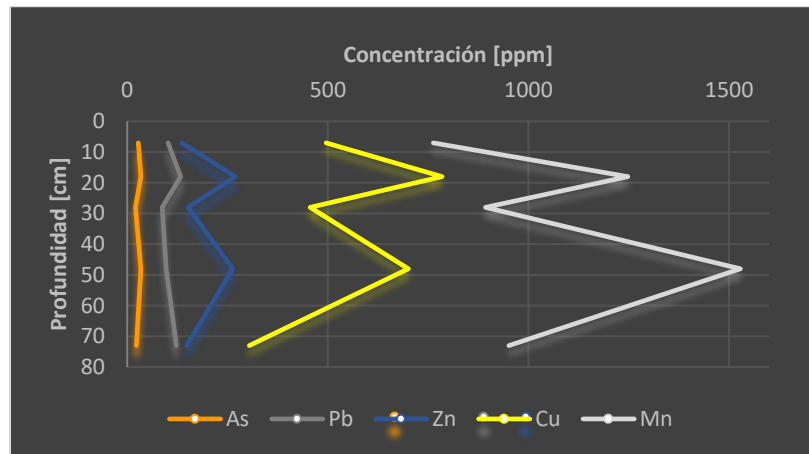


Figura 5.28. Elementos menores en PC-01. Concentración de los elementos menores determinados para el perfil PC-01.

5.4.1.4 Perfil PE-01

En los elementos mayores del perfil PE-01 (Figura 5.29), se observa alta concentración de Fe. Las curvas muestran un comportamiento casi vertical, es decir, con poca variación de los valores entre horizontes.

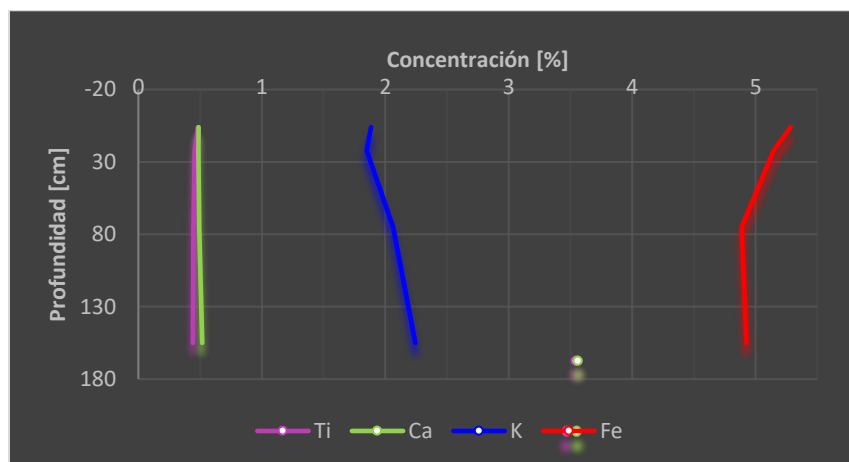


Figura 5.29. Elementos mayores en PE-01. Concentración de los elementos mayores determinados para el perfil PE-01.

Cuando se observan los elementos menores (Figura 5.30) se aprecia un comportamiento casi idéntico al de los elementos mayores, es decir, líneas verticales con poca variación en las concentraciones entre horizontes. Sólo el Mn presenta cambio brusco entre horizontes.

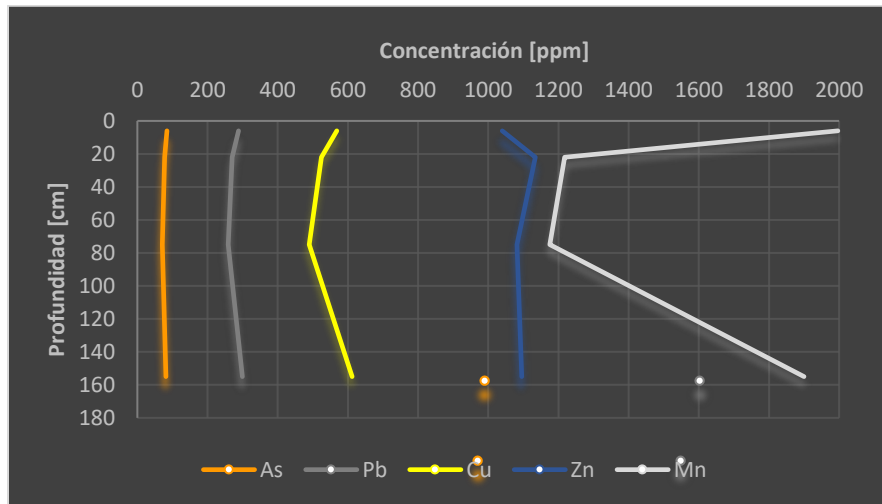


Figura 5.30. Elementos menores en PE-01. Concentración de los elementos menores determinados para el perfil PE-01.

5.4.1.5 Perfil PSN – PA

En el análisis de los mayores del perfil PSN – PA (Figura 5.31), se observa alta concentración de Fe y K, con un marcado incremento hacia la base del perfil, encontrándose el mayor valor de concentración de hierro en el horizonte Bt(c).

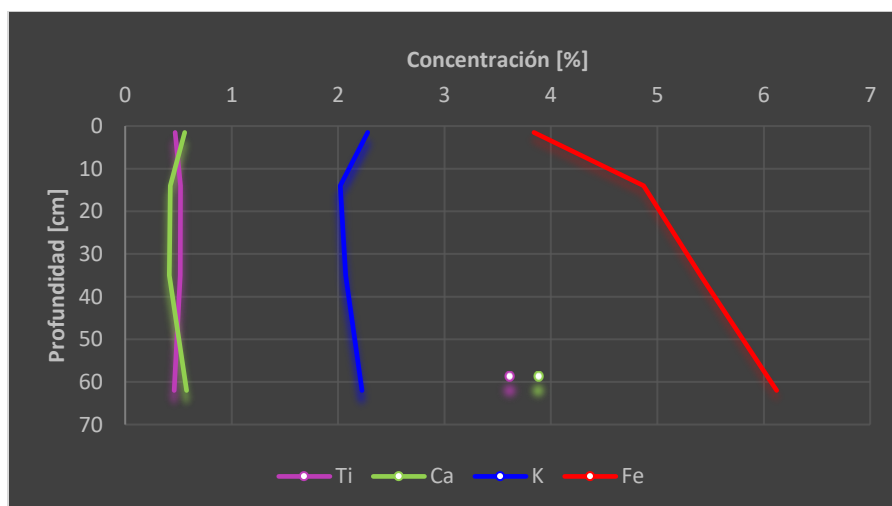


Figura 5.31. Elementos mayores en PSN PA. Concentración de los elementos mayores determinados para el perfil PSN PA.

En los elementos menores (Figura 5.32) se aprecia que las mayores concentraciones se tienen para el Mn, Zn y el Cu. Como en el caso anterior, nuevamente se observa incremento en la concentración hacia la base del perfil, encontrándose el mayor valor en el horizonte Bt(c).

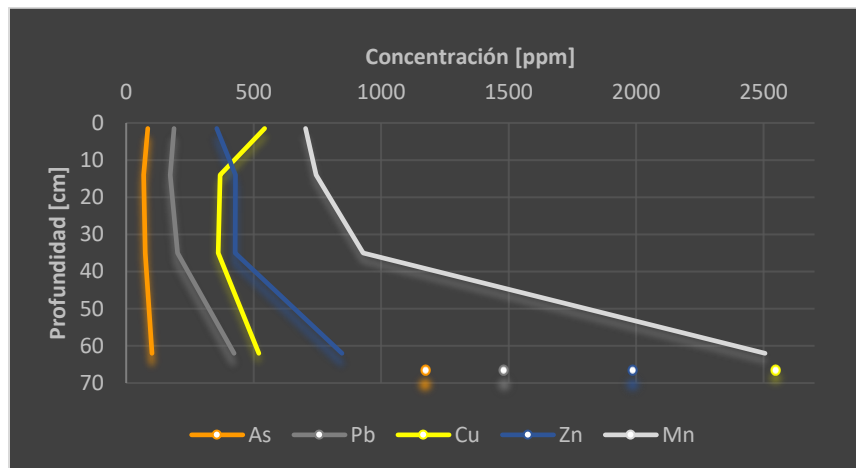


Figura 5.32. Elementos menores en PSN PA. Concentración de los elementos menores determinados para el perfil PSN PA.

5.4.1.6 Perfil PSN – PB

En el análisis de los mayores del perfil PSN – PB (Figura 5.33), se observa alta concentración de Fe, con un marcado incremento hacia la base del perfil, encontrándose el mayor valor en el horizonte BCtg.

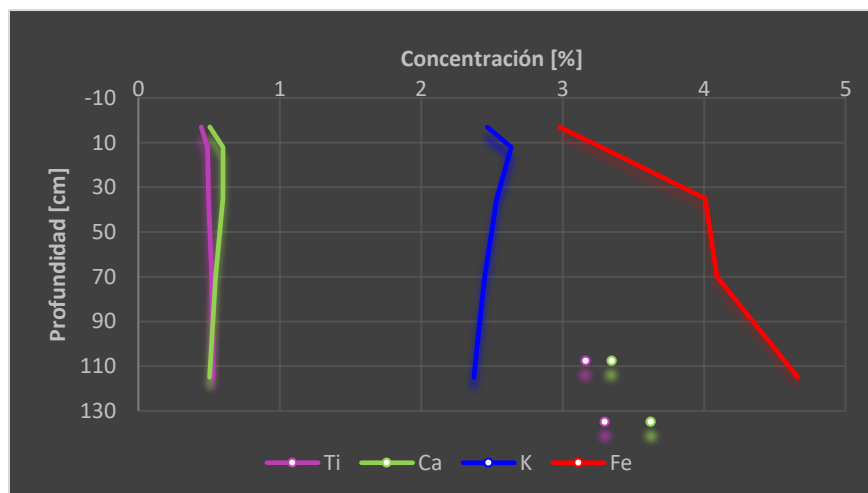


Figura 5.33. Elementos mayores en PSN PB. Concentración de los elementos mayores determinados para el perfil PSN PB.

En los elementos menores (Figura 5.34) se aprecia que las mayores concentraciones se tienen para el Mn, Zn y el Cu. Como en el caso anterior, nuevamente se observa incremento en la concentración hacia la base del perfil, encontrándose el mayor valor de Zn en el horizonte BCtg.

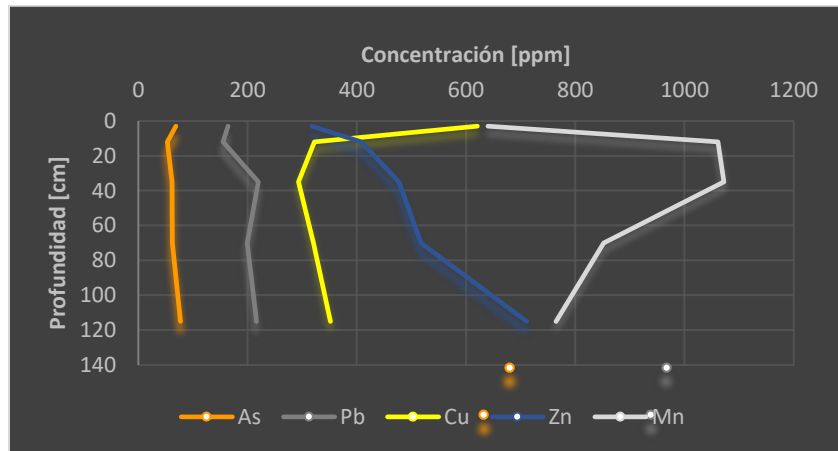


Figura 5.34. Elementos menores en PSN PB. Concentración de los elementos menores determinados para el perfil PSN PB.

5.5 Difracción de Rayos X (DRX)

5.5.1 Composición mineral de la roca típica del yacimiento

Las fases minerales de mayor abundancia en una muestra de roca típica del yacimiento en Cananea son el cuarzo (SiO_2), el feldespato potásico (KAlSi_3O_8), filosilicatos y plagioclasa sódica cálcica ($(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$). En menor proporción se determinó la presencia de clino y orto piroxenos, magnetita y trazas de esmectita. En la Figura 5.35 se muestra el difractograma que corresponde con la muestra analizada.

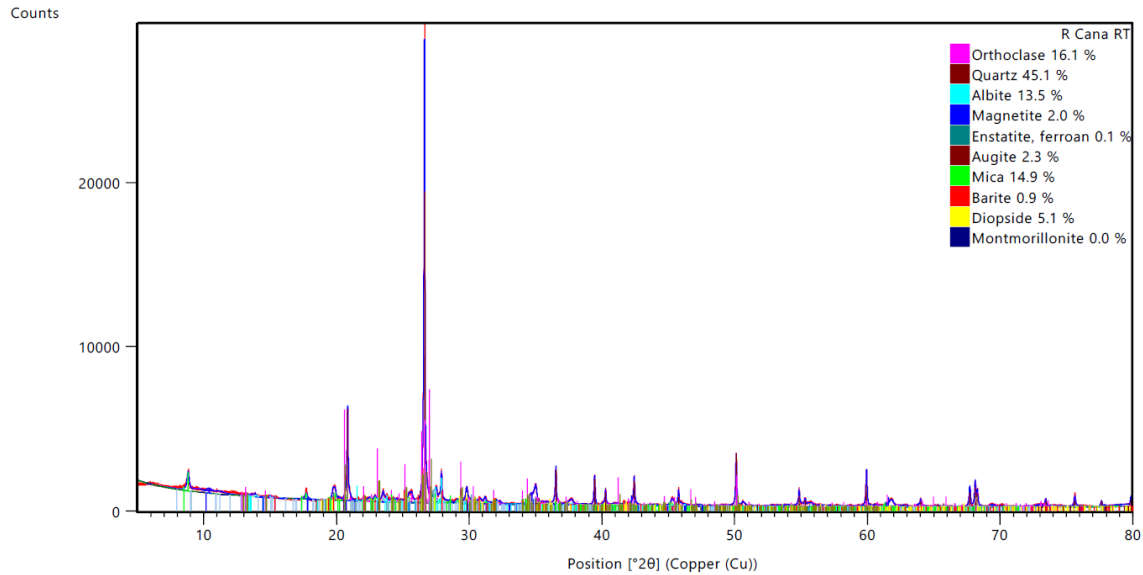


Figura 5.35. Mineralogía total de la roca del yacimiento. Difractograma que muestra la composición mineralógica de la roca tipo del yacimiento en Buenavista del Cobre, en Cananea.

5.5.2 Mineralogía de arcillas

5.5.2.1 Mineralogía de arcillas en jal sin oxidar

El difractograma de la muestra analizada (Figura 5.36) presentó un máximo de $\sim 10 \text{ \AA}$ que corresponde con illita, un máximo de $\sim 7 \text{ \AA}$ que corresponde con caolinita y un pequeño máximo de $\sim 14 \text{ \AA}$, que puede asociarse con clorita, esmectita o vermiculita. Para el máximo de $\sim 14 \text{ \AA}$, sólo se tiene cambio al elevar la temperatura hasta $550 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que es comportamiento típico para clorita. El máximo de $\sim 7 \text{ \AA}$ colapsó al calentar la muestra hasta $550 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que es un comportamiento típico para mineral tipo caolinita. El pequeño resto de $\sim 7 \text{ \AA}$ corresponde con segundo máximo de $\sim 14 \text{ \AA}$ de clorita. Los resultados observados en este difractograma indican que la muestra contiene minerales arcillosos principalmente del tipo illita y caolinita, así como trazas de clorita.

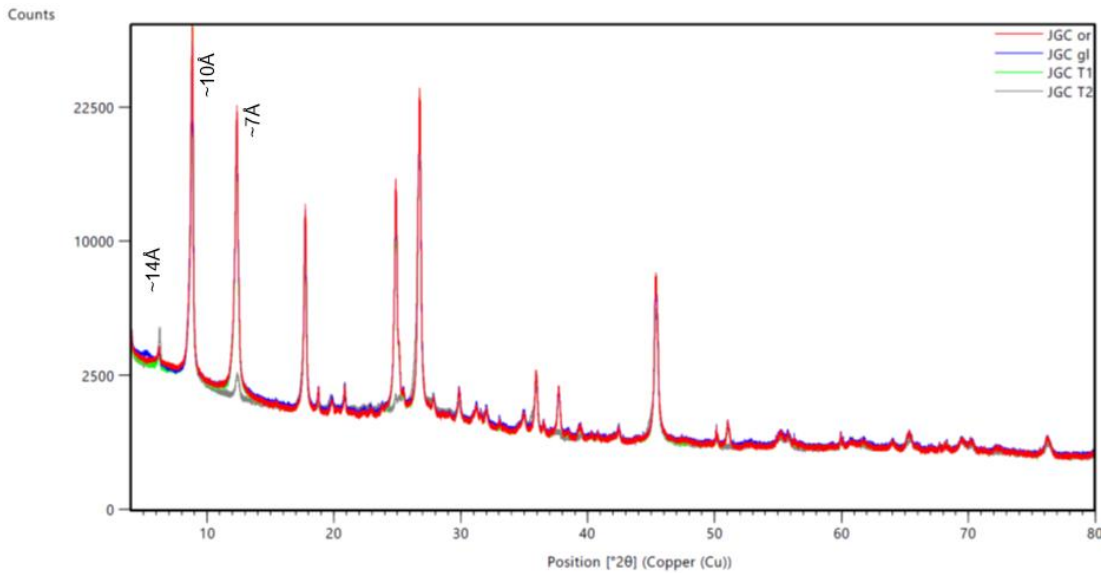


Figura 5.36. Mineralogía de arcillas en jal sin oxidar. Difractograma que muestra la composición mineralógica de la muestra de jal gris sin oxidar, tomada en la Presa de jales No. 3 en Buenavista del Cobre, en Cananea.

5.5.2.2 Mineralogía de arcillas en jal oxidado

El difractograma de la muestra analizada (Figura 5.37) presentó un pequeño máximo de $\sim 10 \text{ \AA}$ que corresponde con illita. Se obtuvo el mismo comportamiento en la muestra glicolada y al elevar la temperatura hasta $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Los resultados observados en este difractograma indican que la muestra contiene minerales arcillosos del tipo illita.

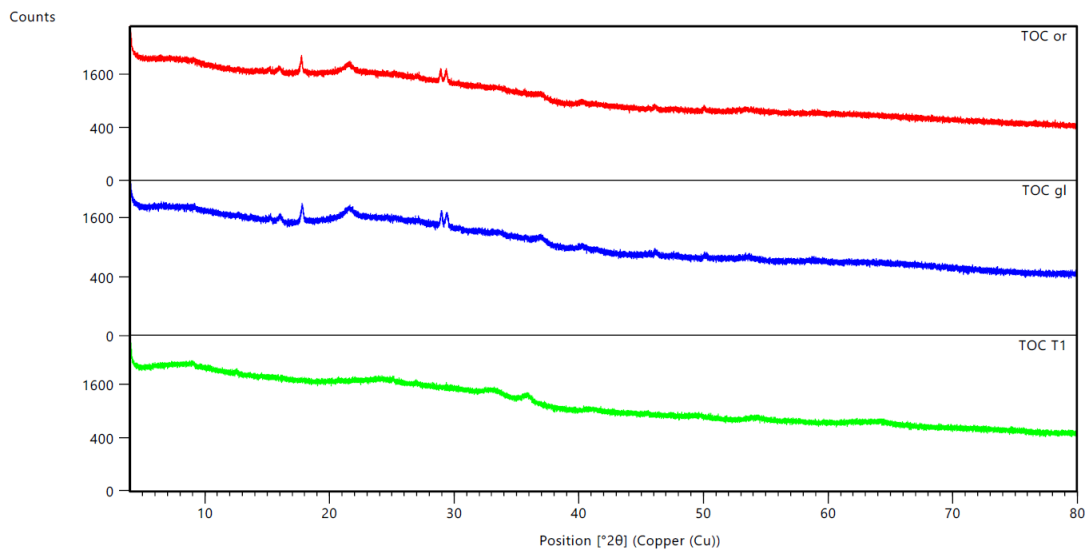


Figura 5.37. Mineralogía de arcillas en jal oxidado. Difractograma que muestra la composición mineralógica de la muestra de jal oxidado, tomada en la Presa de jales No. 3 en Buenavista del Cobre, en Cananea.

5.5.2.3 Mineralogía de arcillas en jal en contacto con agua negra

El difractograma de la muestra analizada (Figura 5.38) presentó un máximo de $\sim 10 \text{ \AA}$ que corresponde con illita, un máximo de $\sim 7 \text{ \AA}$ que corresponde con caolinita y un pequeño máximo de $\sim 14 \text{ \AA}$, que puede asociarse con clorita, esmectita o vermiculita. Para el máximo de $\sim 14 \text{ \AA}$ hubo un cambio al glicolar la muestra. Una parte se desplazó hacia ángulos más pequeños y se aprecian valores mayores $\sim 17 \text{ \AA}$, lo que es diagnóstico de esmectita. Lo anterior se debe a que el etilenglicol es capaz de entrar en el espacio de estructura de esmectita y aumentar este espacio hasta $\sim 17 \text{ \AA}$.

Al elevar la temperatura hasta $450 \text{ }^\circ\text{C}$ disminuye el máximo de $\sim 14 \text{ \AA}$ y aumenta el máximo de $\sim 10 \text{ \AA}$, esto se debe a que una parte de esmectita colapsó hasta $\sim 10 \text{ \AA}$. Cuando la temperatura se eleva hasta $550 \text{ }^\circ\text{C}$ el máximo de $\sim 7 \text{ \AA}$ colapsó y quedó el segundo máximo de $\sim 14 \text{ \AA}$. Los resultados observados en este difractograma indican que la muestra contiene minerales arcillosos principalmente del tipo illita y caolinita, clorita en menor proporción y trazas de esmectita.

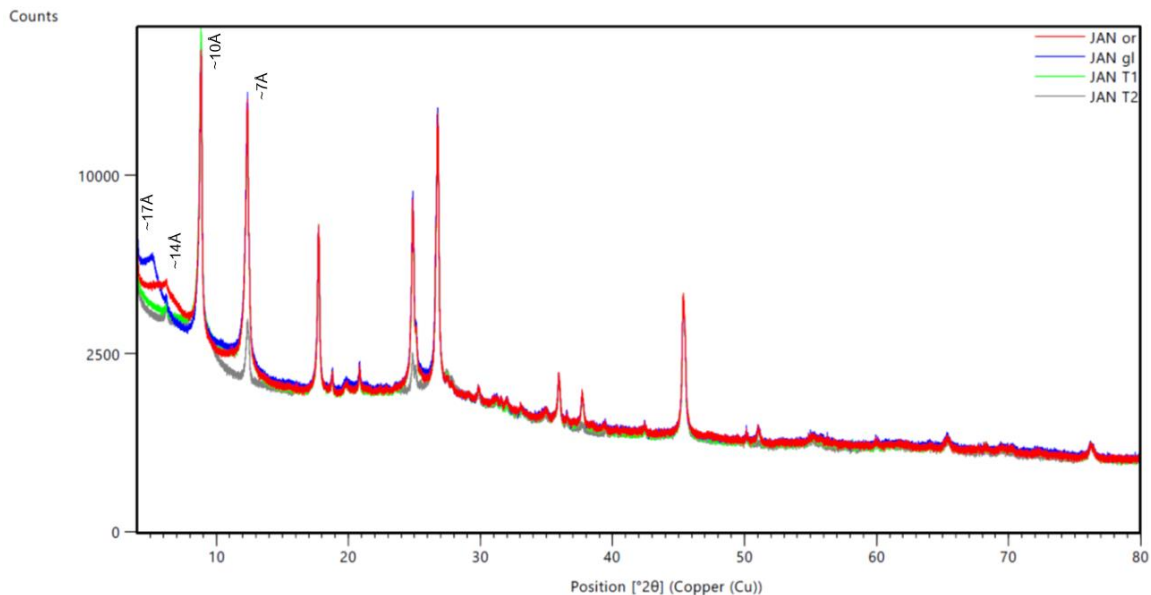


Figura 5.38. Mineralogía de arcillas del jal en contacto con agua residual. Difractograma que muestra la composición mineralógica de la muestra de jal en contacto con agua residual, tomado en la Presa de jales No. 3 en Buenavista del Cobre, en Cananea.

5.5.2.4 Mineralogía de arcillas en suelo natural

El difractograma de la muestra analizada (Figura 5.39) presentó un máximo de $\sim 10 \text{ \AA}$ (que no disminuye su intensidad) que corresponde con illita, un máximo de $\sim 7 \text{ \AA}$ que corresponde con caolinita y un pequeño máximo de $\sim 14 \text{ \AA}$, que puede asociarse con clorita, esmectita o vermiculita. Para el máximo de $\sim 14 \text{ \AA}$, una parte colapsa hasta $\sim 10 \text{ \AA}$ al calentar la muestra, lo que es diagnóstico para minerales lábiles tipo vermiculita o esmectita, mientras que otra parte quedó después de añadir el etilenglicol y calentar la muestra, comportamiento que es diagnóstico de clorita. El máximo de $\sim 7 \text{ \AA}$ colapsó al calentar la muestra hasta $550 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que es un comportamiento típico para mineral tipo caolinita. Los resultados observados en este difractograma indican que la muestra contiene minerales arcillosos principalmente del tipo illita y caolinita, así como clorita en menor proporción y esmectita como trazas.

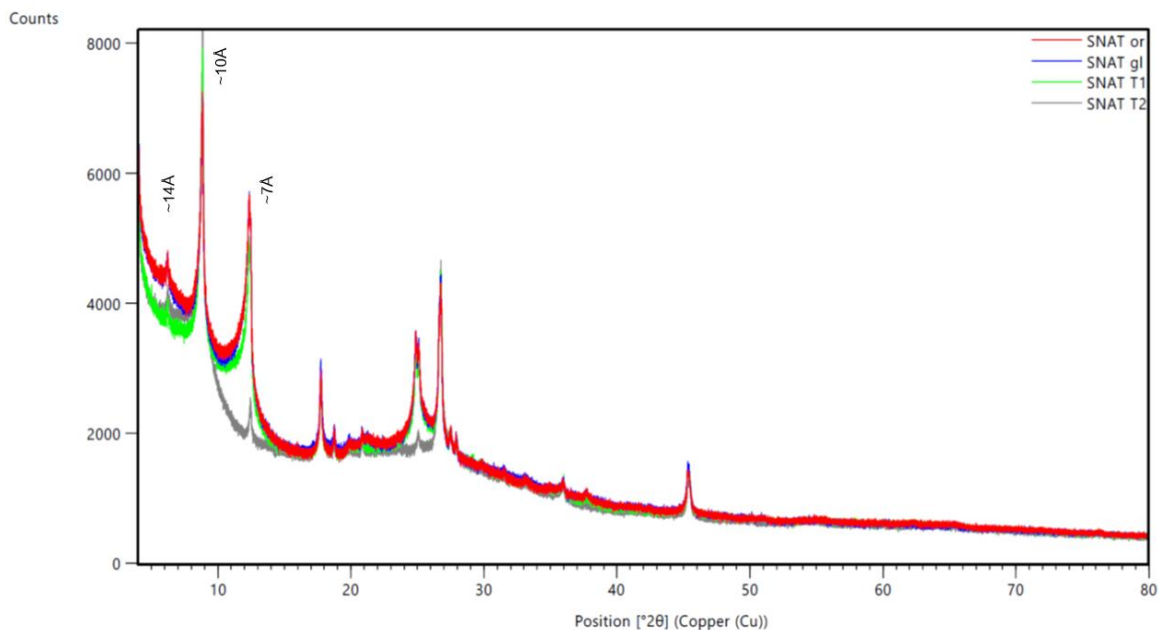


Figura 5.39. Mineralogía de arcillas del suelo natural. Difractograma que muestra la composición mineralógica de la muestra de suelo natural en el interior de la zona minera en Buenavista del Cobre, en Cananea.

6. DISCUSIÓN

6.1 Formación y transformación de minerales arcillosos

Tal como se describió en el Capítulo 3 y como se corroboró en nuestros resultados mediante la técnica de difracción de rayos X, la presencia de minerales arcillosos es abundante en las rocas originales del yacimiento, la que está comprobada por la detección de esos minerales en la fracción fina de la muestra de jal gris no alterado, así como el hallazgo de filosilicatos en la muestra total de la roca consolidada. Esta presencia está condicionada por el tipo de rocas y la alteración ocasionada mediante hidrotermalismo, lo que aceleró el proceso de formación de minerales arcillosos.

Se sabe que la zona de estudio está dominada por paquetes de rocas ígneas de composición intermedia-ácida con intercalaciones de volcanoclásticos que presentan alteración hidrotermal como propilitización, argilización y oxidación. La asociación mineral de la alteración propilítica incluye a la illita y a la esmectita y en la alteración argílica están presentes arcillas como caolinita, illita y esmectita (Arribas, 1995), así como interestratificaciones de illita-montmorillonita (Mykietiuik et al., 2005). Lo anterior soporta la idea de que los minerales arcillosos de los suelos de la zona ya constituían la mineralogía de las rocas.

El intemperismo y los procesos pedogenéticos influyen en la formación o en el incremento de la cantidad de los minerales arcillosos, alterando total o parcialmente a los minerales constituyentes del material parental, reduciendo la proporción de los minerales primarios y aumentando la cantidad de arcillas (Allen & Hajek, 1989). Bajo esta consideración, es de esperarse una reducción en la granulometría, por lo que los minerales arcillosos que resultan de la transformación tenderán a concentrarse en el tamaño de grano arcilla.

La transformación de los minerales primarios también ha podido derivar en la formación de minerales arcillosos mediante el intemperismo de los primeros. El intemperismo podría dar lugar a la transformación de minerales como las micas o el feldespato potásico para formar illita o a la reducción de la cristalinidad de este mineral mediante la salida del K⁺ del espacio interlamina por la influencia del agua en estos minerales.

Dadas las características del proceso de beneficio puede decirse que se trata de un “intemperismo acelerado”, pues primero se realiza un procedimiento de trituración de las rocas para disminuir su tamaño de partícula, y posteriormente se utilizan ácido y agua, lo que proporciona elementos suficientes para conseguir la degradación y transformación de los minerales presentes. Un comportamiento similar se origina cuando los jales mineros entran en contacto con el agua residual y continúa la alteración de los minerales primarios.

En este sentido, se observó que los difractogramas del jal sin oxidar y del jal en contacto con agua residual son muy similares, es decir, los minerales arcillosos con agua negra son casi iguales al jal original, la única diferencia es la presencia de esmectita. Probablemente se trata de una esmectita neoformada por proceso de transformación de clorita. La clorita es un mineral que en el medio edáfico es bastante inestable, la cual mediante el efecto del agua, actividad biológica, presencia de CO₂, y presencia de ácidos orgánicos, se transforma a esmectita. Esto sólo se presenta en la parte más inestable, mientras que en la illita y en la caolinita no se presentan cambios.

En el suelo natural la composición de los minerales arcillosos también es similar a la del jal gris (sin oxidar), lo que confirma que esos minerales principalmente están heredados del material parental.

Por otro lado, en el jal oxidado se observaron diferencias mayores en el difractograma. Por ejemplo, la intensidad de todos los picos es muy baja y sólo queda el máximo de mica. Una posible interpretación consiste en destrucción y amorfización de los minerales arcillosos cristalinos por efecto de los ácidos que se forman en el transcurso de la oxidación de los sulfuros, destacando que este proceso tendría que haberse presentado en un periodo muy corto de tiempo. Sin embargo, no se puede excluir también un efecto metodológico, puesto que las muestras de jal oxidado contienen abundantes óxidos de hierro que agregan partículas arcillosas y no permiten su orientación en los especímenes para DRX, además de la también abundante presencia de sulfatos, lo que puede disminuir la calidad de los difractogramas. En los estudios futuros es necesario incluir para estas muestras un pre-tratamiento adicional para eliminar esos componentes, sin afectar a los minerales arcillosos.

6.2 Efecto del agua residual sobre los jales mineros

Como se ha mencionado, existen reportes de algunos efectos que se obtienen al mantener inundados los jales mineros. En concordancia con lo anterior, pudimos observar diversas consecuencias positivas que tuvieron lugar en los sitios en los que el agua residual tuvo presencia.

6.2.1 Condiciones fisicoquímicas

Pudimos comprobar mejoras en las condiciones fisicoquímicas de los sitios en los que el agua residual está presente. Tal como puede observarse en la Tabla 5.7 presentada en el Capítulo 5, los valores de pH fueron más altos en los perfiles en los que la influencia del agua residual es mayor. En este sentido, los perfiles PA-01 y PA-02 tienen los valores más altos de pH y son los que se ven fuertemente afectados por el agua residual. Este aumento en el pH puede estar influenciado por los iones y materia orgánica presentes en el agua residual.

El perfil de transición PC-01 muestra valores ligeramente menores que los de los perfiles anteriores, y se hacen mayores a profundidad, justamente en los horizontes en los que se encontraron evidencias de acumulación de restos orgánicos y bioturbación.

La muy escasa presencia de agua residual que se presenta en el perfil PB-01 coincide con menores valores de pH que se tienen en los horizontes de este perfil. Lo anterior se ratifica cuando se analizan los valores de pH en los perfiles en los que la presencia de agua residual es nula (PB-02, PC-02 y PD-02). En ellos se presentan los valores más bajos de pH de todas las muestras tomadas en los jales de la presa, llegando a ser incluso menores a 6. En estos no existe evidencia de restos orgánicos, pero sí alta oxidación de sulfuros. Al no tener influencia alguna de agua residual no cuentan con la adición de iones, lo que podría favorecer el aumento del pH y al no permanecer inundados tienen condiciones aerobias que oxidan los sulfuros.

Otro aspecto para destacar es la conductividad eléctrica. Se determinó que este parámetro es mayor en el horizonte más superficial de cada perfil. Esto puede explicarse por el fenómeno de capilaridad que frecuentemente se presenta en zonas áridas. También se hizo evidente que los perfiles que tienen abundante o intermedia influencia del agua residual presentaron valores más bajos de CE en su horizonte superficial que en el perfil en el que se tiene muy escasa o nula presencia de esta.

Dentro de los horizontes, los mayores valores de CE se determinaron en los horizontes con la textura más fina (arcillo limosa), lo que se entiende si se considera que las partículas arcillosas tienen mayor capacidad de intercambio catiónico que las partículas tamaño arena, por lo que son capaces de retener más iones provenientes del agua residual y de las propias sales que pueden derivarse de las rocas del yacimiento. La excepción a esto se

presentó en los perfiles más influenciados por agua residual, en donde el horizonte con textura arcillo arenosa tiene mayor CE que el horizonte con textura arcillo limosa. Esto se puede atribuir a los periodos prolongados de inundación con agua residual, lo que dificulta el lavado de las sales hacia el horizonte inferior y al efecto que ocasiona la presencia de un horizonte menos permeable por debajo de uno con partículas más gruesas, lo que impide el movimiento vertical hacia abajo de estas sales, originando la mayor acumulación en el horizonte superficial.

6.2.2 Contenido de restos orgánicos y bioturbación

Las concentraciones de restos orgánicos están en función de la cantidad de agua residual presente en la zona de los perfiles. Por ello, en los perfiles PA-01 y PA-02 se tienen las mayores evidencias de restos orgánicos, pues al recibir la materia orgánica e iones provenientes del agua residual ha sido posible el desarrollo de especies vegetales que se han asentado en la zona, lo que ocasiona la presencia de raíces que se acumulan en el suelo.

Los restos orgánicos se encontraron en los horizontes en los que el pH estaba por arriba de 7, lo que está determinado por la presencia de agua residual. Estos restos se encontraron en diferentes estados de descomposición, desde bien preservados hasta alta descomposición. En función del estado de descomposición se presenta una zona de coloración rojiza, que es el resultado de la descomposición de estos elementos y de la acumulación de óxidos, probablemente formando complejos organominerales.

Debido a la disponibilidad de nutrientes en el agua residual las plantas disponibles han podido establecerse, desarrollarse y extender sus raíces a través del Technosol. Esta extensión de raíces ha ocasionado bioturbación, lo que provoca aumento en la porosidad

de este suelo. Lo anterior se comprueba al observar la micromorfología, en la que se distinguen poros más grandes que las raíces que los formaron. Lo anterior se debe a la pérdida de humedad en el tejido orgánico al morir las raíces, es decir, estas disminuyen su volumen pero el poro permanece del tamaño mayor que alcanzó la raíz.

Al igual que la acumulación de restos orgánicos, la bioturbación es un indicador importante del desarrollo de procesos pedogenéticos, y en los jales en los que no se tiene presencia de agua residual no se observaron estos procesos.

Este tipo de procesos no tienen lugar en jales mineros, particularmente en un periodo tan corto de tiempo. La acumulación de restos orgánicos, bioturbación y formación de proto agregados son efectos claros ocasionados por la presencia del agua residual. Todo lo anterior, eventualmente ocasionará agregados de mayor tamaño, confiriendo al suelo una estructura más desarrollada y adecuada para la proliferación de especies vegetales y animales.

6.2.3 Elementos mayores y menores en las muestras de jales

En las muestras de suelo obtenidas en la presa de jales No. 3, se determinó que los elementos mayores son el hierro y el potasio, y en menor medida el calcio. Esto se entiende al conocer el tipo de yacimiento del que se habla y del tipo de rocas que lo componen. Dado que las rocas que componen el yacimiento son ígneas plutónicas se entiende el elevado contenido de aluminosilicatos, en particular de feldspatos potásicos y feldspatos cálcicos contenidos en las rocas. El calcio también podía derivarse de la zona de skarn que presenta mineralización que es producto de la intercalación de cuarcitas con rocas carbonatadas paleozoicas.

Las mayores concentraciones de hierro se presentan en los horizontes con texturas más gruesas, justamente en donde se aprecia ligera oxidación al evaluar los perfiles. Caso particular es el del horizonte C2 en el perfil PB-01 (en el que se presenta muy escasa o nula presencia de agua residual), para el que se determinó la mayor concentración de hierro de todos los perfiles en jales. La alta concentración del hierro se debe a los minerales que conforman el yacimiento, siendo la pirita y calcopirita los principales.

En estos perfiles los elementos menores con mayor concentración son el manganeso, en primer lugar, y el cobre en segundo. La alta concentración del cobre como elemento menor es debida a la concentración de este, que es el principal negocio de esta mina, pues la recuperación no es del cien por ciento. En este sentido, los principales minerales de los que proviene el cobre son la calcopirita y la calcocita. En el caso del manganeso la concentración puede ser originada por sales que ascienden por capilaridad. Se ha reportado este comportamiento en jales mineros (Romero et al., 2019), siendo la apjonita el principal mineral de manganeso que se presenta.

La concentración de metales potencialmente tóxicos se determinó como baja. Tales son los casos del arsénico, el plomo y el zinc. Si bien la concentración del zinc es baja, se entiende que sea mayor que la del Pb y As, pues el Zn es un mineral asociado en el yacimiento, siendo la esfalerita (sulfuro de zinc) el mineral más representativo en este sentido.

Como se aprecia en los resultados, la mayor concentración de metales pesados se da en los perfiles que no tienen presencia de agua residual. Probablemente, en los perfiles con presencia de agua residual se presenta un efecto de lavado, que entre otras cosas, limita el ascenso de sales, translocación de iones y mantiene las concentraciones más bajas que en los perfiles sin influencia de agua residual.

6.2.4 Rasgos micromorfológicos determinantes

La formación de proto agregados es una clara evidencia del efecto positivo de las aguas residuales en los jales mineros, lo que pudo verificarse mediante la técnica micromorfológica. De igual forma el contenido de restos orgánicos y la bioturbación que estos ocasionan. Ninguna de estas evidencias se encontró en los perfiles de jales sin influencia de agua residual.

6.3 Suelo natural de la isla en contacto con jales

En esta sección se discutirán los resultados obtenidos para el perfil de la isla en la presa de jales. En principio se considera un perfil de suelo natural, coincidentemente en contacto con los jales de la presa No. 3.

6.3.1 Condiciones fisicoquímicas

En concordancia con lo mostrado en la Tabla 5.7, presentada en el Capítulo 5, se encontró que en este sitio los valores de pH son bajos, muy similares a los determinados en los jales que no tienen influencia de agua residual. Los valores de pH y CE parecen presentar una correlación lineal negativa, pues los menores valores de pH corresponden con mayor conductividad eléctrica.

6.3.2 Contenido de restos orgánicos y bioturbación

Las evidencias de acumulación de restos orgánicos encontradas en este perfil indican que hay moderada presencia de elementos orgánicos, tal como se pudo constatar en campo. A pesar de no contar con abundantes restos, si existe variedad de estados de estos elementos, es decir, algunos restos de raíces se encuentran bien preservados, mientras que otros se identificaron con avanzado estado de descomposición.

Estos elementos orgánicos muestran evidencias de la gran oxidación presente en los suelos o sedimentos de la zona. Algunas raíces tienen un recubrimiento en sus bordes externos,

el cual aparentemente consta del material oxidado de la matriz que se incorpora al tejido más externo del elemento orgánico. Lo anterior nos habla de la intensa oxidación que se presenta en estos suelos, y es clara referencia de lo que podría ocurrir con los jales en el futuro.

La bioturbación es similar a la encontrada en las muestras de suelo de los jales mineros. Existen poros generados por la penetración de raíces, que al morir y perder humedad dejaron el poro de mayor tamaño que el volumen del tejido actual. Una marcada diferencia es la bioturbación ocasionada por mesofauna, dejando incluso evidencias de coprolitos en los poros. Esta última no se encontró en las muestras de jales. Probablemente este suelo tiene mucho mayor tiempo de desarrollo y una mejor disponibilidad, aunque ligera, de nutrientes esenciales para los organismos.

6.3.3 Concentración de elementos mayores y menores en la isla

Al graficar y analizar los valores de concentración de elementos mayores de este perfil, se hizo evidente la poca variación que existe entre cada horizonte. Por ejemplo, para el caso del hierro, la concentración en cada horizonte se encuentra cercana a 5%. En el caso del potasio, todos los horizontes tienen valores de concentración cercanos a 2%.

Si se analizan los valores de concentración de los elementos menores, el comportamiento es muy similar al anterior. Las variaciones en los valores son muy pequeñas, dando como resultado, prácticamente líneas verticales. Esto hace parecer que este no es un suelo naturalmente establecido y desarrollado. Sino que en realidad se trata de un suelo removido de su posición original, homogenizado por algún método y depositado en la presa de jales como material para elaborar un camino o una estructura similar.

6.3.4 Rasgos micromorfológicos determinantes

Para respaldar la teoría del depósito de este material después de ser removido de otro sitio, se tienen las rasgos micromorfológicos de los cutanes fragmentados. Estos son fragmentos de cutanes de arcilla que rellenaron poros y fracturas, sin embargo, en este perfil se encuentran fragmentados, discontinuos y en posiciones que no corresponden con la formación de este tipo de elementos, lo que indica que existieron condiciones de extracción, reacomodo y depositación del material.

6.4 Suelos naturales fuera de la presa de jales

Aquí se discutirán los resultados obtenidos para los perfiles de suelos naturales, tanto de la parte alta de la ladera, como de la parte baja.

6.4.1 Condiciones fisicoquímicas

Tal como puede observarse en la Tabla 5.7, presentada en el Capítulo 5, se determinó que en los perfiles de suelo natural se presentan los valores más bajos de pH, incluso por debajo de los encontrados en los perfiles de jales sin influencia de agua residual. Los valores de pH y CE presentan una correlación lineal negativa, pues los menores valores de pH corresponden con mayor conductividad eléctrica.

6.4.2 Contenido de restos orgánicos y bioturbación

Las evidencias de acumulación de restos orgánicos encontradas en este perfil indican que hay moderada presencia de elementos orgánicos, tal como se pudo constatar en campo. La cantidad de restos orgánicos es moderada, aunque mayor que en perfil de la isla, por ejemplo. Estos elementos se encuentran desde bien preservados hasta moderado estado de descomposición.

Estos elementos orgánicos muestran evidencias de la gran oxidación presente en los suelos naturales de esta zona. Algunas raíces tienen un recubrimiento en sus bordes externos, el cual aparentemente consta del material oxidado de la matriz que se incorpora al tejido más externo del elemento orgánico. Lo anterior nos habla de la intensa oxidación que se presenta en estos suelos, y es clara referencia de lo que podría ocurrir con el suelo de jales en el futuro.

La bioturbación es similar a la encontrada en las muestras de suelo de los jales mineros. Existen poros generados por la penetración de raíces, que al morir y perder humedad dejaron el poro de mayor tamaño que el volumen del tejido actual. Al igual que en perfil de la isla, en los suelos naturales existe una marcada diferencia que es la bioturbación ocasionada por mesofauna, la cual dejó evidencias de coprolitos en los poros. Esta última no se encontró en las muestras de jales. Probablemente este suelo tiene mucho mayor tiempo de desarrollo y una mejor disponibilidad, aunque ligera, de nutrientes esenciales para los organismos.

6.4.3 Concentración de elementos mayores y menores en los suelos naturales

En las muestras de suelos naturales obtenidas, se determinó que los elementos mayores son el hierro y el potasio, y en menor medida el calcio. Esto se entiende por el tipo de yacimiento del que se habla y del tipo de rocas que lo componen. Dado que las rocas que componen el yacimiento son ígneas plutónicas se entiende el elevado contenido de aluminosilicatos, en particular de feldespatos potásicos y feldespatos cálcicos contenidos en las rocas. Las mayores concentraciones de hierro se presentan hacia los horizontes más profundos del perfil. La alta concentración del hierro se debe a los minerales que conforman el yacimiento, siendo la pirita y calcopirita los que principalmente pueden aportarlo.

En estos perfiles los elementos menores con mayor concentración son el manganeso, en primer lugar, el zinc en segundo lugar y el cobre en tercero. La alta concentración del cobre como elemento menor se entiende fácilmente, pues la producción de cobre es el principal negocio de esta mina. En este sentido, los principales minerales de los que proviene el cobre son la calcopirita y la calcocita. En el caso del manganeso la concentración puede ser originada por sales que ascienden por capilaridad. Se ha reportado este comportamiento en jales mineros (Romero et al., 2019), siendo la apjonita el principal mineral de manganeso que se presenta. Otra posible explicación es que este elemento también se encuentra en mayor concentración debido al transporte eólico que puede ocurrir desde la presa de jales y se acumula en las partes más someras de los suelos naturales. Para comprender la alta concentración del zinc, como elemento menor, es necesario saber que el zinc es un elemento asociado en el yacimiento, por lo que se tienen altas concentraciones de este elemento (siendo la esfalerita el principal mineral), incluso para ser considerado como económicamente rentable.

La concentración de metales potencialmente tóxicos se determinó como baja. Tales son los casos del arsénico y el plomo, cuya concentración sí es mayor en estas muestras de suelo natural que las observadas en los suelos en los jales.

Estos elementos menores tienen las mayores concentraciones hacia la base de los perfiles, en donde se encuentran las texturas más finas, con mayor porcentaje de arcillas, lo que les confiere un carácter más reactivo, con más sitios de intercambio. También el pH se incrementa ligeramente en profundidad, lo que también puede determinar las mayores concentraciones en estos horizontes.

6.4.4 Rasgos micromorfológicos determinantes

Se encontraron rasgos micromorfológicos que dan soporte a lo determinado mediante las propiedades fisicoquímicas y de fluorescencia de rayos X. Por ejemplo, los nódulos o concreciones que se observaron en las secciones delgadas. Estos se encontraron en los horizontes más profundos de estos perfiles de suelo natural. Coincide con las mayores concentraciones de Fe y Mn, determinadas en esos horizontes.

La micromorfología también mostró lo que se había descrito en las texturas de estos suelos, al encontrar evidencias de abundantes cutanes de arcillas, que coincide con las texturas determinadas para cada horizonte. Además, mostró la abundante oxidación que existe en estos suelos, lo que en campo también fue evidente al analizar el perfil y las muestras de mano.

6.5 Fertilidad y cationes intercambiables

6.5.1 Materia orgánica y elementos nutritivos

Tal como indican los resultados mostrados en las Figuras del capítulo 5, los contenidos de materia orgánica en las muestras pertenecientes a los perfiles de la Presa de jales No. 3 (PA01, PB01, PC01, PA02, PB02 y PD02) son muy bajos. Todos ellos se encuentran por debajo del 0.4 %. Caso contrario a lo que se tiene en las muestras del perfil de suelo natural, en donde el valor más alto es 4.58 %. Esto lo esperábamos, pues es ampliamente conocido que el contenido de materia orgánica en los jales mineros es muy bajo, cuando no es inexistente.

El contenido de materia orgánica podría asumirse mayor si se tiene en cuenta que el agua residual puede aportarla al ser vertida en la presa de jales. Tal como se observó en campo, el agua residual que se vierte en la presa No. 3 viene bombeada desde los repesos en los que previamente se almacena, y es ahí en donde probablemente se queda la mayor

cantidad de materia orgánica disponible, asentada en el fondo de estos repesos. Esto puede pensarse si se toma en cuenta que, una vez bombeada, el agua residual que finalmente llega a la presa de Jales es bastante cristalina, sin olor fétido fácilmente detectable y con muy pocas partículas en suspensión, comparado con lo que se aprecia en los propios repesos de almacenamiento. En esos sitios la coloración del agua residual es más oscura, con más partículas suspendidas y ahí sí se percibe un olor fétido.

La otra entrada probable de materia orgánica son los restos vegetales de las especies que crecen en el sitio, como resultado de los pocos nutrientes y agua que están disponibles en la zona, a raíz de las descargas de agua residual. Esta entrada también se entiende mínima, puesto que es relativamente corto el tiempo en el que han ocurrido las descargas de agua residual, así como son pocas las evidencias de organismos vegetales que han comenzado a colonizar la zona. Resultaría interesante continuar con estas observaciones por más tiempo, con el fin de comprobar si el contenido de materia orgánica se podrá incrementar con el tiempo.

El bajo porcentaje de materia orgánica nos indica, que en efecto, los residuos mineros de la presa de Jales No. 3 se encuentran en una etapa temprana de pedogénesis, y a pesar de ello el efecto del agua residual ha sido tal que ha tenido gran influencia en el desarrollo de otros procesos pedogenéticos, tal como se ha descrito en otros apartados de este mismo capítulo.

A diferencia de lo ocurrido con la materia orgánica, y de acuerdo con los resultados mostrados en el Capítulo 5, se aprecia que los valores de fósforo son más altos en las muestras de la presa de Jales que en las muestras de suelo natural.

El fósforo está, de acuerdo con estos resultados, más presente en los horizontes de los perfiles en los en teoría se tiene un grado mayor de afectación por agua residual. El perfil PA01 del primer transecto es el que presenta los mayores valores de fósforo, así como en el perfil C, que en teoría cuenta con periodos con presencia de agua y periodos en los que el agua residual no está presente. Probablemente este contenido de fósforo esté condicionado por el agua residual, pues se ha reportado que en este tipo de aguas se tiene relativamente alto contenido de este, tanto en forma orgánica como inorgánica.

Las concentraciones de K son más altas en los horizontes más superficiales de cada perfil. Este comportamiento puede estar asociado con el ascenso de las sales por capilaridad. El valor más alto se tuvo para el perfil PD-02, y este perfil se encuentra una zona en la que aparentemente no ha habido influencia de agua residual en superficie, lo que probablemente indica que no ha existido lavado de los componentes hacia las partes más profundas. La concentración de K en el suelo natural es visiblemente más alta que la determinada en los horizontes más profundos de los perfiles en la presa de jales. Probablemente porque al ataque de los ácidos en el proceso de beneficio remueve principalmente los iones de K y altera los minerales arcillosos, mientras que en el suelo natural este proceso no ocurre y siguen presentes.

6.5.2 Cationes intercambiables

Tal como indican los resultados mostrados en la Tabla 5.8 del Capítulo 5, el mayor porcentaje de saturación en los cationes intercambiables lo ocupa el Ca, siendo ampliamente dominante en cada una de las muestras seleccionadas. Se entiende que el Ca es abundante dada la alta presencia de plagioclasas en las rocas del yacimiento.

Esta elevada saturación puede tener un impacto positivo, al tratarse de residuos de una presa de jales de una mina de cobre (téngase referencia de los problemas de acidez que pudieran existir, la nula o incipiente estructura de los sedimentos y la baja diversidad de microorganismos y especies vegetales presentes), pues es bien conocido que el calcio disponible en el suelo puede apoyar en varias funciones. Entre estas se podría mencionar que el calcio puede ayudar a formar agregados, los cuales mantienen su forma y no se destruyan, por ejemplo, como efecto de la erosión. Esta formación de agregados también ayuda a mejorar la aireación, pues permiten una mayor oxigenación para la vida de la microfauna; y mejoran la circulación del agua, por efecto de los espacios generados entre los agregados. El calcio además ayuda a elevar el pH (incrementando la disponibilidad de algunos nutrimentos). Y evidentemente sirve como nutrimento para diferentes microorganismos y vegetación que se presenten en el suelo, además de que permite desplazar el sodio de las partículas del suelo.

Hablando del sodio, y con base en los resultados mostrados en el Capítulo 5, se identificó que la saturación de este es relativamente baja. Sin embargo el comportamiento resulta interesante. La concentración de sodio es visiblemente más alta en los perfiles en los que la interacción con el agua residual es nula o muy poca. Prueba de ello es lo observado en los perfiles PB01, PD02 y PC01, en ese orden.

Las concentraciones de Na son más altas en los horizontes más superficiales de cada perfil. Este comportamiento puede estar asociado con el ascenso de las sales por capilaridad. El valor más alto se tuvo para el perfil PB01, y este perfil se encuentra en una zona en la que aparentemente ha habido nula o muy poca influencia de agua residual en superficie, por lo que no se ha presentado un efecto de lavado de estas sales.

La concentración de sodio es más alta en los perfiles en los que se tiene mayor influencia de agua residual (PA01 y PA02) que en los perfiles de suelo natural (PSN). Probablemente, a pesar del lavado que puede presentarse en PA01, la cantidad de iones contenidos en el agua residual mantiene la concentración al menos mayor que en el suelo natural, en donde quizá estos iones han sido lavados desde hace tiempo.

En el caso del magnesio, se tiene un comportamiento similar al del Na. Las concentraciones de Mg son más altas en los horizontes más superficiales de cada perfil. Este comportamiento también puede estar asociado con el ascenso de las sales por capilaridad. El valor más alto se tuvo para el perfil PB01, y este perfil se encuentra en una zona en la que aparentemente ha habido nula o muy poca influencia de agua residual en superficie, por lo que no se ha presentado un efecto de lavado de estas sales.

Dado que los resultados muestran que los valores de magnesio son elevados en el suelo natural y en los perfiles con mayor influencia de agua residual, se puede interpretar que la alta concentración en el suelo natural probablemente se debe a la presencia de piroxenos en las rocas del yacimiento, mientras que en la zona en la que se tiene la mayor influencia del agua residual (PA01 y PA02) es probable que el agua contenga el Mg como parte de los iones que transporta, lo que origina los valores relativamente más altos que los que se determinaron para los horizontes más profundos de PB01 y PC01.

Para los iones Al e H se apreció un comportamiento interesante. Estos dos únicamente estuvieron presentes en cinco muestras (una por horizonte evaluado), de las cuales dos correspondieron con el perfil PB01, una con el perfil PB02 y dos más con los dos horizontes más superficiales del perfil de suelo natural. Si se comparan las Tablas 5.7 y 5.8 del Capítulo 5, se hace evidente una correlación entre el pH y CE con estos iones.

En el horizonte PB01-C1 apenas se hizo evidente la presencia de Al mientras que en el horizonte PB01-C2 la lectura de Al e H sí fue mayor. Justamente en ese horizonte se tiene el menor valor de pH dentro de los horizontes evaluados en los perfiles del primer transecto. De igual forma, en el horizonte PB02-C1 se registró presencia de estos iones y es, en efecto, un valor aún más bajo de pH. Nuevamente, en ese perfil se tiene nula o muy escasa influencia de agua residual. En las muestras de suelo natural también se detectó la presencia de Al e H y estos horizontes también presentaron valores ácidos a ligeramente ácidos de pH. Es decir, se observa una correlación entre la presencia de estos iones y un pH bajo, comparando con los demás horizontes analizados con estas muestras.

Si se tiene en mente la Tabla 5.8 y las Figuras 5.13 a 5.16 del Capítulo 5, resulta interesante el comportamiento de la CIC y el contenido de materia orgánica. Si bien es cierto que los horizontes de suelo natural presentan mayor contenido de materia orgánica, son los horizontes más superficiales de cada uno de los perfiles en la presa de jales, los que presentan la CIC más alta. Incluso los horizontes profundos evaluados presentan valores semejantes o un poco más altos que los de suelo natural en cuanto a este parámetro. Lo anterior, aunado a los resultados de mineralogía de arcillas nos lleva a pensar que el contenido de arcillas en efecto es derivado del material parental, en cuya composición ya existían minerales arcillosos originados por los procesos de alteración hidrotermal que tuvieron lugar en el sitio. Entonces, el material presente en la presa de jales, en particular el que está bajo mayor influencia del agua residual tiene características que pueden ser favorables para el intercambio de elementos nutritivos y el desarrollo de especies vegetales.

6.6 Diferencias entre Technosol en jales y suelos naturales

Si bien los efectos del agua residual sobre los suelos en jales son bastante evidentes, es importante remarcar ciertos aspectos que ayuden a un mejor entendimiento del contexto.

Los Technosoles, en este caso, son suelos jóvenes, con poco desarrollo y que de entrada cuentan con ciertas características que los identifican como muy poco favorables para el asentamiento y el buen desarrollo de especies vegetales y animales. Presentan bajo contenido de materia orgánica y nula o muy poca estructura. Sin embargo, al realizar los análisis fisicoquímicos hemos podido comprobar que, los sitios con mayor influencia del agua residual presentan mejores características, que probablemente pueden favorecer el desarrollo de especies vegetales y animales. Entre estas propiedades podemos mencionar un pH más elevado que el esperado en estos sitios, incipiente desarrollo de estructura que ha tenido lugar en un periodo corto de tiempo, procesos de bioturbación del suelo, aumento de los espacios porosos, presencia de raíces y ligera presencia de contenido de materia orgánica.

A diferencia de los primeros, los suelos naturales analizados, así como el suelo de la isla, muestran evidencias de un largo desarrollo y escasa (pero constante) presencia de pastos y arbustos. Además se aprecia presencia de agregados y de estructura. La oxidación de los sulfuros presentes y también los óxidos que son producto de intemperismo avanzado de los silicatos y filosilicatos presentes (que tiñen la matriz), son evidencias claras de la fuerte intensidad que estos procesos tienen en la zona. Sin embargo, la composición de los minerales arcillosos no difiere mucho entre los Technosoles de los jales y los suelos naturales maduros. Desde nuestro punto de vista eso indica que la mineralogía de las arcillas, en gran medida fue predeterminada por procesos hidrotermales y este material fue heredado de la roca madre, con cambios pedogenéticos posteriores de escala menor.

En este mismo sentido, la iluviación de arcillas presente en estos perfiles también indica un avanzado desarrollo del suelo. Este fenómeno puede tener su origen en la estacionalidad presente en la zona (de acuerdo con los datos presentados en la Figura 3.5 del Capítulo 3.

Estos datos reflejan un marcado régimen de lluvias bimodal, el principal entre julio y septiembre y otro entre diciembre y marzo. Esto es importante porque proporciona condiciones adecuadas para que, durante el periodo de lluvias, las arcillas entren en suspensión y se muevan a través del perfil, mientras que en las temporadas de secas este proceso se interrumpe de forma temporal. Además, los valores de pH ligeramente ácidos proporcionan un ambiente pedoquímico adecuado para el proceso de iluviación.

Un comportamiento similar ha sido bien documentado y descrito por algunos investigadores en el estado de Sonora, por ejemplo Cruz y Cruz *et al.* (2014), quienes describieron un proceso análogo como explicación para la formación de paleosuelos presentes en la región nor-noroeste del estado de Sonora. Sin embargo, dichos autores atribuyeron la formación de suelos rojos intemperizados a las condiciones paleoambientales más húmedas del Pleistoceno tardío. Cabe señalar que los estudios de Cruz y Cruz se realizaron en la zona más árida de Sonora, con precipitación actual menor de 300 mm. Suponemos que en la región de Cananea cuya precipitación varía entre 500 y 600 mm, el intemperismo e iluviación de arcilla pudieran ser procesos actuales.

Los procesos mencionados proporcionan la idea de lo que eventualmente podría ocurrir con los jales (si se considera que su tendencia natural será similar a la de los suelos naturales de la zona) si no se tiene alguna estrategia de remediación o tratamiento que mejoren las condiciones normales a las que están expuestos esta gran cantidad de materiales durante el año.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones de los efectos del agua residual en los jales

Con base en lo observado en este experimento pueden mencionarse varios efectos que el agua residual ha tenido sobre los jales mineros en los que ha tenido influencia. Evidentemente, se hace con referencia en lo observado en jales que no tienen influencia de estas aguas.

7.1.1 Conclusiones

- Para comenzar, fue muy evidente el efecto de disminución o inhibición en la oxidación de sulfuros. Los jales con mayor influencia de agua residual presentaron menores efectos en la oxidación de sulfuros, si es que se apreciaban algunos, mientras que los jales sin influencia de agua residual sí presentaron mayor oxidación de sulfuros, haciéndose presente incluso en la coloración de la matriz de las muestras.
- El contenido de restos orgánicos en los jales se presentó en los sitios en los que hubo influencia de agua residual. El mayor contenido de restos orgánicos se presentó en los sitios en los que la influencia del agua fue mayor. Ya sea que la zona se encuentre inundada por periodos largos de tiempo o que el nivel freático sea somero, la influencia del agua residual influye en el asentamiento y desarrollo de especies vegetales que originan la acumulación de restos orgánicos. Mientras que en los sitios sin influencia de agua residual no se lograron encontrar evidencias de restos orgánicos en las secciones delgadas.
- La bioturbación en los jales sólo fue encontrada en los sitios en los que hay influencia de agua residual. Las raíces de las especies vegetales penetran los sedimentos y originan bioturbación. Los sitios con mayor influencia de agua residual

presentaron las mayores evidencias de bioturbación, debido al mayor número de plantas en superficie.

- El valor de pH fue mayor en los sitios con influencia de agua residual, comparados con los sitios sin influencia de esta agua. Mientras más influencia de agua hay, mayor es el valor de pH en las muestras.
- La concentración de metales pesados fue baja en las muestras de jales, los mayores valores se tuvieron para cobre y manganeso. El arsénico, el plomo y el zinc son relativamente bajos y se encuentran por debajo de lo establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.
- Las técnicas micromorfológicas fueron muy eficientes y valiosas para detectar evidencias de procesos pedogenéticos que son cruciales en esta investigación. Los proto agregados presentes en las muestras de los perfiles PA-01 y PA-02, el gran contenido de restos orgánicos, los fenómenos de bioturbación, el aumento en el pH y la disminución en la oxidación de los sulfuros son evidencia clara del afecto positivo del agua residual en los jales. Sobre todo son evidencia clara de que se están llevando a cabo procesos pedogenéticos que no se tendrían en la zona de forma natural en un periodo tan corto de tiempo y de que se presentan procesos que soportan la idea de que el agua residual tiene efectos positivos sobre estos jales.
- Los resultados soportan la idea de que las aguas residuales pueden ser un elemento para considerar en el tema de rehabilitar un área degradada por actividades mineras, específicamente en sitio de disposición de jales mineros. Dado que se hicieron evidentes ciertos cambios y mejoras, es pertinente pensar que con más investigación al respecto se pueden determinar las mejores decisiones para abordar el uso del agua residual como un elemento que mejora las condiciones en jales mineros.

7.1.2 Recomendaciones

- En la medida de lo posible sería bueno realizar una nueva campaña para tomar más muestras y abarcar más zonas en la presa de jales. Con un número mayor de perfiles y muestras podría tenerse una caracterización más detallada de la variación de las propiedades y de los procesos pedogenéticos que se llevan a cabo.
- Realizar un tratamiento previo de las muestras seleccionadas para DRX, con el fin de eliminar los óxidos de hierro y sulfuros presentes, lo que podría resultar en difractogramas más confiables para las muestras de jal oxidado.
- Realizar una completa caracterización del agua residual con la que se cuenta en esta zona minera, para conocer las condiciones exactas de entrada antes de iniciar contacto con los jales. De ser posible, monitorear el agua a través de su paso y contacto con los jales y realizar más mediciones justo antes del momento en que termine su influencia con estos residuos mineros. Esto aportaría información relevante y sería un tema interesante para realizar una investigación de posgrado.
- Es altamente recomendable realizar campañas de investigación en más minas, con yacimientos similares al de Cananea y en otro tipo de yacimientos. Esto ayudaría a comprender los diferentes escenarios que pueden presentarse al pretender utilizar agua residual como elemento de mejora en zonas mineras. Cada uno de estos proyectos aportaría temas de investigación para alumnos de posgrado o posdoctorado, incrementaría la experiencia y nivel de conocimiento en este tema para todos los involucrados, e incluso podría llegar a generar ingresos económicos para el instituto de Geología de la UNAM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, P., Cama, J. and Ayora, C. 2007a. Rate law for galena dissolution in acidic environment *Chemical Geology*, 245, 219-229.
- Acero, P., Cama, J. and Ayora, C. 2007b. Sphalerite dissolution kinetics in acidic environment. *Applied Geochemistry*, 22(9), 1872-1883.
- Acero, P., Cama, J., Ayora, C. and Asta, M. P. 2009. Chalcopyrite dissolution rate law from pH 1 to 3. *Geologica Acta*, 7, 389-397.
- Al, T.A., Martin, C.J., Blowes, D.W., 2000. Carbonate-mineral/water interactions in sulfide-rich mine tailings. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64 (23), 3933–3948.
- Allen, B. L. & Hajek, B. F. (1989). Minerals occurrence in soil environments. In J. B. Dixon & S. B. Weed. (Eds.), *Minerals in soil environments* (199-278). USA: Soil Science Society of America.
- Álvarez, M., Liñán, J., Sarmiento, M., Cánovas, C. 2010. La contaminación minera de los ríos Tinto y Odiel. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva.
- Amato, J.M., Boullion, A.O., Serna, A.M., Sanders, A.E., Farmer, G.L., Gehrels, G.E., Wooden, J.L. 2008. Evolution of the Mazatzal province and the timing of the Mazatzal Orogeny: insights from U–Pb geochronology and geochemistry of igneous and metasedimentary rocks in southern New Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 120, pp. 328-346
- Ambika, S. R., Ambika, P. K. (2010). Crop growth and soil properties affected by sewage water irrigation - a review. *Agricultural reviews*, 31(3), 8.
- Anderson, T.H., Silver, T.H. 1977. U–Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora Econ. Geol., 72, pp. 827-836
- Angin, I., Yaganoglu, A.V., Turan, M. (2005) Effect of long term waste water irrigation on soil properties. *J. sust. Agric.* 26: 31.
- Arribas, A. Jr. (1995). Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. En J.F.H. Thompson (ed.), *Magma, fluids and ore deposits*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 23, pp. 419-454.
- Asta, M.P., Cama, J. and Acero, P. 2010a. Dissolution kinetics of marcasite at acidic pH. *European Journal of Mineralogy*, 22, 49-61.

- Asta, M.P., Cama, J., Ayora, C., Acero, P. and De Giudici, G. 2010b. Arsenopyrite dissolution rates in O₂-bearing solutions. *Chemical Geology*, 273, 272-285.
- Atlas de Riesgos del Estado de Sonora. 2021. Atlas Estatal de Riesgos para el Estado de Sonora.
<http://www.ars.gob.mx/municipioshtml/CANANEA/cananea.html>
- Banks, D., Younger, P.L., Arnesen, R-T., Iversen, E.R. and Banks, S.B. 1997. Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly. *Environmental Geology*, 32 (3), 157-174.
- Benner SG, Blowes DW, Ptacek CJ. 1997. A full-scale porous reactive wall for prevention of acid mine drainage. *Ground Water Monit Remediat.* 17:99– 107.
- Blowes, D.W., Jambor, J.L., 1990. The pore water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailings, Waite Amulet, Quebec Canada. *Applied Geochemistry* 5, 327–346.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., 1994. Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings. In: Jambor, J.L., Blowes, D.W. (Eds.), *The Environmental Geochemistry of Sulfide-mine wastes, Short Course, Handbook*, vol. 22. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 149–204.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., Weisener, C.G., 2004. The geochemistry of acid mine drainage. In: Lollar, B.S. (Ed.), *Treatise on Geochemistry*, vol. 9. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 149–204.
- Blowes D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L. and Weisener, C.G. 2005. The Geochemistry of Acid Mine Drainage. In: Sherwood Lollar, B. (ed.) *Treatise on Geochemistry*, vol. 9: Environmental Geochemistry. Elsevier-Pergamon, Oxford, 149-204.
- Boonstra J, van Lier R, Janssen G, Dijkman H, Buisman CJN. 1999. Biological treatment of acid mine drainage. In: Amils R, Ballester A, editors. *Biohydrometallurgy and the Environment Toward the Mining of the 21st Century*, vol. 9B. Elsevier: Amsterdam. p. 559–67.
- Brodie, G.A., Britt, C. R., Tomaszewski, T.M. y Taylor, H.N. 1993. Anoxic limestone drains to enhance performance of aerobic acid drainage treatment wetlands: experiences of the Tennessee Valley Authority. En: G. A. Moshiri (ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, CRC Press, Boca Raton, 129-138.
- Busby-Spera, C.J. 1988. Speculative tectonic model for the early Mesozoic arc of the south-west Cordilleran United States *Geology*, 16, pp. 1121-1125.

- Carretero, M. y Pozo, M. (2008). *Mineralogía aplicada: salud y medio ambiente*. Madrid, España: Paraninfo. p. 406.
- Chiu, K.K., Ye, Z.H., Wong, M.H., 2006. Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cumine tailings amended with manure compost and sewage sludge: A greenhouse study. *Bioresource Technology* 97, 158–170.
- Conesa, H.M., Faz, A., Arnaldos, R., 2006. Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena–La Union mining district (SE Spain). *Science of the Total Environment* 366, 1–11.
- Coulton R, Bullen C, Hallet C. The design and optimization of active mine water treatment plants. *Land Contam Reclam* 2003;11:273–9.
- Cravotta, C.A., 1998. Effect of sewage sludge on formation of acidic ground water at a reclaimed coal mine. *Ground Water* 35, 9–19.
- Cruz y Cruz, T., Sánchez, G., Sedov, S., Terrazas-Mata., A., Solleiro-Rebolledo, E., Tovar-Liceaga, R. E., Carpenter, J. 2014. Spatial variability of Late Pleistocene–Early Holocene soil formation and its relation to early human paleoecology in Northwest Mexico. *Quaternary International* Volume 365, 16 April 2015, Pages 135-149.
- De Giudici, G., Voltolini, M., Moret, M., 2002. Microscopic surface processes observed during the oxidative dissolution of sphalerite. *Eur. J. Mineral.* 14, 757–762.
- Del Río R., Ochoa L., Valencia M., Calmus T., Meza D., Salgado S., Kirk J., Ruiz J. & Mendivil H. 2015. New U-Pb and Re-Os geochronology of Laramide porphyry copper mineralization along the Cananea lineament, northeastern Sonora, Mexico: Contribution to the understanding of the Cananea copper district. *Ore Geol. Rev.*, 81 (3), 1125-1136. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.11.029.
- Descostes, M., Vitorge, P. and Beaucaire, C. 2004. Pyrite dissolution in acidic media. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 4559-4569.
- Dold, B., Fontboté, LI., 2001. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy and mineral processing. *Journal of Geochemical Exploration* 74, 3–55.

- Dudal, R., Nachtergaele F., Purnell, M. 2002. The human factor of soil formation. 17thWSS. 14–21 August 2002, Thailand. pp. 93-1–93-8.
- Dudka, S., Domy, A. 1997. Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review. *Journal of Environmental Quality*.
<https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600030003x>
- Eger, P. 1994. Wetland treatment for trace metal removal from mine drainage: the importance of aerobic and anaerobic processes. *Water, Science and Technology*, 29, (4), 249-256.
- EPA, 1996. Managing Environmental Problems at Inactive and Abandoned Metal Mine Sites. E.P.A./625/R-95/007.
- EPA, 2014. Reference guide to Treatment Technologies for Mining-Influenced Water.
- Ernst, W.H.O., 2005. Phytoextraction of mine wastes—options and impossibilities. *Chemie der Erde* 65 (S1), 29–42.
- Evangelou, V.P. 1995. Pyrite oxidation and its control. CRC Press, Boca Ratón, Florida, USA. 285 pp.
- Evangelou VP. 1998. Pyrite chemistry: the key for abatement of acid mine drainage. In: Geller A, Klapper H, Salomons W, editors. *Acidic Mining Lakes: Acid Mine Drainage, Limnology and Reclamation*. Berlin7 Springer. p. 197– 222.
- FAO-UNESCO. 2009. Guía para la descripción de suelos. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. p. 26.
- Forsberg, L.S., Ledin, S., 2006. Effects of sewage sludge on pH and plant availability of metals in oxidizing sulphide mine tailings. *Science of the Total Environment* 353, 21–35.
- Förstner, U., Wittman, T.W., 1979. *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, Berlin.
- Fripp, J., Ziemkiewicz, P. y Charkavorki, H. 2000. Acid mine drainage treatment. Ecosystem Management and Restoration Research Program (ERDC TN-EMRRP-SR-14), U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 7 pp.
- Gammons, C.H., Drury, W.J. y Li, Y. 2000. Seasonal influences on heavy metal attenuation in an anaerobic treatment wetland, Butte, Montana. *ICARD 2000*, 1159-1168.

- González-León, C. (2010). Evolución geológica y disposición del paisaje actual. En F, Molina y T. Van. (Eds), *Diversidad Biológica de Sonora* (pp. 27-28). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gray, C.W., Dunham, S.J., Dennis, P.G., Zhao, F.J., McGrath, S.P., 2006. Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud. *Environmental Pollution* 142, 530–539.
- Greaney A. T., Rudnick R. L. and Gaschnig R. M. (2016) Crustal sources of Molybdenum. *Goldschmidt Conference, Yokohama Japan*.
- Grupo México (2017). Historia del Portal Oficial de Grupo México. Sitio Web:
<http://www.gmexico.com/site/nosotros/historia.html>
- Hallberg KB, Johnson DB. Biodiversity of acidophilic microorganisms. *Adv Appl Microbiol* 2001;49:37 – 84.
- Hedin, R. 1997. Passive mine water treatment en the Eastern United States. *CIWEM National Conference, Minewater treatment using wetlands. Newcastle, 1, 1-15*.
- Holmes, P.R. and Crundwell, F.K. 2000. The kinetics of the oxidation of pyrite by ferric ions and dissolved oxygen: An electrochemical study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 263–274.
- Huot, H., Simonnot, M. O., Morel, J. L. *Pedogenetic Trends in Soils Formed in Technogenic Parent Materials. Soil Science, Lippincott, Williams & Wilkins, 2015, 180 (4/5), pp.182-192*.
- Ibarra-Arzave, G. (2019). Paleopedogenesis, sedimentacion y evolucion geomorfologica holocenica en el sistema fluvial del Arroyo Tinajas, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. México, Universidad Nacional Autónoma de México. v. 36, núm. 3, 2019, 378-392*.
- Inafed. (s.f.). Cananea. Junio de 2020, de inafed Sitio web:
<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/municipios/26019a.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Sonora. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
- IUSS Working Group WRB, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma*.

- Jambor, J.L., Blowes, D.W., Ritchie, A.I.M., 2003. Environmental Aspects of Mine Wastes. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, vol. 31, Canada.
- Janzen, M., Nicholson, R. and Scharer, J. 2000. Pyrrhotite reaction kinetics: Reaction rates for oxidation by oxygen, ferric iron, and for nonoxidative dissolution *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 1511-1522.
- Jimenez-Cisneros, B. 1995. Waste water reuse to increase soil productivity. *J. of water sci. Technol.* 32:173- 180.
- Johnson DB. 2000. Biological removal of sulfurous compounds from inorganic wastewaters. In: Lens P, Hulshoff Pol L, editors. *Environmental Technologies to Treat Sulfur Pollution: Principles and Engineering*. London: International Association on Water Quality. p. 175– 206.
- Johnson DB, Hallberg KB. 2002. Pitfalls of passive mine water treatment. *Re/Views Environ Sci Bio/Technol* 1:335–43.
- Kadlec, R. y Knight, R. 1996. *Treatment wetlands*. CRC/Lewis Press. USA, 893pp.
- Kalin M, Cairns J, McCready R. 1991. Ecological engineering methods for acid-mine drainage treatment of coal wastes. *Resour Conserv Recycl.* 5:265 – 75.
- Kalin M, Chaves WLC. Acid reduction using microbiology (ARUM) treating AMD effluent emerging from an abandoned mine portal. In: Ciminelli VST, Garcia Jr O, editors. *Biohydrometallurgy: Fundamentals, Technology and Sustainable Development*, vol. 11B. Amsterdam: Elsevier; 2001. p. 289– 96.
- Kepler, D. y McCleary, E. 1994. Successive alkalinity producing systems (SAPS) for the treatment of acidic mine drainage. *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Pittsburgh, April, 195-204.
- Kimball, BE, Rimstidt, JD and Brantley, S.L. 2010. Chalcopyrite dissolution rate laws. *Applied Geochemistry*, 25 (7), 972-983.
- Kleinmann RLP, Hedin RS, Nairn RW. 1998. Treatment of mine drainage by anoxic limestone drains and constructed wetlands. In: Geller A, Klapper H, Salomons W, editors. *Acidic Mining Lakes: Acid Mine Drainage, Limnology and Reclamation*. Berlin: Springer. p. 303–19.

- Larocque, A., Rasmussen, P. 1998. An overview of trace metals in the environment, from mobilization to remediation. *Environmental Geology*.
- Lilić, J., Cupać, S., Lalević, B., Andrić, V., Gajić-Kvaščev, M. 2014. Pedological characteristics of open-pit Cu wastes and postflotation tailings (Bor, Serbia). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(1),161-175.
- López, E., Aduvire, O., Baretino, D. 2002. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (1): 3-21.
- Lottermoser, B.G. 2003. *Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts*. Springer, Berlin, 304 pp.
- Malmström, M.E., Collin, C., 2004. Sphalerite weathering kinetics: effect of pH and particle size. In: Wanty, R.B., Seal, R.R., II (Eds.), *Water-Rock Interaction*, vol. 2. Taylor & Francis, London, pp. 849–852.
- McGregor, R.G., Blowes, D.W., Jambor, J.L., Robertson, W.D., 1998. The solid-phase controls on the mobility of heavy metals at the Copper Cliff tailings area, Sudbury, Ontario, Canada. *Journal of Contaminant Hydrology* 33, 247–271.
- Meinert, L.D. 1982. Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, Mexico *Econ. Geol.*, 77, p. 919-919
- Meléndez C. y Camacho, A. (2009). Espectrometría de fluorescencia de rayos x. *Aventuras del Pensamiento (UACH)*, 49 (enero-marzo 2009), 1-4.
- Mendez, M.O., Maier, R.M., 2008. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—an emerging remediation technology. *Environmental Health Perspective* 116, 278–283.
- Mills, C. 1995. Acid base accounting (ABA), metal leaching tests procedures and kinetic testwork interpretation. Seminar on Acid Rock Drainage of Mining Association of British Columbia, Vancouver, Canada, 33 pp.
- Moore, J., Luoma, S. 1990. Hazardous wastes from large-scale metal extraction. A case study. *Environmental Science & Technology* 1990 24 (9), 1278-1285
DOI: 10.1021/es00079a001.

- Morin, K.A. y Hutt, N.M. 2001. Description and assessment of drainage geochemistry. En: MDAG Publishing (ed.), Environmental geochemistry of minesite drainage: practical theory and case studies. Vancouver, British Columbia, Canada. Capítulo 4, 63-138.
- Moses, C.O. and Herman, J.S. 1991. Pyrite oxidation at circumneutral pH. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 471-482.
- Mulchay, R.B., Velasco, J.R. 1954. Sedimentary rocks at Cananea, Sonora, Mexico and tentative correlation with the sections at Bisbee and the Swisshelm Mountains, Arizona Min. Eng., 6, pp. 628-632
- Munsell Color (Firm). (2013). Munsell soil color charts : with genuine Munsell color chips. Grand Rapids, MI :Munsell Color.
- Mykietiuik, K., Fernández, R. y Azevedo, F. (2005). Alteraciones hidrotermales superpuestas: Producto de fluidos de pH neutro y ácido en el cerro Guanaco, macizo del Deseado, Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60 (1), 23-31.
- Navarro, A., Biester, H., Mendoza, J.L., Cardellach, E., 2006a. Mercury speciation and mobilization in contaminated soils of the valle del Azogue Hg mine (SE, Spain). *Environmental Geology* 49, 1089–1101.
- Navarro, A., Martínez, F., (2008). Effects of sewage sludge application on heavy metal leaching from mine tailings impoundments. *Bioresource technology*, 99(16), 7521-7530.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.022>
- Norland, M.R., Veith, D.L., 1995. Revegetation of coarse taconite iron ore tailing using municipal waste compost. *Journal of Hazardous Materials* 41, 123–134.
- Nordstrom, D.K. and Southam, G. 1997. Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation. In: Banfield, J.F. and Nealson, K.H. (eds): *Geomicrobiology: Interactions between Microbes and Minerals*, Rev. Mineral., Vol. 35, 361-390.
- Nordstrom, D.K. and Alpers, C.N. 1999. Geochemistry of Acid Mine Waters. In: Plumlee, G.S. and Logsdon, M.J. (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques and Health Issues*.

- Nordstrom, D. K., Alpers, C. N., Ptacek, C. J. and Blowes, D. W. 2000. Negative pH and extremely acidic mine Waters from Iron Mountain, California. *Environmental Science and Technology*, 34, 254-258.
- Nordstrom, D.K. 2003. Effects of Microbiological and Geochemical Interactions in Mine Drainage. In: Jambor, J.L., Blowes, D.W., Ritchie, A.I.M. (eds.), *Environmental Aspects of Mine Wastes*, Short Course Series Vol. 31, Mineralogical Association of Canada, 227-238.
- Ottenhof, C., Faz, A., Arocena, J., Nierop, K., Verstraten, J., van Mourik, J., 2007. Soil organic matter from pioneer species and its implications to phytostabilization of mined sites in the Sierra de Cartagena (Spain). *Chemosphere* 69, 1341–1350.
- Pellegrini, S., García, G., Peñas-Castejón, J.M., Vignozzi, N., Costantini, E. 2015. Pedogenesis in mine tails affects macroporosity, hydrological properties, and pollutant flow. *Catena* 136, 3-16.
- Pichtel, J.R., Jick, W.A., Sutton, P., 1994. Comparison of amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands. *Journal of Environmental Quality* 23, 766–772.
- Portal oficial del municipio de cananea. (2017). Cananea 2015-2018. Historia. Junio, 2017, Del portal oficial del municipio de cananea sitio web: <http://www.cananea.gob.mx>
- Portal oficial de la revista Mining Global. (2018).
Sitio web: <https://www.miningglobal.com/top10/top-10-copper-mines-world>
- Ribet, I., Ptacek, C.J., Blowes, D.W., Jambor, J.L., 1995. The potential for metal release by reductive dissolution of weathered mine tailings. *Journal of Contaminant Hydrology* 17, 239–273.
- Rimstidt, J.D., Chermak, J.A. and Gagen, P.M. 1994. Rates of Reaction of Galena, Sphalerite, Chalcopyrite, and Arsenopyrite with Fe(III) in Acidic Solutions. In: *Environmental Geochemistry of sulphide oxidation*, Alpers, C.N. and Blowes, D.W., (eds.). American Chemical Society Symposium Ser, 550, 2-13.
- Rimstidt, D.J. and Vaughan, D.J. 2003. Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 873–880.
- Rivera-Uria, M. Y., 2019. Effects of the interaction between an acid solution and pedogenic carbonates: the case of the Buenavista del Cobre Mine, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. México, Universidad Nacional Autónoma de México. v. 36, núm. 3, 2019, p. 308-320.

- Rodríguez-Castañeda, J.L. Anderson, T.H. 2011. El arco magmático jurásico en Sonora, México - distribución, edades y ambiente tectónico. T. Calmus (Ed.), Panorama de la Geología de Sonora, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, 118, pp. 81-111.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., González-Hernández, G., 2007. Solidphase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead–zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. *Applied Geochemistry* 22, 109–127.
- Romero, E.M. 2018. Minerales arcillosos de los suelos y paleosuelos del Arroyo Tinajas, Cananea, Sonora: caracterización, procedencia y respuesta ante un vertido minero.
- Romero, F. M. (2019). Informe Técnico sobre la presa de jales de Buenavista del Cobre, Cananea, Sonora.
- Solidphase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead–zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. *Applied Geochemistry* 22, 109–127.
- Rowley M, Warkentin DD, Sicotte V. Site demonstration of the biosulfide process at the former Britannia mine. Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, May 30–June 6, 1997, Vancouver, BC, vol. IV, p. 1531– 48.
- Schwab, P., Zhu, D., Banks, M.K., 2007. Heavy metal leaching from mine tailings as affected by organic amendments. *Bioresource Technology* 98 (5), 2935–2941.
- Seal II, R.R., Hammarstrom, J.M., 2003. Geoenvironmental models of mineral deposits: examples from massive sulfide and gold deposits. In: Jambor, J.L., Blowes, D.W., Ritchie, A.I.M. (Eds.), *Environmental Aspects of Mine Wastes*, vol. 31. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 1–50 (Chapter 2).
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2012). Inventario físico de los recursos minerales de la Carta cananea H12-B53 Municipios: Arizpe, Bacoachi, Cananea y Fronteras, Estado de sonora. web: https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T2611FOGE0001_01.pdf.
- Siebe, C., Jahn, R., Stahr, K. 2016. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Tercera edición.
- Simon, L., 2005. Stabilization of metals in acidic mine spoil with amendments and red fescue (*Festuca rubra* L.) growth. *Environmental. Geochemistry & Health* 27, 289–300.

- Singer, P. C. and Stumm, W. 1970. Acidic mine drainage. Rate-determining step. *Science*, 167, 1121-1123.
- Singer, D. A., Berger, V. I. & Moring, B. C. 2005. Porphyry copper deposits of the world: data-base, map, and grade and tonnage models. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2005-1060.
- Skousen, J., Sexstone, A., Garbutt, K. y Sencindiver, J. 1994. Acid mine drainage treatment with wetlands and anoxic limestone drains. En: Kent, D.M. (ed). *Applied wetlands science and technology*. Lewis Publishers, Boca Raton, 263-281.
- Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R., Hellier, W. 1998. *Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage*. Published by The National Mine Land Reclamation Center, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 123 pp.
- Soon, Y.K., Arshad, M.A., 2005. Tillage and liming effects on crop and labile soil nitrogen in an acid soil. *Soil and Tillage Research* 80, 23–33.
- Sparks, D. 2003. *Environmental Soil Chemistry* (2a. ed.). USA: Elsevier Science. p. 290.
- Srikanth, R., Khanam, A., Rao V. (1994) : Cadmium levels in the urine of male sludge farmers in India. *J. toxicol. Environ Health*. 43: 1-6.
- Stewart, J. H., Roldán-Quintana, J., 1994, Map showing late Cenozoic extensional tilt patterns and associated structures in Sonora and adjacent areas, Mexico: 1:1,000,000: U.S. Geological Survey, *Miscellaneous Field Studies Map*, Map MF-2238, with text included.
- Theodoratus, P., Moirou, A., Xenidis, A., Paspialanis, I., 2000. The use of sewage sludge for the stabilization of soil contaminated by mining activities. *Journal of Hazardous Materials B77*, 177–191.
- Tordoff, G., Baker, A., Willis, A., 2000. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere* 41, 219–228.
- Tsukamoto, T. 2006. High Efficiency Modular Treatment of Acid Mine Drainage Field Applications at Western U.S. Sites with the Rotating Cylinder Treatment System (RCTS).
- U.S. EPA 2000. *Coal remining best management practices guidance manual*. Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division. Washington DC. EPA 821-R-00-007.

- Valencia-Moreno, M., Iriondo, A., Gonzalez-Leon, C. 2006. Temporal constraints on the eastward migration of the Late Cretaceous–early Tertiary magmatic arc of NW Mexico based on new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ hornblende geochronology of granitic rocks *J. S. Am. Earth Sci.*, 22, pp. 22-38.
- Valentine, W.G. 1936. Geology of the Cananea Mountains, Sonora, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 47, pp. 53-86
- Vangronsveld, J., Cunningham, S., 1998. Introduction to the concepts. In: Vangronsveld, J., Cunningham, S. (Eds.), *In Situ Inactivation and Phytoremediation of Metal Contaminated Soils*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg and R.G. Landes Company, Georgetown, TX, USA, pp. 1–15.
- Velasco, J.R. 1966. Geology of the Cananea District S.R. Titley, C.L. Hicks (Eds.), *Geology of the Porphyry Copper Deposits, Southwestern North America*, University of Arizona Press, Tucson Arizona (1966), pp. 245-249.
- Walton-Day, K. 1999. Geochemistry of the processes that attenuate acid mine drainage in wetlands. En: G.S. Plumlee and M.J. Logsdon (eds.), *The environmental geochemistry of mineral deposits*. *Reviews in Economic Geology*, SEG, Littleton, CO. USA. (6A), 215-228.
- Watzlaf, G. y Hyman, D. 1995. Limitations of passive systems for the treatment of mine drainage. 17th Annual National Association of Abandoned Mine Lands Conference, Indiana, October, 186-199.
- Wieder, R.K. 1993. Ion input/output budgets for five wetlands constructed for acid coal mine drainage treatment. *Water Air Soil Pollution*, 71 (3-4), 231-270.
- Williamson, M. and Rimstidt, J. 1994. The kinetics and electrochemical rate-determining step of aqueous pyrite oxidation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 5443-5454.
- Wodzicki, W.A., 1995. The Evolution of Laramide Igneous Rocks and Porphyry Copper Mineralization in the Cananea district, Sonora, Mexico. Unpublished Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson Arizona, (181 pp.).
- Wodzicki, W.A. 2001. The evolution of magmatism and mineralization in the Cananea District, Sonora, Mexico T. Albinson, C.E. Nelson (Eds.), *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America*, *Econ. Geol. Spec. Pub.*, 8 (2001), pp. 241-261.
- Wong, M., 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50, 775–780.

- Yadav, R.K., Chaturvedi, R.K., Dubey, S.K., Joshi, P.K. and Minhas, P.S. (2003). Potentials and hazards associated with sewage irrigation in Haryana. *Indian Journal of Agricultural Science*. 73(5): 249-255.
- Young, I.M., Crawford, J.W., 2004. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex. *Science* 304, 1634–1637.
- Younger PL, Jayaweera A, Elliot A, Wood R, Amos P, Daugherty AJ, et al. Passive treatment of acidic mine waters in subsurfaceflow systems: exploring RAPS and permeable reactive barriers. *Land Contam Reclam* 2003;11:127– 35.
- Zanuzzi, A., Arocena, J. M., van Mourik, J. M., Faz-Cano, A. (2009). Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology. *Geoderma*, 154(1-2), 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.09.014>