



**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y
MINERALÓGICA DE RESIDUOS MINEROS DE
FARALLÓN NEGRO**

TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA EN GEOLOGÍA

MACARENA EDITH MAMANÍ

DIRECTORA: DRA. NANCY EUGENIA
NIEVA

AÑO 2025



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

Caracterización geoquímica y mineralógica de residuos mineros de Farallón Negro

Trabajo Final de Licenciatura en Geología

Alumna:

Macarena Edith Mamaní

Directora:

Dra. Nancy Eugenia Nieva

San Fernando del Valle de Catamarca – octubre 2025

Agradecimientos:

A Dios y a la Virgen Morena, por ser mi guía constante, por iluminar cada paso, por colocar en mi camino personas que fueron sostén, compañía y bendición. Este momento es fruto de la fe que nunca me abandonó.

A toda mi familia, en especial a mi mamá, que supo acortar la distancia con palabras, con sus consejos, con su infinito amor; a mi hermano menor, por sus deseos siempre nobles y sinceros. A mi abuelo y abuela, por su fortaleza y ternura, y a mis tíos y tíos, por cada gesto de aliento, por estar presentes aún en la distancia.

A la querida familia de Fundación Sí, a Manuel Lozano y a cada voluntario que sostiene el hermoso proyecto de residencias universitarias gratuitas. Me brindaron la posibilidad de estudiar, de crecer, de creer. Me enseñaron una vez más que ayudar transforma, que la empatía construye, y que los sueños del interior también merecen llegar lejos. Gracias por darme ese primer "Sí". Este logro también les pertenece.

A mi directora de tesis, Dra. Nancy Eugenia Nieva, por haberme iniciado con paciencia y entusiasmo en el camino de la investigación, y por acompañarme con generosidad y compromiso en cada etapa de este trabajo. Gracias por cada explicación, por su comprensión constante, y por ser inspiración en lo personal y lo profesional.

Al tribunal examinador Lic. Miriam Cisternas, Lic. Marcela Noemi Varela y Lic. Matías Rasjido, quienes con su experiencia, aportes y correcciones contribuyeron significativamente al desarrollo y enriquecimiento de esta investigación.

A mis profesores, quienes fueron pilares fundamentales en mi desempeño académico. Cada momento compartido en el aula, cada viaje de campo, cada consejo brindado y cada instancia de aprendizaje quedarán grabados como valiosos recuerdos.

A la empresa Yacimientos Mineros Aguas de Dionisio (YMAD) por el aval otorgado para la realización de este trabajo en el Complejo Minero Industrial Farallón Negro. Asimismo, se agradece el apoyo brindado en materia de transporte y asistencia durante las distintas campañas de muestreo, lo cual resultó fundamental para la ejecución de las tareas de campo.

Se hace un reconocimiento especial a Aldo Leiva y Franco Zurita, por su valiosa colaboración en la logística, su permanente acompañamiento y su compromiso con el desarrollo de las actividades, contribuyendo de manera significativa al logro de los objetivos planteados.

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional de Catamarca – Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas por el apoyo brindado a lo largo de mi carrera. Los recursos, espacios y oportunidades puestos a disposición fueron fundamentales tanto en mi formación como alumna como para la realización de mi trabajo final.

A mis amigos, amigas, compañeros y compañeras de la carrera y de la vida, gracias por sus buenos deseos, por su compañía en momentos clave, por todo lo vivido y compartido.

A mis compañeros de trabajo, quienes brindaron su apoyo y flexibilidad necesaria para llegar a este día.

A mi querida Antofagasta de la Sierra, a esos hermosos paisajes que me inspiraron y vieron nacer mi sueño de ser Licenciada en Geología.

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALOGICA DE RESIDUOS MINEROS DE FARALLÓN
NEGRO

A quienes llegan con un bolso, un sueño y muchas ganas, los invito a seguir persiguiendo sus objetivos. A quienes vienen desde lejos, con el corazón lleno de preguntas y la mochila liviana de recursos, les pido que no se rindan. Anímense a la incertidumbre, al miedo, a los desafíos, deseo que siempre encuentren el impulso para seguir.

“Hoy cierro una etapa donde la educación fue la llave, la pasión fue mi impulso, y este logro es el reflejo de todo lo que creí posible”.

Resumen

El yacimiento minero Farallón Negro, ubicado en el departamento Belén (Catamarca, Argentina), posee una extensa trayectoria de más de cinco décadas como una de las principales explotaciones auríferas y argentíferas vetíformes del país, con importancia estratégica a nivel regional y nacional por su aporte sostenido a la minería. A lo largo de su prolongada actividad, se han acumulado materiales en botaderos y diques de colas que, al exponerse a la intemperie, pueden liberar elementos al medio. La mineralogía original, los procesos de beneficio y las condiciones climáticas locales determinan el comportamiento geoquímico de estos pasivos ambientales. Este estudio se plantea ante la necesidad de evaluar la estabilidad de dichos residuos frente a procesos de acidificación y liberación de metales, así como su posible impacto sobre las aguas superficiales. En este marco, la caracterización geoquímica y mineralógica de los depósitos resulta esencial para comprender su evolución y su interacción con el entorno.

Para ello, se realizaron muestreos de cuatro botaderos y dos diques de cola. En laboratorio se determinaron textura, densidad real, porcentaje de carbonatos y mineralogía mediante difracción de rayos X. Asimismo, se analizaron los contenidos de metales por técnicas de espectrofotometría de absorción atómica (AAS) y espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Para evaluar el potencial generador de acidez de los residuos se usaron las pruebas estáticas de análisis ácido-base ABA (Acid-Base Accounting) y NAG (Net Acid Generation). También se analizaron registros hidroquímicos de agua superficial correspondientes a los años 2003 y 2017, solicitados al Departamento de Geoquímica Ambiental (DiPGAM), seleccionados por su calidad analítica y representatividad estacional.

Los resultados indican que las texturas oscilaron entre franco arenosa y franco arcillosa, lo cual influye en la permeabilidad y retención de contaminantes. Las densidades reales variaron entre 1,86 y 3,14 g/cm³, destacándose contenidos de minerales pesados y fases metálicas como pirita, calcopirita y magnetita.

Desde el punto de vista geoquímico, los residuos presentaron una alta proporción de carbonatos (principalmente calcita), lo que confiere una importante capacidad de neutralización de acidez. Las pruebas estáticas ABA y NAG confirmaron que todos los residuos analizados son no acidogénicos, con una capacidad de neutralización de la acidez (ANC) > 50 Kg CaCO₃/t y valores de pH alcalinos.

La composición química reveló concentraciones variables de Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, As y Cd, siendo el dique intermedio superior y el botadero 2 los sectores con mayores concentraciones de metales pesados. La redistribución vertical de elementos como As y Pb fue atribuida a fluctuaciones del nivel freático y afinidades geoquímicas.

El análisis de aguas superficiales mostró pH levemente alcalino y conductividades eléctricas elevadas, en especial en puntos cercanos a fuentes termales y residuos mineros. El arsénico fue el contaminante más persistente, con valores entre 13 y 76 µg/L. Se observó un claro efecto estacional en la movilidad de metales, con mayor dilución en épocas húmedas y concentración en períodos secos.

Los residuos mineros del yacimiento Farallón Negro presentan una elevada heterogeneidad física y geoquímica, condicionada por procesos de disposición, meteorización y mineralogía

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALOGICA DE RESIDUOS MINEROS DE FARALLÓN NEGRO

original. La presencia dominante de minerales neutralizantes (carbonatos y arcillas) ha evitado la generación de drenaje ácido activo. No obstante, algunos sectores concentran metales pesados y metaloides en niveles elevados, que podrían movilizarse bajo cambios ambientales. La calidad de las aguas superficiales muestra signos de alteración, principalmente por la presencia de arsénico, cuya fuente principal se asocia a vertientes termales naturales. Se recomienda continuar con el monitoreo hidrogeoquímico y aplicar estrategias de manejo ambiental para mitigar la dispersión de contaminantes.

Índice

Capítulo 1.....	8
1. Introducción	9
1.1. Objetivo General.....	10
1.1.2. Objetivos Específicos	11
1.2. Descripción del Área de Estudio	11
1.2.1. Ubicación y Vías de acceso	11
1.3. Estructura del Trabajo.....	13
Capítulo 2.....	14
2- Marco Teórico.....	15
2.1. Historia del Yacimiento.....	15
2.2. Características del Yacimiento	17
2.3. Minería metalífera y generación de residuos	22
2.4. Explotación del Yacimiento	25
2.5. Laboreo	25
Capítulo 3.....	29
3. Marco Geológico.....	30
3.1. Geología Regional.....	30
3.2. Morfoestructura Farallón Negro – Capillitas	31
3.3. Geología Local.....	32
3.3.1. Unidades Paleozoicas	32
3.3.2. Unidades Cenozoicas.....	33
3.4. Marco Geográfico	36
Capítulo 4.....	38
4. Metodología	39
4.1. Recopilación y Análisis de Información Previa	39
4.2. Elaboración del Marco Geológico	39
4.3. Elaboración Cartográfica	39
4.4. Muestreo	40
4.5. Tratamiento de las Muestras	42
4.6. Granulometría – Determinación de la Textura	42
4.7. Determinación de la Densidad.....	45
4.8. Caracterización Mineralógica por Difracción de Rayos X (DRX).....	45
4.9. Análisis de la Composición Química.....	46
4.10. Pruebas del Potencial Generador de Acidez:	46
4.11. Determinación de Carbonatos	48

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE RESIDUOS MINEROS DE FARALLÓN NEGRO

4.12. Recopilación y Análisis de Información Hidroquímica.....	50
4.13. Preparación del Informe Técnico-Científico	55
Capítulo 5.....	56
5. Resultados.....	57
5.1. Clasificación Textural	57
5.2. Densidad Real.....	58
5.3. Carbonatos.....	59
5.4. Caracterización Mineralógica	60
5.5. Composición Química:	64
5.6. Potencial Generador de Acidez:	66
5.7. Caracterización química del agua de la cuenca del Yacimiento Farallón Negro	68
5.8. Clasificación Hidroquímica	72
Capítulo 6.....	75
6. Discusión	76
6.1 Caracterización física y geoquímica de residuos mineros: granulometría y densidad real.....	76
6.2 Influencia de los carbonatos en el comportamiento geoquímico y la neutralización de acidez	79
6.3. Caracterización mineralógica y geoquímica de los residuos mineros	80
6.4. Hidroquímica de las aguas superficiales en la cuenca del yacimiento Farallón Negro	82
Capítulo 7.....	84
7. Conclusiones y recomendaciones.....	85
7.1 Conclusiones.....	85
7. 2. Recomendaciones	86
8. Bibliografía:	87
ANEXOS	96



Capítulo 1

Introducción

1. Introducción

La provincia de Catamarca constituye un actor clave en la actividad minera de la República Argentina, no solo por el volumen de su producción, sino también por la relevancia de los materiales que aporta y el desarrollo económico que genera. Históricamente, la provincia ha explotado yacimientos de sulfuros en vetas, con una producción anual de aproximadamente 9.300 kg de plata (Ag) y 700 kg de oro (Au) (Benítez, 2012).

En este trabajo se propone el estudio de los residuos de botaderos y diques de cola asociados a la explotación del distrito mineralizado Farallón Negro, ubicado dentro de la concesión minera de Yacimientos Mineros Aguas de Dionisio (YMAD). Este abarca una superficie de 344 km² y se encuentra situado en la localidad de Hualfín, departamento Belén, provincia de Catamarca, a una altitud media de 2.600 m. s. n. m. Los centros poblacionales más cercanos se sitúan al oeste del área de estudio, siendo Los Nacimientos (a 24 km) y Hualfín (a 40 km).

Según Llambías (1972), las unidades geológicas presentes en el área vetiforme corresponden íntegramente al Complejo Volcánico Farallón Negro, de edad terciaria. Este complejo está constituido por una amplia variedad de rocas volcánicas cuya composición varía desde basaltos y basandesitas hasta riolitas, formando depósitos piroclásticos (tobas y brechas), así como cuerpos intrusivos subvolcánicos tales como diques, filones capa (sills), domos endógenos y stocks. Dentro de este conjunto, las rocas más abundantes corresponden a andesitas y basandesitas.

La actividad magmática relacionada con la mineralización se inició hace aproximadamente 10 millones de años y finalizó hacia los 5 millones de años, en el Mioceno Superior. Durante este intervalo, se desarrollaron estratovolcanes en cuya base se emplazaron apófisis de cuerpos intrusivos de mediana profundidad (pórfiros), estrechamente vinculados con la mineralización metálica de cobre (Cu), molibdeno (Mo) y oro (Au). Estos cuerpos presentan alteración hidrotermal y mineralización de tipo pórfido cuprífero, asociada en sectores periféricos a mineralización epitermal vetiforme de baja sulfuración con enriquecimiento aurífero y argentífero (Llambías, 1972).

En este trabajo se pone especial énfasis en la mineralización de tipo vetiforme, dado que constituye la más representativa dentro del área de estudio. Está conformado por filones de cuarzo y carbonatos que contienen principalmente minerales de oro (Au), plata (Ag) y manganeso (Mn). Ejemplos destacados son las vetas de Farallón Negro, Los Viscos, Alto de la Blenda, Macho Muerto y Agua Tapada, entre otras.

Malvicini y Llambías (1963), en su estudio sobre la mineralización vetiforme, distinguieron tres estadios principales en su evolución paragénetica:

1. **Deposición inicial de sulfuros**, compuestos por pirita (FeS₂), blenda (ZnS), calcopirita (CuFeS₂) y galena (PbS), acompañados de carbonatos manganesíferos en menor proporción.
2. **Crecimiento rítmico de cuarzo, carbonatos manganesíferos y calcita**, junto con sulfuros de nueva generación que portan oro nativo y minerales de plata como argentita (Ag₂S), polibasita (Cu (Ag, Cu)₆Ag₉Sb₂S₁₁) y tennantita (Cu₁₂As₄S₁₃).
3. **Etapa de oxidación del depósito**, responsable de la formación de óxidos de Mn.

De acuerdo con Ovejero (2007), entre los minerales secundarios presentes se identifican óxidos e hidróxidos de hierro (hematita y goethita), óxidos e hidróxidos de manganeso (psilomelano, pirolusita, manganita, calcofanita) y oro redepositado asociado a carbonatos de tonalidades marrón a negro. Además, los análisis por microsonda confirmaron la presencia de coronadita ($Pb(Mn^{4+}, Mn^{2+})_8O_{16}$), hetaerolita ($ZnMn^{3+}_2O_4$) y asociaciones mineralógicas como: pirita (FeS_2) - argentita (Ag_2S), manganita ($MnO(OH)$) – pirocroíta ($Mn(OH)_2$) y pirolusita (MnO_2) – manganita ($MnO(OH)$).

Martínez et al., 2014 describieron la metalogénesis de la veta Farallón Negro rama norte y definieron la correlación existente entre los distintos elementos, estableciendo que las vetas ricas en Au son generalmente pobres en Ag y metales base y que el Au muestra una correlación positiva con el antimonio (Sb) y una negativa con el Mn. Los altos contenidos en elementos trazas (As, Cu, Mo, Pb, V y Zn) de los óxidos de manganeso indican un origen hidrotermal. Corpacci (2020) determinó en la veta Macho Muerto la correlación de la mineralización aurífera con Ag, Sr, Ba, Pb y Zn, y la referida a Ag con Au y Pb.

El drenaje ácido de mina (DAM) es el problema ambiental que genera en el mundo la mayor preocupación con respecto a la industria minera, puesto que, sus procesos como la molienda de materia prima, el refinado de minerales y la eliminación de desechos sólidos pueden contaminar el medio ambiente (Adriano et al., 2004). Estos desechos son una fuente importante de metales y metaloides que logran dispersarse fácilmente y suponen una preocupación, debido a su efecto tóxico en los sistemas acuáticos, el alto factor de enriquecimiento y la baja tasa de remoción (Alloway y Ayres, 1997). La química y el peligro potencial de estos residuos dependen de su composición mineralógica, los métodos de procesamiento y, por lo tanto, de la distribución del tamaño de las partículas, el clima y el tiempo de exposición que permanecen a la intemperie (Lottermoser, 2010). El residuo generado que no es extraído con fines comerciales se acumula en dos tipos de depósitos: botaderos y diques de colas. Los sitios donde se disponen estos desechos mineros se caracterizan por presentar una estructura pobre del suelo, altas concentraciones de sales solubles y de elementos fitotóxicos y bajo pH (Hammarstrom et al., 2005), lo que resulta en una falta de cobertura vegetal y sustancialmente mayor vulnerabilidad a la dispersión de partículas debido a la erosión del viento y el agua.

Sin embargo, hasta el momento, no se han realizado estudios de caracterización geoquímica y mineralógica en los botaderos y diques de colas del yacimiento Farallón Negro, la generación de ácido, así como las fuentes de metales pesados presentes en estos materiales, no se determinan aún en el sitio. En función de ello, este trabajo desarrolla una caracterización geoquímica y mineralógica detallada, complementada con pruebas estáticas ABA (Acid-Base Accounting) y NAG (Net Acid Generation), con el fin de establecer el potencial generador de acidez y, en su defecto, la capacidad de neutralización del sistema.

1.1. Objetivo General

Caracterizar geoquímica y mineralógicamente los residuos mineros de botaderos y diques de colas del yacimiento Farallón Negro (Dpto. Belén – Catamarca) para conocer e interpretar los mecanismos de meteorización y determinar la facilidad de liberar elementos al ambiente.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar las distintas fases minerales presentes en los residuos mineros.
- Analizar la composición química de estos desechos para conocer su concentración elemental.
- Evaluar el potencial de generación de acidez y su capacidad de neutralización.
- Determinar parámetros fisicoquímicos incluyendo pH, contenido de carbonatos, textura y peso específico real.
- Interpretar los mecanismos de meteorización que afectan a los residuos mineros.
- Comparar los resultados geoquímicos de los residuos con los datos de calidad de agua para evaluar su interacción.

1.2. Descripción del Área de Estudio

1.2.1. Ubicación y Vías de acceso

El Distrito mineralizado Farallón Negro se localiza en la concesión minera de Yacimientos Mineros Aguas de Dionisio (YMAD), posee una superficie de 344 Km², ubicado en el Distrito Hualfín, Dpto. Belén, Provincia de Catamarca, República Argentina, a una altura promedio de 2.600 m. s. n. m. Geográficamente está comprendida entre los paralelos 27°15' y 27°25' de latitud S (15 Km de distancia de Norte a Sur) y los meridianos 66°31' y 66°45' de longitud O (23 Km de Este a Oeste), (Figura 1).

En coordenadas planas, según el sistema POSGAR 94/UTM Zona 3 (EPSG:22183), el área se extiende entre los valores aproximados de 3.410.000 a 3.440.000 metros Este y 6.972.000 a 6.984.000 metros Norte.

Para acceder al área de estudio, desde San Fernando del Valle de Catamarca (capital de la provincia), se recorre aproximadamente 400 km en un tiempo estimado de 6 horas en vehículo. El trayecto comienza tomando la Ruta Nacional 38 (RN 38) hacia el sur, partiendo desde la ciudad capital. Al llegar a la localidad de Chumbicha, se empalma con la Ruta Nacional 60 (RN 60), que atraviesa la Quebrada de la Cébila y continúa hacia el oeste, ingresando brevemente en la provincia de La Rioja.

El recorrido continúa atravesando localidades como Mazán, Aimogasta y Alpasinche, donde se enlaza con la Ruta Nacional 40 (RN 40). Desde allí, se continúa hacia el norte por la misma, pasando por Cerro Negro y Londres, hasta llegar a la ciudad de Belén. Luego de cruzar la Quebrada de Belén, el trayecto sigue por las localidades de San Fernando, El Eje, Hualfín y Los Nacimientos. Desde esta última localidad, se accede a la Ruta Provincial 35 (RP 35), que finalmente conecta con el camino privado de ingreso al Complejo Minero Industrial Farallón Negro.

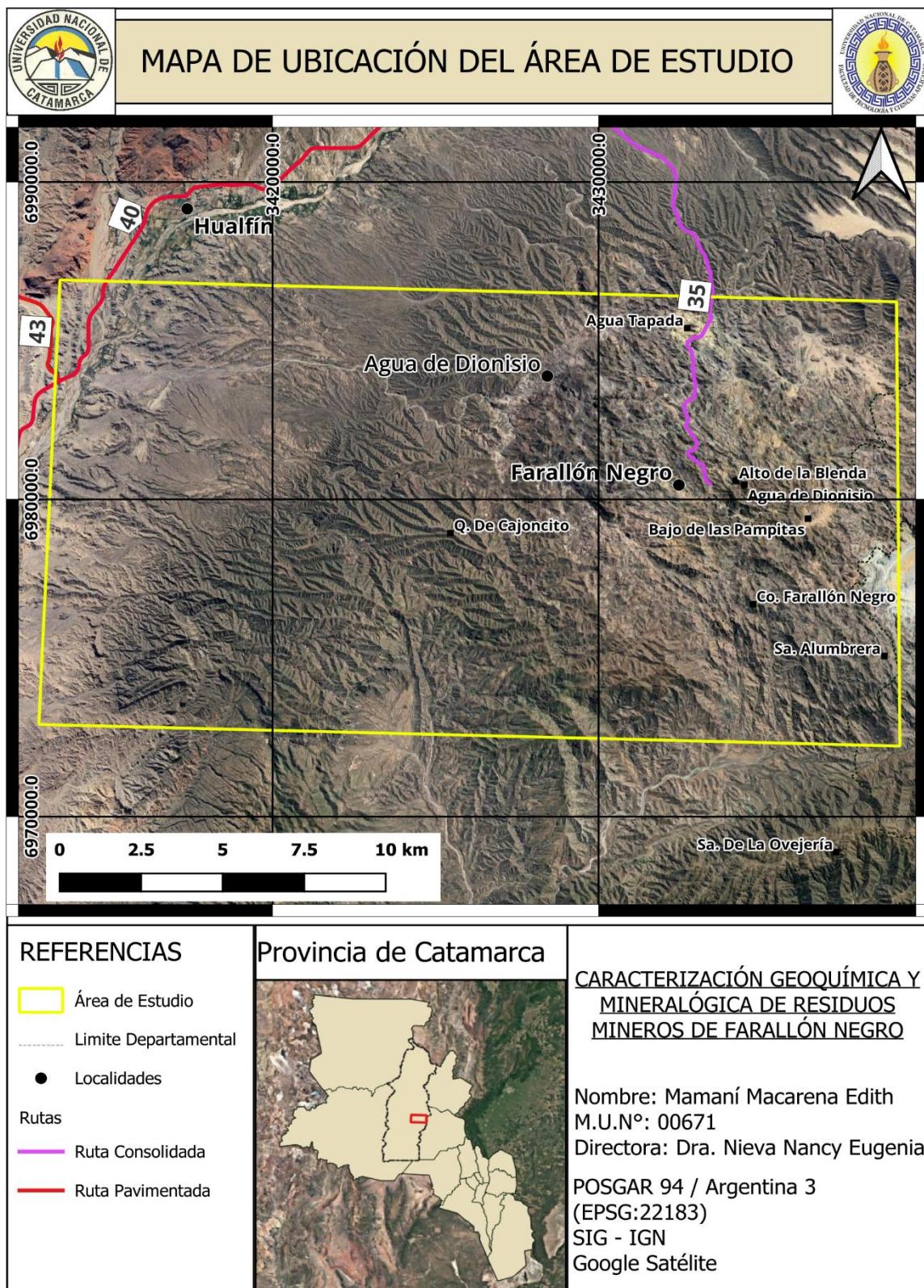


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio.

1.3. Estructura del Trabajo

El trabajo se organiza en siete capítulos que permiten abordar de manera integral la investigación realizada.

- **Capítulo 1 - Introducción:** Presenta los objetivos generales y específicos del estudio, descripción del área, su ubicación geográfica, vías de acceso y estructura del trabajo.
- **Capítulo 2 – Marco teórico:** Reúne los fundamentos conceptuales necesarios para contextualizar la investigación, incluyendo referencias relevantes en geología y geoquímica ambiental.
- **Capítulo 3 – Marco geológico:** Describe la geología regional de las Sierras Pampeanas, morfoestructuras Farallón Negro – Capillitas y geología local del área de estudio.
- **Capítulo 4 - Metodología:** Detalla las técnicas empleadas para la recopilación y análisis de información, incluyendo muestreo, caracterización mineralógica, análisis granulométrico, determinación de textura y densidad, composición química, pruebas de generación de acidez, análisis de carbonatos e interpretación hidroquímica.
- **Capítulo 5 - Resultados:** Expone los principales resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología.
- **Capítulo 6 - Discusión:** Análisis e interpretación de los resultados en relación con el marco teórico y geológico, evaluando su relevancia ambiental y científica.
- **Capítulo 7 – Conclusiones y recomendaciones:** Resume los aportes del estudio, propone recomendaciones derivadas del análisis realizado, e incluye la bibliografía consultada y los anexos técnicos.



Capítulo 2

Marco Teórico

2- Marco Teórico

2.1. Historia del Yacimiento

La palabra “farallón”, según el *Diccionario de la lengua española*, se refiere a una “roca alta que emerge o sobresale”. En la mayoría de los casos, Abel Peirano, autor de la denominación, utilizó la forma “Farellón”. Sin embargo, con el tiempo prevaleció la variante “Farallón”, a la que se le añadió el calificativo “Negro” debido al color oscuro de sus minerales (Aceñolaza, 2013).

En 1.958, se dio lugar a la creación de la empresa Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD), cuya propiedad estaba repartida entre la Universidad Nacional de Tucumán, la Provincia de Catamarca y el Estado Nacional (Aceñolaza, 2013).

Durante su etapa de mayor desarrollo, los pueblos originarios dominaron técnicas de fundición de metales, en especial del cobre (Cu). No obstante, carecían de herramientas adecuadas para perforar la roca y acceder a los depósitos descubiertos, por lo que se estima que la extracción minera era superficial, aunque suficiente para obtener los metales necesarios para fabricar armas, pectorales y joyas. Es probable que estos conocimientos hayan sido influenciados por culturas de origen peruano, donde el manejo de metales como el oro (Au) y la plata (Ag) estaba más avanzado y extendido.

Estudios realizados en la región de Santa María, en la provincia de Catamarca, han identificado varios sitios donde se desarrollaban actividades metalúrgicas. González (2002) describe una antigua población indígena en el paraje conocido como Rincón Chico, donde se hallaron sectores dedicados a la fundición de minerales de Cu. Además, se identificaron escorias con restos de Au y Ag, lo que sugiere que el mineral procesado podría haber provenido de la zona de Capillitas-Atajo.

Peirano menciona que, al momento de realizar sus exploraciones en la zona del Farallón, aún era posible encontrar labores mineras antiguas en estado de abandono, especialmente en el sector conocido como La Josefa, cuyo origen podría remontarse tanto a la época incaica como a la de los jesuitas (Aceñolaza, 2013).

En 1.938 se creó el Instituto de Investigaciones Regionales de la Universidad Nacional de Tucumán, y Peirano fue designado como director del Instituto de Mineralogía y Geología. Fue entonces cuando intensificó sus investigaciones en el distrito minero de Aguas de Dionisio, realizando su primera publicación sobre sus características geológicas en los recordados *Cuadernos de Mineralogía y Geología*, editados por la Universidad.

Entre 1.940 y 1.942, visitó en repetidas ocasiones el área de Aguas de Dionisio, donde recolectó datos y muestras que analizó posteriormente. En ese periodo inició también la elaboración de mapas y el trabajo que publicaría entre 1944 y 1945 (Figura 2). Al mismo tiempo, comenzó a registrar pedimentos mineros a nombre de parientes y amigos, anticipando el potencial mineralógico de la región.

Este impulso se dio en el marco de un auge minero en el noroeste argentino, especialmente en la provincia de Jujuy, tras el descubrimiento de hierro (Fe) en Zapla, lo que favoreció el

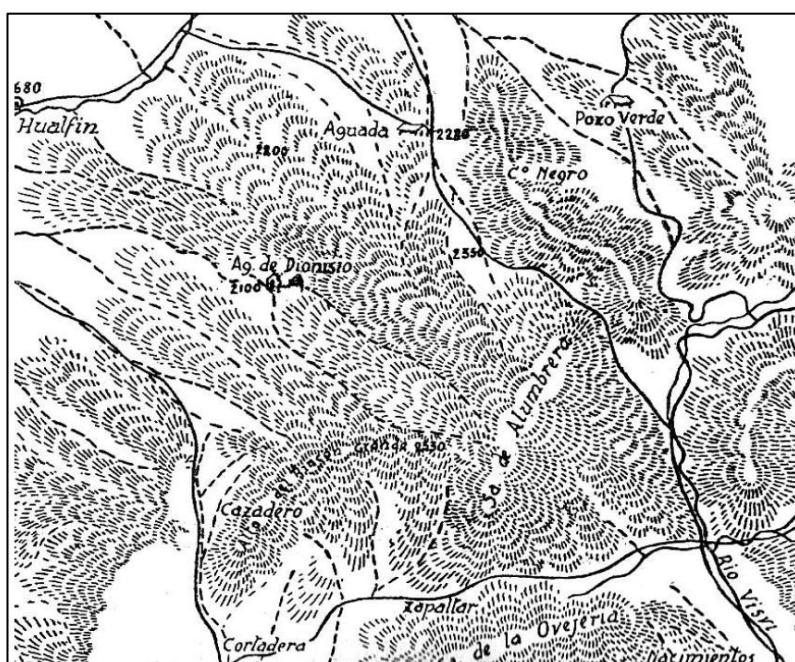
desarrollo de Fabricaciones Militares y la instalación de los Altos Hornos en la ciudad de Palpalá.

Para la organización del Instituto de Geología y Minería, Peirano contó con el decidido apoyo del Rector Horacio Descole, quien le proporcionó los recursos necesarios para avanzar con sus investigaciones en el campo minero. Gracias a ese respaldo, logró convocar a destacados geólogos extranjeros, y a un grupo notable de jóvenes profesionales argentinos. Todos ellos se sumaron al ambicioso proyecto de Peirano y se dedicaron al estudio de diversos aspectos de la geología regional y la minería del noroeste argentino.

Mientras algunos investigadores del Instituto se concentraron en el estudio del Fe de las Sierras Subandinas, otros se enfocaron en distintos yacimientos del norte argentino. Por su parte, Peirano (incansable en su labor), una vez consolidado el funcionamiento del Instituto, decidió volver a trabajar con mayor profundidad en el distrito de Aguas de Dionisio, donde años antes había identificado el notable valor metálico de la veta del Farallón Negro, lo que justificaba un estudio más detallado.

Fue a partir de junio de 1.948, tras una nueva visita a la zona, que regresó a Tucumán para entusiasmar nuevamente a Descole, con el fin de obtener su aprobación para continuar con la exploración del distrito.

A partir de este momento, comienza a tomar forma la historia moderna de Farallón Negro. En Buenos Aires, el día 7 de junio de 1.958 los legisladores nacionales y representantes de ambas partes, Gobierno de Catamarca y Universidad, comenzaron a trabajar en un proyecto de ley que ratificaba el acuerdo de partes y daba vida a una nueva empresa minera: **Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD)**. El proyecto fue ingresado por el Senado y aprobado por ambas cámaras, para luego ser promulgado por el Poder Ejecutivo Nacional con el número **14.771**. A partir del **año 1.959** cuando fue publicada la ley en el Boletín Oficial comienza otra historia, la historia de la empresa que hoy, luego de más de medio siglo de acción, constituye una de las mejores referencias del éxito minero en Argentina.



2.2. Características del Yacimiento

2.2.1 Mineralización

El depósito mineralizado de YMAD está relacionado con la evolución de un sistema magmático asociado a volcanes andesíticos, desarrollado sobre una zona de debilidad cortical. Esta debilidad estaría vinculada a la presencia de cuerpos batolíticos de composición intermedia y al cruce de estructuras profundas de rumbo meridiano con otras orientadas en sentido este-oeste a noroeste, formadas como consecuencia del cambio en la inclinación de la placa tectónica subductada bajo el continente (Rojas, 2000).

La actividad magmática asociada al proceso metalogenético inició hace aproximadamente 10 millones de años y cesó hace unos 5 millones de años, durante el Mioceno Superior. A lo largo de esta evolución geológica se formaron estratovolcanes, en cuya base se intruyeron apófisis de cuerpos intrusivos de mediana profundidad (pórfiros), directamente vinculados con concentraciones de cobre (Cu), molibdeno (Mo) y oro (Au). Estos cuerpos presentan alteraciones hidrotermales y mineralización típica de sistemas porfíricos de Cu, junto con una expresión epitermal distal de Au y Ag de baja sulfuración (Rojas, 2000).

De acuerdo con (Llambías, 1972), el distrito presenta dos estilos de mineralización: diseminada y de tipo vetiforme. La presente investigación hace énfasis en esta última por ser ésta la presente en el área de estudio.

El depósito vetiforme consiste en filones de cuarzo y carbonatos que contienen mayormente minerales de Au, Ag, y Mo, representadas por las vetas de Farallón Negro, Los Viscos, Alto de la Blenda, estructuras intermedias entre Farallón Negro y La Blenda, Macho Muerto, Agua Tapada, Santo Domingo, La Josefa, Morro Bola, etc.

2.2.3. Modelo Genético

En un estudio de la mineralización de las vetas, Malvicini y Llambías (1963), concluyeron que ésta puede dividirse en tres estadios principales cuyas paragénesis son:

1. Etapa de deposición de sulfuros, compuesta principalmente por pirita, esfalerita (blenda), calcopirita y galena, con presencia subordinada de carbonatos manganesíferos.
2. Etapa de deposición rítmica de cuarzo, carbonatos manganesíferos y calcita, acompañada por una nueva generación de sulfuros portadores de Au nativo y Ag, como argentita, polibasita y tennantita.
3. Etapa de oxidación del depósito, responsable de la formación de óxidos de manganeso.

Esta interpretación coincide con la presentada por la Japan International Cooperation Agency (JICA, 1987), que también señala la coexistencia del oro nativo o electrum (de 50 μg) con minerales como argentita, polibasita, tetraedrita argentífera, galena, esfalerita, calcopirita, bornita y pirita, entre otros.

Por su parte, Sister (1965), a partir de estudios microscópicos, propuso un modelo similar en el que la mineralización de la veta se desarrolla en tres generaciones minerales:

- 1) Primera generación: cuarzo I (aurífero) acompañado de sulfuros.
- 2) Segunda generación: carbonatos.
- 3) Tercera generación: óxidos de manganeso hipogénicos (pirolusita y psilomelano) y cuarzo II (también aurífero), en un ambiente oxidante.

Pantorilla y Ávila (1996), en un estudio mineralógico y metalogenético realizado en el yacimiento Alto de la Blenda, concluyen (siguiendo los lineamientos de Heald et al. (1987)) que la mineralización de las vetas del distrito corresponde a depósitos epitermales del tipo adularia-sericita, también conocidos como epitermales de baja sulfuración. Según estos autores, la mineralización se desarrolló en cuatro estadios principales: los tres primeros, de origen hipogénico, están caracterizados por eventos de relleno con reemplazos subordinados, separados por episodios de refracturación a lo largo del rumbo de las vetas; el cuarto estadio, de tipo supergénico, está relacionado con procesos secundarios ocurridos en la zona de oxidación, favorecidos por la fracturación postmineral.

- El primer estadio se caracteriza por la presencia de sulfuros y sulfosales de grano medio a grueso, alojados en una ganga predominantemente de cuarzo, con carbonatos subordinados, constituyendo una etapa auroargentífera.
- El segundo estadio presenta abundante cuarzo y escasos carbonatos, con sulfuros y sulfosales de grano fino diseminados, también con contenido auroargentífero.
- El tercer estadio muestra una ganga formada principalmente por carbonatos y menor proporción de cuarzo, con sulfuros y sulfosales finamente diseminados, en este caso con mineralización predominantemente argentífera.
- El cuarto estadio, de naturaleza supergénica, está representado por una amplia variedad de minerales secundarios, producto de la alteración de los sulfuros, sulfosales y carbonatos primarios. En esta etapa destacan la formación de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, así como la redepositación de oro secundario.

Asimismo, se señala que la distribución del oro en Alto de la Blenda difiere de la observada en Farallón Negro, donde la mineralización se desarrolla en tres estadios: dos hipogénicos y uno supergénico.

2.2.4. Características de los depósitos epitermales

El concepto de depósitos epitermales fue introducido por Lindgren (1911) dentro de su clasificación genética de los sistemas hidrotermales. En su definición, los describió como depósitos formados cerca de la superficie por aguas termales ascendentes, relacionados genéticamente con rocas ígneas, con rangos de temperatura entre 50 y 200 °C y profundidades menores a 1.000 metros. Esta caracterización se basó en la estabilidad de

minerales diagnósticos, la similitud con vetas observadas en sistemas geotermiales y reconstrucciones geológicas.

Décadas más tarde, Sillitoe (1977) vinculó estos depósitos a márgenes de subducción activos, mientras que Hedenquist (2005) precisó que la precipitación de oro ocurre entre 150 y 250 °C, a profundidades de 50 a 650 metros bajo el nivel freático. Generalmente, los depósitos epitermales muestran una estrecha relación espacial y temporal con volcanismo subáreo de composición ácida a intermedia, así como con intrusivos subvolcánicos asociados.

La clasificación actual distingue dos extremos en función del grado de sulfuración: **baja sulfuración (BS)** y **alta sulfuración (AS)** (Barton y Skinner, 1979). Originalmente basadas en el estado de oxidación del azufre en los fluidos mineralizantes, estas categorías hoy se definen por las asociaciones mineralógicas de sulfuros. En (Figura 3) se ilustra esquemáticamente los ambientes geológicos y los estilos de sulfuración asociados a estos depósitos, en relación con el cuerpo intrusivo y los procesos volcánico – hidrotermales involucrados (Sillitoe, 1995). En los sistemas BS, la interacción fluido–roca está controlada principalmente por la litología encajonante, mientras que en los AS la composición del fluido mineralizante es determinante.

Las paragénesis minerales reflejan estas diferencias: los depósitos BS se caracterizan por pirita, pirrotina, arsenopirita y esfalerita rica en Fe; los AS por enargita, luzonita y covelina, generalmente acompañadas de pirita. Los BS suelen formarse en ambientes geotermiales con aguas cloruradas de circulación profunda, en su mayoría meteóricas, con CO₂, NaCl y H₂S. Estos fluidos ascienden por fracturas, dando lugar a vetas estructuralmente controladas, aunque también pueden migrar lateralmente mineralizando niveles permeables en forma estratiforme. Se asocian a vetas de metales preciosos, stockworks o sistemas de vetillas sheeted.

El zonamiento hidrotermal característico incluye un núcleo cuarzo–sericitita mineralizado, rodeado por halos de alteración argílica a sericitica, que transicionan hacia zonas argílicas avanzadas y, finalmente, hacia una periferia con alteración propilítica. Este patrón constituye una guía clave en la exploración y caracterización de los sistemas epitermales (Figura 4; Tabla 1).

Entre los minerales de ganga típicos destacan cuarzo (incluida calcedonia), pirita, esfalerita, arsenopirita y pirrotina. La alteración hidrotermal predominante es argílica-sericitica, con cuarzo, adularia, illita y calcita (Figura 5). Los fluidos mineralizantes presentan baja salinidad (1–15 % NaCl eq.) y alto contenido de gases, especialmente CO₂ y H₂S. En superficie, pueden originar manantiales neutros en ebullición que depositan sinter silíceo.

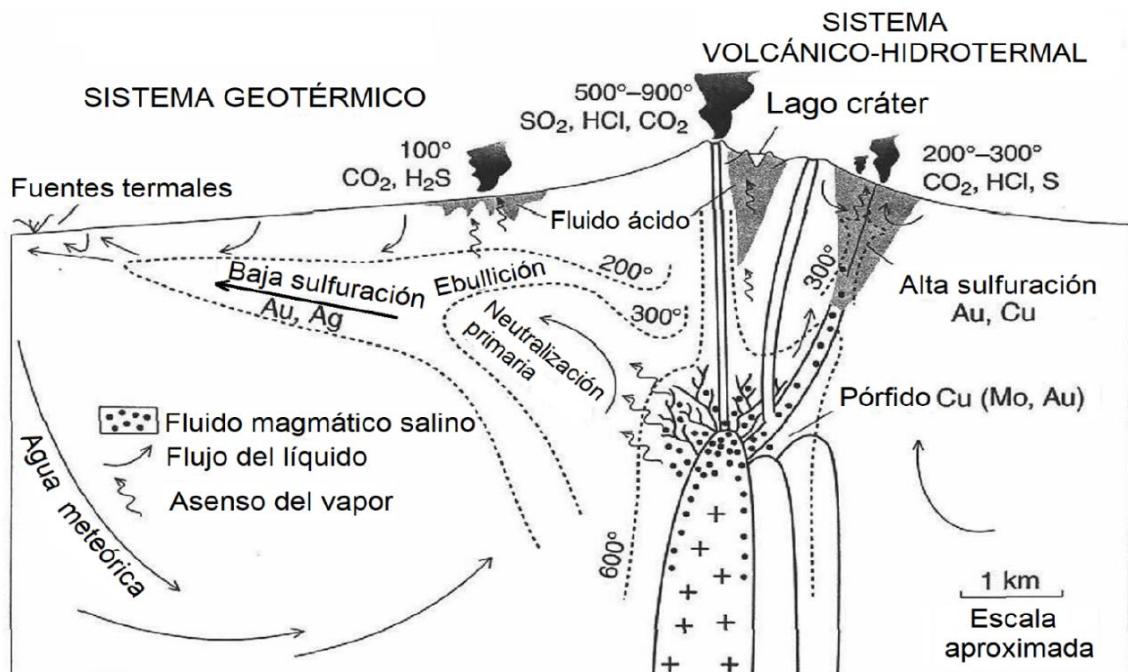


Figura 3: Dibujo para ilustrar esquemáticamente de los procesos deducidos para sistemas volcánicos-hidrotermal y geotérmico, y los respectivos ambientes de estilos de alta y baja sulfuración de depósitos epitermales con relación al cuerpo intrusivo. Sillitoe (1995).

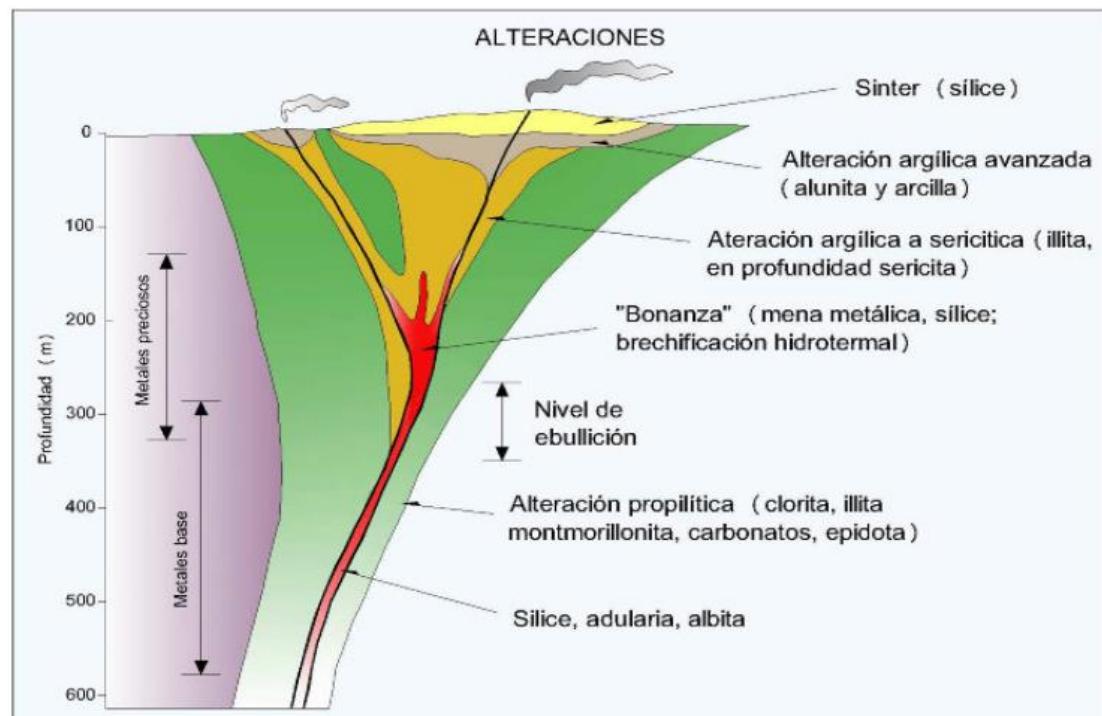


Figura 4: Zoneamiento típico de alteración para los depósitos de baja e intermedia sulfuración (modificado por Buchanan, 1981).

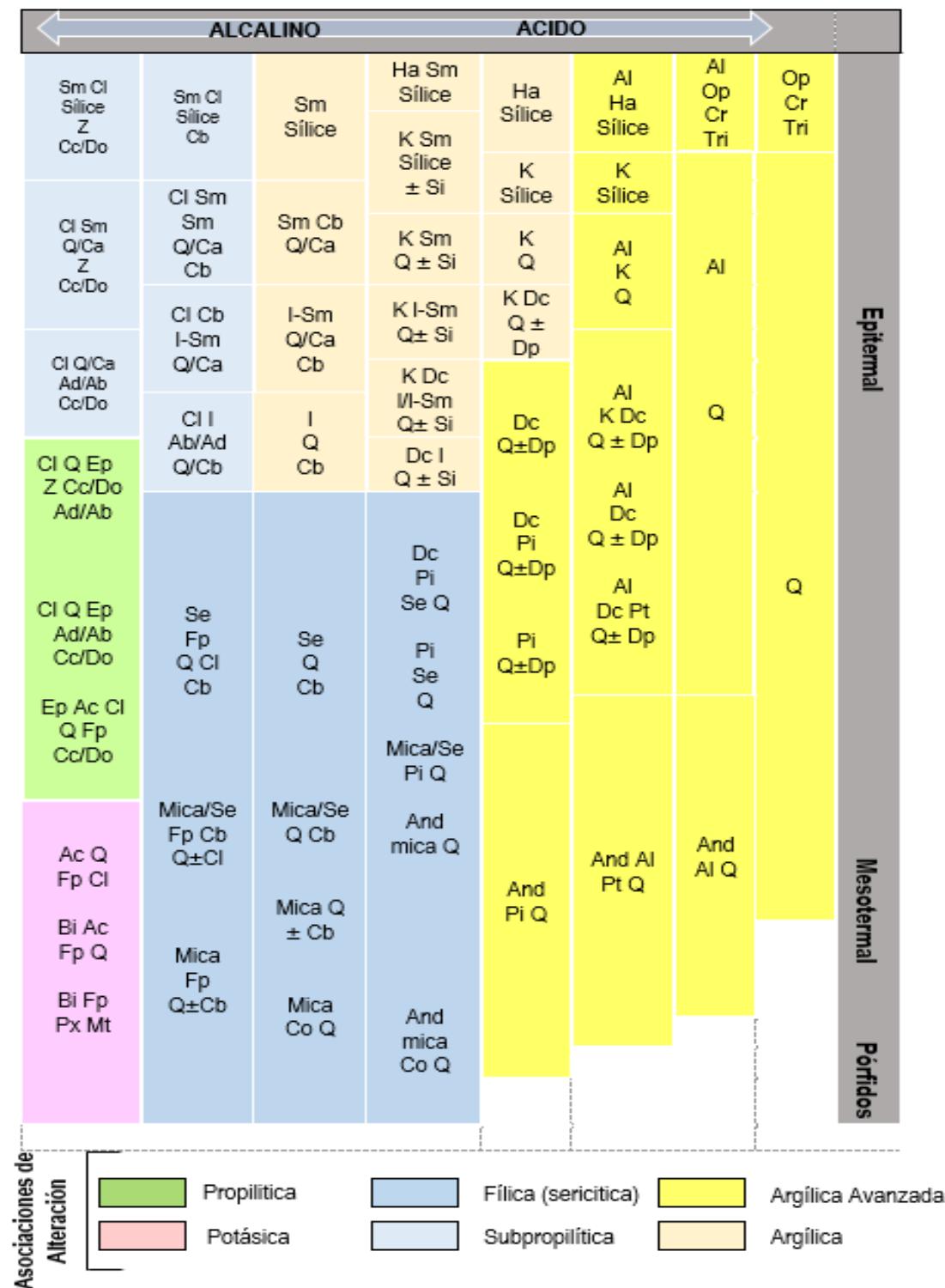


Figura 5: Clasificación esquemática de alteraciones hidrotermales en función de la composición del fluido y la profundidad del sistema. Este tipo de zonación es aplicable a contextos como Farallón Negro, donde se observó una transición desde alteración propilitica hacia zonas potásicas y fílicas. Imagen tomada de la web con fines ilustrativos. Referencias: Corbett y Leach (1998); Sillitoe (2010). Minerales representados en el esquema: Silicatos y minerales de ganga: Cuarzo (Q), Cristobalita (Cr), Tridimita (Tri), Sílice amorfa (Si), Feldespato potásico (Fp), Ortosa, Microclina. Arcillas y minerales de alteración: Esmectita (Sm), Illita (I), Illita-Esmectita (I-Sm), Caolinita (K), Halloysita (Ha), Dickita (Dc), Pirofilita (Pt), Sericitina (Se), Clorita (Cl). Carbonatos y óxidos: Calcita (Cc), Dolomita (Do), Carbonatos (Cb), Diáspera (Dp), Magnetita (Mt), sílice opalina (Op). Feldespatos y zeolitas: Albita (Ab), Adularia (Ad), Albita/Adularia (Ab/Ad), Zeolita (Z). Minerales ferrosos y sulfuros: Pirita (Pi), Epidota (Ep), Actinolita (Ac), Clinopiroxeno (Cpx), Diópsido (Dp), Biotita (Bio), Andalusita (And).

Tabla 1: Clasificación y características de sistemas de Baja Sulfuración y Alta Sulfuración.

Alteración	Baja Sulfuración	Alta Sulfuración
Silícea	Vetas y vetillas de cuarzo, brecha y/o stockwork silicificado; silicificación poco profunda, incluyendo encaptes de calcedonia y/u ópalo, sinter silíceo	Cuerpos de cuarzo residual, comúnmente denominado sílice oquerosa ("vuggy silica"); silicificación parcial o masiva; vetas de cuarzo y brecha silicificada, incluyendo calcedonia y/o encaptes opalinos; no sinter
Argílica Avanzada	Caolinita-alunita - (illita/smectita-azufre nativo) ± encaptes opalinos de origen por vapores calientes; infrayacen comúnmente encaptes de calcedonia	Alunita-caolinita/dickita-pirofilita-diaspora de origen hipógeno, típicamente alrededor de núcleos silíceos; también raíces de sericitita-pirofilita
	Encaptes de caolinita/haloysita – alunita jarosita, o zonas de origen supérgeno	Encaptes de caolinita-alunita sea de vapores calientes o supérgenos
Argílica intermedia	Halo de illita/smectita en las vetas; halo illita ± smectita en zonas sericíticas más profundas	Halo de illita e illita/smectita en núcleos de argillización avanzada
Propilítica	Amplio encajonante de un sistema mineralizado, en algunos casos de origen deutérico y de dudosa relación genética directa con el sistema epitermal generador de la mineralización. Típicamente clorítica (no epidoto), excepto en niveles más profundos.	
Sericítica/Fílica	Roca con sericitita dominante, típicamente como halo de vetas de cuarzo profundas	Raíces sericíticas de áreas con alteración arcílica avanzada; puede ser transicional a arcílica avanzada

Nota: Estas asociaciones de alteración hidrotermal pueden estar relacionadas con una mena metálica, o bien ser estériles, es decir, no contener mineralización económica. En particular, las asociaciones de alteración argílica avanzada de origen hipogénico (como los halos de cuarzo-alunita o cuarzo residual) se interpretan, en algunos casos, como parte de un sistema mayor. Cuando estas zonas están espacialmente relacionadas con un sistema pórfito subyacente, se utiliza el término litoencapte (*lithocap*) para describirlas (Sillitoe, 1995a). Por otro lado, el término sericitita se emplea comúnmente en el trabajo de campo para referirse a mica blanca de grano fino, aunque mineralógicamente puede corresponder a illita, moscovita, o incluso a micas potásicas intermedias de coordinación dioctaédrica (Meyer y Hemley, 1967).

2.3. Minería metalífera y generación de residuos

La minería, especialmente la relacionada con la extracción de metales preciosos como el oro (Au) y la plata (Ag), implica una secuencia de procesos técnicos que abarcan desde la extracción subterránea hasta el beneficio del mineral. En el caso del Distrito Minero Farallón Negro (DMFN), este proceso está completamente integrado, lo que convierte al yacimiento en un referente nacional en la minería metalífera argentina.

Durante las etapas de extracción y procesamientos se generan dos tipos de residuos: material estéril (botaderos) y colas de proceso. El primero corresponde a rocas sin valor económico que se depositan en botaderos o escombreras, mientras que las colas derivan del tratamiento

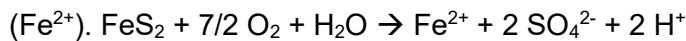
del mineral y se almacenan tras recuperar parcialmente las soluciones utilizadas en lixiviación. Ambos tipos de residuos poseen un alto potencial de impacto ambiental debido a su contenido en metales pesados y elementos traza.

2.3.1. Drenaje ácido de mina

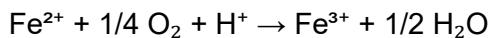
El drenaje ácido de mina (DAM), generado por la oxidación de sulfuros en desechos mineros, constituye uno de los principales problemas ambientales de la minería metalífera (Nordstrom y Alpers, 1999). Factores como la acción bacteriana, la exposición a la atmósfera y la presencia de minerales de grano fino, que aumentan la superficie reactiva, aceleran este proceso (Blowes y Jambor, 1990). El DAM favorece la movilidad de metales, metaloides y sulfatos, extendiendo la contaminación más allá de los yacimientos. La abundancia de sulfuros es el factor determinante de su generación.

Las reacciones biogeoquímicas centrales son:

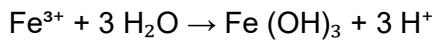
1. **Oxidación de sulfuros (ej. pirita):** produce acidez, sulfatos e ion ferroso.



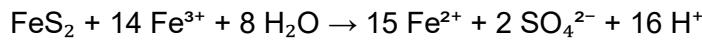
2. **Oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} :** ocurre a bajo pH y se acelera por bacterias como *Thiobacillus ferrooxidans*, aumentando hasta en 5 órdenes de magnitud la reacción.



3. **Hidrólisis de Fe^{3+} :** genera mayor acidez y precipitados de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, mientras la mayoría de los metales permanece en solución.



4. **Oxidación adicional de pirita por Fe^{3+} :** liberando nuevamente Fe^{2+} , sulfato y protones.



El DAM afecta no sólo el entorno inmediato de los depósitos, sino que puede propagarse por escorrentía y aguas subterráneas hacia zonas más alejadas, incluso pobladas (Nieva et al., 2016, 2018). Aun en ambientes con carbonatos, que aportan neutralización parcial, la movilidad de elementos tóxicos como arsénico y antimonio persiste (Zhou et al., 2016).

2.3.2. Neutralización de la acidez

La acidez producida en los procesos antes mencionados genera valores de pH de 1,5 a 4. Los protones y el Fe (III) liberados durante la oxidación son capaces de promover una mayor disolución de minerales y de movilizar los elementos en los diques de cola (Dold y Fontboté, 2001). Asimismo, durante el desplazamiento del drenaje, los protones y los metales liberados

reaccionan con los minerales neutralizadores de ácido tales como carbonatos y silicatos aumentando el pH del agua de los poros. Este aumento en el pH es acompañado con frecuencia por la precipitación de (oxi)hidróxidos metálicos y sulfatos hidratados que remueven los metales disueltos en el agua de los poros de los desechos mineros. Estos minerales secundarios actúan como compuestos amortiguadores del pH (Blowes y Ptacek, 1994).

La disolución de minerales de carbonato puede elevar el pH del agua de los poros a valores cercanos a 7. La disolución libera Ca, Mg, Fe y otros cationes y aumenta la alcalinidad del agua. En muchos sitios, la cantidad de carbonatos presentes es suficiente para neutralizar la acidez generada por la oxidación de los sulfuros, manteniendo el valor del pH cercano a la neutralidad. Tal es el caso de los diques de cola derivados del procesamiento de depósitos de vetas de oro carboníferas (Blowes, 1990; McCreadie et al., 2000), pero esta situación no se da en todos los casos.

La disolución de gran parte de los minerales aluminosilicatos también consume H⁺ y libera cationes ((Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe^{2+/3+}), sílice y aluminio disuelto al agua de poros de los residuos (Blowes y Ptacek, 1994). Sin embargo, este proceso ocurre a una velocidad menor que la disolución de los hidróxidos metálicos, y significativamente más lenta que la de los carbonatos.

2.3.3. Formación de minerales secundarios y movilidad de metales

La cristalización de los minerales secundarios (ej.: sulfatos de metales hidratados, hidroxisulfatos de hierro) se produce in situ, principalmente como resultado de la oxidación de los sulfuros primarios. Sin embargo, a partir de ellos también se pueden formar minerales adicionales a medida que progresa la meteorización. Tales productos, que son predominantemente sales solubles en agua, cristalizan durante la evaporación del agua intersticial (Jambor, 1994; Jambor y Blowes, 1998).

Todas estas fases secundarias, al ser generalmente de grano fino, presentan una elevada superficie específica que favorece la adsorción y retención temporal de metales, pero también pueden actuar como fuentes secundarias en condiciones ambientales cambiantes.

La mineralogía secundaria, por tanto, juega un rol fundamental en los procesos de liberación, retención y movilidad de contaminantes, siendo un factor clave para evaluar el comportamiento geoquímico de los residuos a corto y largo plazo.

2.3.4. Importancia de la caracterización mineralógica y geoquímica

La caracterización mineralógica y geoquímica de los residuos mineros permite identificar las fases portadoras de metales y comprender los procesos que controlan su liberación al medio ambiente. Este conocimiento es esencial para:

- Evaluar el riesgo ambiental de los residuos,
- Predecir su comportamiento futuro bajo distintos escenarios climáticos e hidrológicos,
- Diseñar estrategias de monitoreo, y

- Proponer medidas de mitigación y remediación efectivas durante la operación y el cierre de mina.

En el caso de DMFN, la falta de estudios específicos sobre la mineralogía asociada a los metales representa una limitación para la gestión ambiental integral. Por ello, el presente trabajo propone identificar los minerales portadores de As y otros metales pesados y evaluar su comportamiento geoquímico, aportando información crítica para el diseño de planes de cierre ambientalmente responsables.

2.4. Explotación del Yacimiento

El complejo Minero Industrial Farallón Negro ubicado en la subcuenca Belén-Aguas de Dionisio, se encuentra en producción desde fines de la década del setenta, obteniéndose como producto final una aleación metálica (*bullion*) que contiene Au y Ag. Originalmente, el proceso de refinamiento se realizaba en la planta de YMAD en San Fernando del Valle de Catamarca. Sin embargo, desde 2016 se inició el traslado al complejo minero.

El complejo volcánico Farallón Negro se interpreta como un depósito epitermal de baja sulfuración (epitermal aurífero-argentífera (Sillitoe, 1989)), caracterizado por una alteración sericitica intensa de la roca de caja.

La mineralización de Farallón Negro y Alto de La Blenda se presenta en sistema de vetas, con mineralización de Au-Ag y Mn, sobre una base menor de sulfuros básicos. En la veta Farallón hay evidencias de un pulso cercano de galena (PbS) y manganocalcita (Ca, Mn) CO₃. El Au (electrum) libre recubre cavidades y está también asociado con zonas de abundante pirita.

2.5. Laboreo

Actualmente, la extracción del mineral se lleva a cabo mediante dos métodos de minería subterránea: corte y relleno y sublevel stoping. El primero consiste en llenar con material estéril los espacios vacíos generados tras la extracción del mineral, lo que permite mantener la estabilidad estructural de la mina. En cambio, el método sublevel stoping se basa en la generación de subniveles horizontales dentro del yacimiento, desde los cuales se realizan las labores de perforación y voladura. Este método se caracteriza por no requerir relleno, ya que aprovecha la estabilidad natural de la roca encajonante, permitiendo una alta productividad y eficiencia operativa en yacimientos de geometría tabular y buena competencia geomecánica (Chávez, 2017).

Las principales zonas de explotación corresponden a las vetas Esperanza Sudeste, Farallón Negro y Encuentro.

Dentro del rajo subterráneo, la perforación se efectúa con equipos tipo jumbo de un brazo electrohidráulico. El mineral volado y la distribución del material de relleno se gestionan mediante palas cargadoras de bajo perfil (Load-Haul-Dump, LHD). El mineral es descargado en chimeneas que, en su base, disponen de un sistema de buzones que permite la carga directa sobre camiones. El material de relleno, en su mayoría proveniente de superficie, también se introduce a través de chimeneas y luego se distribuye en los distintos rajes.

El yacimiento Alto de La Blenda corresponde a un sistema de vetas con una extensión aproximada de 2 km. Fue desarrollado en tres niveles principales conectados con superficie, además de un cuarto, quinto y sexto nivel enlazados internamente. El acceso a los distintos niveles se realiza mediante rampas, que también cumplen la función de vías de evacuación del mineral y de abastecimiento de insumos.

2.5.1 Tratamiento de beneficio:

Para el beneficio del mineral se implementan dos tipos de tratamiento:

Cianuración por agitación:

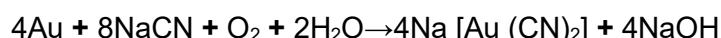
La Cianuración por agitación es una técnica hidrometalúrgica ampliamente utilizada para la recuperación de metales preciosos, particularmente oro y plata, a partir de minerales refractarios o parcialmente oxidados. Las etapas por seguir son las siguientes:

1. Preparación del mineral

El proceso se inicia con la reducción del tamaño del mineral mediante trituración primaria, secundaria y molienda en húmedo hasta alcanzar una granulometría óptima, típicamente por debajo de 75 micrones. Este grado de molienda permite liberar adecuadamente las partículas de Au y Ag encapsuladas o asociadas a sulfuros.

2. Lixiviación por agitación

El mineral previamente molido se somete a un proceso de lixiviación en tanques agitados mecánicamente, en presencia de una solución alcalina de cianuro de sodio (NaCN), usualmente en concentraciones entre 300 y 600 ppm. Se incorpora cal (CaO) para mantener el pH del sistema entre 10 y 11, previniendo así la volatilización del cianuro como cianuro de hidrógeno (HCN), gas altamente tóxico. La reacción de disolución del Au se produce conforme a la siguiente ecuación:



Durante esta etapa, que puede extenderse entre 24 y 72 horas dependiendo de las características del mineral, el Au y la Ag se disuelven formando complejos solubles de cianuro.

3. Separación sólido-líquido

Finalizada la etapa de lixiviación, se procede a la separación de los sólidos (relaves) del licor rico en metales preciosos mediante decantación en contracorriente, sedimentación o filtración a presión. El líquido clarificado, denominado solución rica, contiene los complejos solubles de cianuro de Au y Ag.

4. Recuperación de metales preciosos

Existen dos métodos predominantes para la recuperación del Au y la Ag desde la solución rica:

- **Proceso Merrill-Crowe:** Consiste en la eliminación del oxígeno disuelto mediante vacío o adición de agentes desoxidantes, seguido de la precipitación selectiva del oro y la plata mediante adición de polvo de zinc.

- Proceso de CIP/CIL (Carbón en Pulpa / Carbón en Lixiviación): Consiste en la adsorción del complejo Au (CN)₂- sobre partículas de carbón activado. Posteriormente, el oro es desorbido mediante una solución cáustica y recuperado por electrólisis o precipitación.

En Farallón Negro, dependiendo del tipo de circuito, puede utilizarse uno u otro método, o incluso una combinación secuencial, según los niveles de impurezas presentes en la solución.

5. Tratamiento de residuos

Los sólidos residuales del proceso de lixiviación son dispuestos en un sistema de depósito de relaves especialmente diseñado para mitigar impactos ambientales. Previamente, se somete estas colas a un tratamiento de destrucción de cianuro, empleando técnicas como oxidación con dióxido de azufre en presencia de aire (proceso INCO), peróxido de hidrógeno o hipoclorito de sodio, con el objetivo de reducir las concentraciones de cianuro libre y total a niveles ambientalmente aceptables.

Este proceso se lleva a cabo para una capacidad de aproximadamente 320 toneladas por día. A través de este método se obtiene un *bullion* de Au, compuesto principalmente por un 85% de plata (Ag), 10% de oro (Au), y el resto corresponde a impurezas (Torres et al., 2018).

Lixiviación en pilas:

En el contexto del Complejo Farallón Negro, este método se implementa desde 1986 y se utiliza principalmente en depósitos de óxidos o sulfuros parcialmente oxidados con baja ley de Au y Ag. (Alderete, 1999, Torres et al., 2018).

1. Preparación del mineral

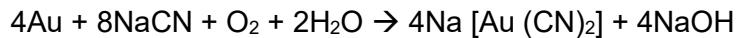
El mineral extraído del yacimiento se somete a trituración primaria y secundaria, alcanzando generalmente una granulometría de entre $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ". Esta distribución de tamaño es crítica para garantizar una buena permeabilidad de la pila y una adecuada superficie de contacto entre el mineral y la solución lixiviante.

2. Construcción de las pilas

El material triturado es transportado y apilado en plataformas especialmente diseñadas, con alturas que varían entre 6 y 10 metros por lift (nivel de pila). Las pilas se construyen sobre una base impermeabilizada con geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE), combinadas con capas de arcilla compactada, para evitar la percolación de cianuro hacia el subsuelo.

3. Irrigación con solución cianurada

Antes de iniciar el riego con solución cianurada, el mineral permanece en una etapa de maduración durante unas 72 horas. Una vez transcurrido ese tiempo, se inicia la lixiviación mediante la irrigación con una solución diluida de cianuro de sodio (entre 100 y 300 ppm), utilizando un sistema de riego por goteo o aspersión. La solución percola lentamente a través del mineral, disolviendo el Au y la Ag por medio de las siguientes reacciones principales:



La percolación puede durar entre 30 y 90 días, dependiendo del tamaño de la pila, la porosidad del mineral y la ley del yacimiento.

4. Recolección de la solución rica

La solución cargada de metales disueltos, denominada solución rica, es recolectada en un sistema de drenes ubicados en la base de la pila y conducida por gravedad o bombeo hacia las pileas de almacenamiento y tratamiento.

5. Recuperación de Au y Ag

El Au y la Ag contenidos en la solución rica se recuperan mediante:

- Adsorción en carbón activado (CIC – Carbón en columna): El complejo de Au y Ag es capturado por el carbón activado. Posteriormente, el carbón cargado es tratado térmicamente o eluido para recuperar metales.
- En algunos casos, se puede utilizar el proceso Marrill-Crowe, especialmente si se requiere una recuperación más rápida y el contenido metálico lo justifica.

6. Recirculación y tratamiento de soluciones

La solución despojada se ajusta en concentración y pH, y se recircula nuevamente a la pila, formando un circuito cerrado para maximizar la recuperación de Au y minimizar el consumo de reactivos. El exceso de solución o las soluciones gastadas pueden tratarse para reducir el contenido de cianuro mediante oxidación química antes de su disposición o reinyección.

7. Cierre y remediación de las pilas

Una vez finalizado el proceso de lixiviación, las pilas se someten a un riego con agua y agentes neutralizantes, con el fin de remover cianuro residual.



Capítulo 3

Marco Geológico

3. Marco Geológico

3.1. Geología Regional

El área de estudio se ubica dentro de la provincia geológica de las Sierras Pampeanas (Figura 6), denominación introducida por Stelzner (1885) para referirse, en un inicio, a las montañas del centro del país. Con el avance de las investigaciones geológicas, este término fue extendido hacia el norte, abarcando numerosos bloques serranos de las provincias de Catamarca y Tucumán. Esta ampliación se fundamenta en las marcadas similitudes geológicas y morfológicas que presentan dichos bloques con aquellos que originalmente recibieron la denominación.

Según González Bonorino (1950), esta unidad comprende un conjunto de sierras conformadas por esquistos, que emergen sobre las pampas circundantes. Se caracterizan por su estructura en bloques montañosos delimitados por fallas inversas lístricas, las cuales tienden a horizontalizarse en profundidad al alcanzar zonas de transición frágil–dúctil dentro de la corteza (Figura 7).

Actualmente, las Sierras Pampeanas se dividen en dos provincias con rasgos geológicos contrastantes:

- Sierras Pampeanas Occidentales, que incluyen las sierras de Tucumán, Catamarca, La Rioja, San Juan y el sector occidental de San Luis. Estas corresponden a un orógeno de edad eopaleozoica.
- Sierras Pampeanas Orientales, que abarcan las sierras del norte de Córdoba, las sierras Grande y Chica de Córdoba, la sierra de Comechingones y la porción más oriental de la sierra de San Luis, vinculadas a un orógeno de edad proterozoica.

Dentro de esta provincia morfoestructural se emplaza el Complejo Volcánico Farallón Negro, el cual alberga importantes yacimientos metalíferos. Entre ellos destaca Minera Alumbrera, una de las explotaciones de Cu, Au y Mo más significativas del país. También se encuentran otros yacimientos de gran relevancia, como Mina Farallón Negro y Minas Capillitas, además de proyectos en desarrollo de notable proyección, entre los que sobresalen Filo Colorado y Agua Rica.

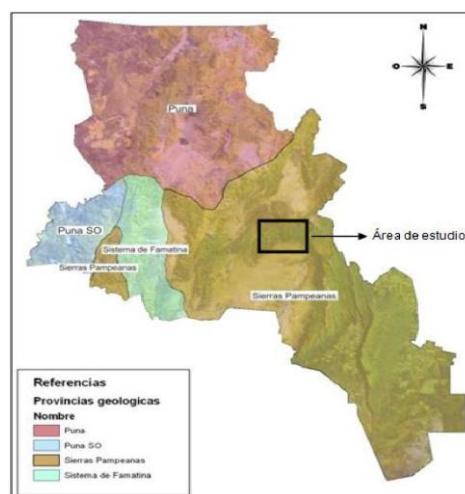


Figura 6: Mapa de provincias geológicas de Catamarca (Fuente: Argerich, 1976).

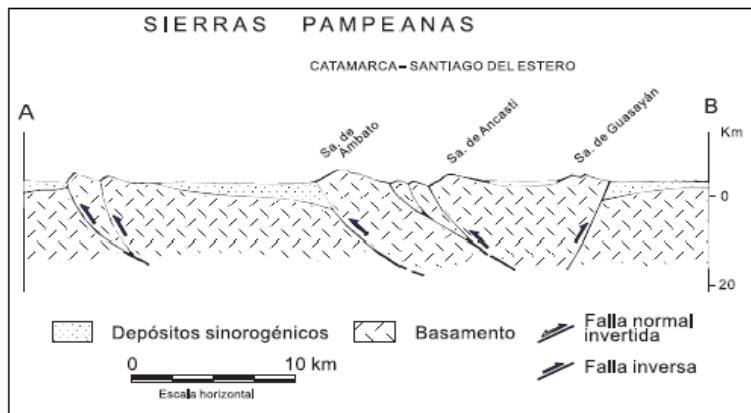


Figura 7: Sección estructural representativa de las Sierras Pampeanas en Catamarca (extraído de González Bonorino, 1950).

3.2. Morfoestructura Farallón Negro – Capillitas

La morfoestructura Farallón Negro–Capillitas constituye un mosaico de bloques limitados por fallas inversas, normales y con desplazamiento de rumbo, conformando un alto estructural entre el Campo del Arenal y la cuenca de Pipanaco. Está integrada por los bloques Farallón Negro, sierra de Capillitas, cerro El Durazno, sierra de Ampujaco-Belén, cerro Quemado y sierra de La Ovejería.

El bloque Farallón Negro conserva relictos volcánicos (estratovolcanes, calderas y domos) intensamente modificados por erosión fluvial, deflación eólica y remoción en masa. El Campo Volcánico incluye ignimbritas, depósitos piroclásticos y áreas endorreicas (La Alumbrera y La Pampita). Destacan los campos lávicos Negro y Blanco y cerros como Negro y Pabellón.

El bloque Capillitas, elevado por la falla inversa Lavadero (rechazo ~4.000 m), se inclina al sureste sobre una peneplanicie pre-cenozoica. Presenta intensa erosión fluvial y cursos de agua controlados por fallas NE y ENE, preexistentes al volcanismo.

El cerro El Durazno corresponde a un bloque granítico levantado por una falla inversa NO y limitado al sur por la falla Lavadero. Está compuesto por vulcanitas y conglomerados plio-pleistocenos. Presenta escarpas de falla recientes (1,5–3 m) y superficies de peneplanización labradas sobre el basamento.

El bloque Ampujaco-Belén, separado por la garganta del río Belén, se levantó mediante fallas inversas y basculamiento. Las sierras muestran perfiles asimétricos: Belén alcanza 2.100 m y Ampujaco 3.240 m (cerro Pampa). La sierra de Belén presenta mayor erosión y drenaje dendrítico, mientras que Ampujaco conserva mejor la peneplanicie pre-terciaria.

El bloque cerro Quemado, elevado por fallas NE y NO, está intensamente disecado por drenaje fluvial que eliminó la peneplanicie terciaria. Su sector sudoeste presenta cordones serranos paralelos y evidencias neotectónicas, como abanicos aluviales pleistocenos afectados por escarpas de falla.

La sierra de La Ovejería, elevada por la falla San Buenaventura (rechazo ~3.000 m), se inclina al SE hacia la depresión recorrida por el río Jasiyae. Sobre antiguas peneplanicies se

apoyan sedimentitas terciarias y depósitos pedemontanos cuaternarios, modelados principalmente por erosión fluvial.

Finalmente, la **depresión del Campo del Arenal**, parcialmente incluida en el área de estudio, está colmatada por depósitos sedimentarios terciarios y cuaternarios que contienen acuíferos explotados por Bajo de La Alumbrera. Su modelado responde a la acción fluvial y eólica, generando niveles pedemontanos, salitrales, campos de dunas y mantos eólicos.

3.3. Geología Local

Las rocas más antiguas de la comarca corresponden al basamento ígneo-metamórfico de edad precámbrica a eopaleozoica, que aflora en las sierras del Durazno, Aconquija, Belén y Cerro Bola del Atajo. Estas litologías incluyen metamorfitas de bajo grado asignadas a la Formación Suncho (Mirré y Aceñolaza, 1972; Aceñolaza y Aceñolaza, 2005).

Sobre este basamento se emplaza una potente secuencia volcánica del Complejo Volcánico Farallón Negro (CVFN), de edad miocena superior (entre 8 y 6 Ma). El nivel actual de erosión se sitúa por debajo del piso de la caldera, lo que permite el afloramiento de numerosos cuerpos intrusivos con composiciones que varían desde andesitas hasta riolitas (Llambías, 1972).

La alteración hidrotermal se desarrolló cuando los procesos de diferenciación magmática alcanzaron una proporción moderada de sílice, es decir, con posterioridad a la intrusión de la monzonita Alto de La Blenda y de manera contemporánea a la intrusión de los domos correspondientes a la unidad riodacítica Macho Muerto (Llambías, 2011).

En las zonas periféricas del complejo volcánico, los afloramientos se encuentran recubiertos por depósitos de piedemonte cuaternarios (Araucanense, según González Bonorino, 1950), por sedimentos aluviales asignados al Cuaternario Indiferenciado, o bien han sido eliminados localmente debido a cabalgamientos del basamento.

3.3.1. Unidades Paleozoicas

Precámbrico superior – Cámbrico inferior

La **Formación Suncho** fue definida por Mirré y Aceñolaza (1972) y constituye las rocas más antiguas del área de estudio. De acuerdo con Aceñolaza et al. (1989), esta unidad representa la expresión meridional de la Formación Puncoviscana, que conforma el basamento cristalino de gran parte del noroeste argentino y del sur de Bolivia (Turner, 1962; 1971).

Las dataciones propuestas por Aceñolaza (2005) sitúan a la Formación Suncho en un intervalo comprendido entre el Precámbrico superior y el Cámbrico inferior. Sin embargo, su edad exacta continúa siendo motivo de debate debido a la escasa y fragmentaria evidencia estratigráfica disponible (Omarini y Baldis, 1982; Durand y Aceñolaza, 1990; Aceñolaza y Alonso, 2001; Hong et al., 2001; Buatois y Mángano, 2003a, 2003b; Buatois y Mángano,

2004). La presencia del icnofósil Oldhamia ha permitido interpretar un ambiente marino para su depósito (Mirré y Aceñolaza, 1972; Durand, 1982).

Desde el punto de vista litológico, está compuesta por un conjunto de rocas metamórficas que incluyen pizarras, filitas, esquistos, gneises y migmatitas, correspondientes a facies de esquistos verdes a anfibolita, además de hornfels granatíferos (González Bonorino, 1950; Llambías, 1970; 1972).

3.3.2. Unidades Cenozoicas

Neógeno

Mioceno superior

El Miembro **Los Baños**, asignado al Mioceno superior (Muruaga, 1998), se encuentra en la base de la Formación Chiquimil y está compuesto por una alternancia de areniscas medianas a gruesas de tonalidades naranja a rojizas, pelitas y conglomerados volcanoclásticos. Su litología indica un ambiente fluvial de llanura bajo clima con estación estival húmeda. Los afloramientos son continuos en la ladera occidental de la Sierra de Hualfín, y aparecen saltuariamente en la ladera oriental y en la Sierra de Las Cuevas (Muruaga, 1998; Bossi y Muruaga 2009).

El **Complejo Volcánico Farallón Negro (CVFN)** fue definido por González Bonorino (1950) y estudiado en detalle por Llambías (1970, 1972). Se compone de varios centros eruptivos discontinuos que cubren unos 700 km², entre ellos Farallón Negro, Vis Vis, Cerro Atajo, Capillitas y Agua Rica, actualmente separados por fallas inversas vinculadas al levantamiento de las Sierras Pampeanas. Su actividad se desarrolló entre el Mioceno medio y superior, con litologías que van de basaltos a riolitas, incluyendo brechas, tobas, diques, domos y cuerpos tipo stock. El complejo se emplazó en una cuenca extensional, alcanzando originalmente unos 5.500 m s.n.m. (Llambías, 1970). Geoquímicamente presenta afinidad subalcalina a calcoalcalina, con altos contenidos de K (Sasso, 1997; García, 2018).

Las unidades principales son:

- **Brecha Morada (BM)**: la más antigua, con espesor de ~1.600 m, compuesta por brechas andesíticas de color morado-grisáceo, intercaladas con coladas basáltico-andesíticas y tobas dacíticas.
- Brechas Polimíticas: suprayacentes a la BM y abundantes en la periferia, formadas en un ambiente extensional; predominan clastos volcánicos de basaltos y andesitas, con escasa participación del basamento.
- **Andesita La Chilca**: domos subvolcánicos de ~7,9 Ma, con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita; representan las primeras intrusiones asociadas al complejo.
- **Monzonita Alto de la Blenda**: mayor cuerpo intrusivo (6,7 km²), de textura plutónica equigranular, con edad de ~7,5 Ma. Intruye a la BM y es cortada por unidades más jóvenes.

- Dacita Agua Tapada y Dacita Macho Muerto: pórfidos dacíticos emplazados en un corredor NO-SE, con edades entre 6,1 y 5,9 Ma. Presentan estructuras de flujo y alta viscosidad, asociadas a mineralizaciones de Cu-Au-Mo.
- Riolita Los Leones: unidad más joven y diferenciada, de alta viscosidad y textura porfírica, con foliación magmática fina que marca el episodio final del CVFN (Llambías, 2011).

En conjunto, el CVFN constituye una secuencia volcánico-subvolcánica compleja y altamente diferenciada, testimonio de la evolución magmática calcoalcalina del Mioceno en el noroeste argentino.

Mioceno tardío - Plioceno

La **Formación Andalhuala** aflora extensamente en el área de Hualfín, donde alcanza espesores considerables que disminuyen marcadamente hacia el sur. También se presenta de manera discontinua a lo largo de ambos márgenes del río de Los Nacimientos, entre el Farallón Negro y la sierra de Hualfín (Bossi y Muruaga, 2009).

Desde el punto de vista litológico, está compuesta por areniscas de grano medio a grueso y areniscas conglomerádicas de tonos gris claro, con clastos de rocas metamórficas y vulcanitas alteradas. Estas facies exhiben estructuras macizas o estratificación cruzada, alternando con bancos limo-arenosos gris pardo a amarillentos, generalmente masivos, bioturbados e intercalados con capas tobáceas (Tineo y Ruiz, 2014).

De acuerdo con Bossi y Muruaga (2009), la sucesión sedimentaria registra evidencias paleoclimáticas que indican un incremento progresivo de la aridez hacia el techo de la unidad. Esta transición se refleja en el desarrollo de cuerpos arenosos canalizados de bajo relieve y espesor, vinculados a calcretos, depósitos de loess y arenas eólicas que se acumulan directamente sobre canales fluviales con depósitos gruesos, o bien forman grandes dunas. La presencia de conglomerados y arenas gruesas sugiere la ocurrencia de flujos mantiformes, frecuentemente hiperconcentrados.

La edad establecida en base a la fauna de mamíferos y dataciones radiométricas es miocena tardía-pliocena (Bossi y Palma, 1982).

Pleistoceno – Holoceno

Conglomerados de la Puna (Punaschotter)

Punaschotter (Penck, 1920) es una denominación informal aplicada a los conglomerados que afloran al sur de Corral Quemado y se extienden desde El Durazno a ambos márgenes del río Loconte. Están formados por capas de conglomerados de textura fina a media, con bloques graníticos y metamórficos subredondeados, frecuentemente con pátinas negras, que alternan con lentes de areniscas arcósicas. Su espesor máximo no supera los 50 m.

Estos depósitos alcanzan la ribera derecha del río Los Nacimientos, donde se apoyan en discordancia sobre la Formación Corral Quemado (Bossi et al., 2001). También afloran en conglomerados de piedemonte que forman mesadas altas, aunque su definición estratigráfica

es relativa debido a la naturaleza conglomerádica, la proximidad de la fuente y la ausencia de fósiles. En general, conservan superficies geomórficas poco deformadas, salvo en Corral Quemado, donde, junto a la falla que elevó la sierra de Papachacra, los estratos aparecen fuertemente inclinados.

Cuaternario Indiferenciado

El Cuaternario de la zona fue caracterizado por Seggiaro y Becchio (2014) a partir del análisis de los principales procesos geomorfológicos actuales. Se reconocen las siguientes facies:

- Niveles pedemontanos antiguos: depósitos de gravas y bloques, de pobre selección, integrados por clastos y rodados graníticos, meta-sedimentarios y, en menor proporción, sedimentitas y vulcanitas.
- Abanicos aluviales y gravas de pedimento: fanglomerados y conglomerados con matriz arenosa y disposición caótica, que muestran diferencias entre facies proximales y distales.
- Sedimentos eólicos: extensos campos de dunas de hasta 6 m de altura y 30 a 40 m de ancho, concentrados principalmente en Campo Arenal y en quebradas.
- Depósitos fluviales: acumulaciones de arenas, gravas y bloques asociadas a sistemas fluviales sinuosos y meandriformes.

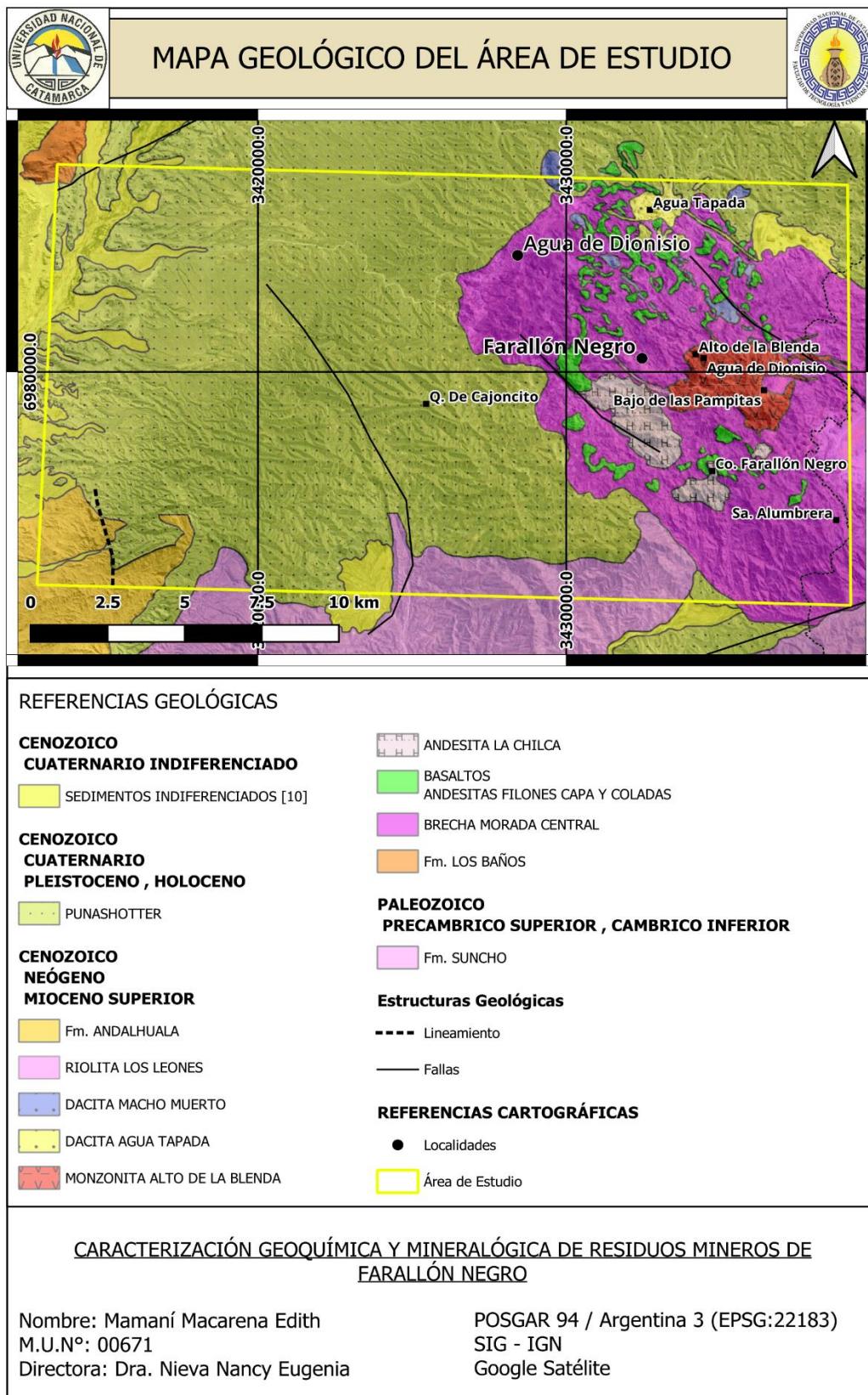


Figura 8: Mapa Geológico del área de estudio.

3.4. Marco Geográfico

3.4.1 Clima

En general el clima de la región se clasifica como **semidesértico continental**, caracterizado por contemplar gran amplitud térmica diurna, con temperaturas de hasta 40°C en verano, descendiendo por la noche a generalmente 10°C. En invierno se registran temperaturas de hasta -19°C sobre todo en los meses de junio-julio, siendo frecuente las nevadas. La media anual aproximada es de 27° durante el día y 10° durante la noche. Las lluvias son escasas, con precipitaciones anuales que promedian 200 mm concentradas en el periodo estival (enero-febrero), cuando ocurren lo hacen de modo torrencial, siendo comunes lapsos prolongados de sequía (SEGEMAR, 2018).

Según la caracterización climática elaborada por el Servicio Meteorológico Nacional, basada en la clasificación de Köppen-Geiger, la región corresponde al tipo BWk. Bajo esta misma clasificación, el SEGEMAR identifica al área de estudio como un clima **B** (precipitación media anual inferior al límite de sequía), **W** (árido o desértico), y **k** (temperatura media anual inferior a 18°C en el mes más caluroso – enero).

3.4.2 Hidrología

En el área de influencia del distrito minero Farallón Negro, el sistema hidrográfico se caracteriza por ser transitorio. Las quebradas y arroyos solo transportan caudal superficial durante las épocas de lluvia, presentando escurrimientos esporádicos y de tipo torrencial (SEGEMAR, 2018).

La red de drenaje fluye predominantemente hacia el noroeste, desembocando en el río Los Nacimientos (principal colector), en el Valle de Hualfín. No obstante, existen drenajes de menor extensión con pendientes abruptas que se orientan hacia el sureste, descargando en la quebrada de Vis Vis – Amanao. También se identifican escurrimientos hacia el sur, mediante el río Jejenes, que desemboca en dicha quebrada.

La disponibilidad de agua subterránea es limitada y, en ciertos sectores, se encuentra confinada en fracturas. Esto se atribuye al predominio de rocas volcánicas en la región, cubiertas por un manto detrítico escaso, que no constituye un medio adecuado para el almacenamiento de agua. Por esta razón, la captación de agua destinada a las actividades mineras suele realizarse mediante drenes dispuestos en los cauces de ríos cercanos, los cuales conducen agua en profundidad.

A unos 5 Km al oeste del campamento central de Farallón Negro, en la quebrada de Agua de Dionisio, se encuentra una fuente de aguas termales. Sin embargo, su bajo caudal y elevado contenido salino la hacen poco apta para resolver los requerimientos de abastecimiento, tanto industrial como doméstico. En esta misma quebrada, el río Seco y la fuente termal Agua de Dionisio constituye un aporte superficial relevante, ya que drena directamente el área mineralizada de Farallón Negro – Alto de La Blenda, reforzando la dinámica hidrológica del sector.



Capítulo 4

Metodología

4. Metodología

La investigación se centró en un abordaje integral de la mineralogía asociada a los botaderos y diques de colas del yacimiento Farallón Negro, combinando la revisión de antecedentes bibliográficos con el análisis de información actualizada proveniente del entorno intervenido. Este enfoque permitió alcanzar una comprensión más completa y precisa de las características geoambientales del sector, integrando datos históricos, observaciones de campo y técnicas analíticas modernas.

4.1. Recopilación y Análisis de Información Previa

Se revisó y actualizó la información existente sobre el área de estudio, considerando aspectos geológicos, geográficos, climatológicos, hidrológicos, geomorfológicos, el método y estado de explotación del yacimiento. Para ello, se consultaron fuentes bibliográficas relevantes y bases de datos especializadas, complementadas con técnicas analíticas modernas, con el fin de obtener una comprensión más detallada y sólida del sistema.

4.2. Elaboración del Marco Geológico

A partir del análisis de los antecedentes técnicos, se desarrolló el marco geológico de la zona, incluyendo la elaboración de un mapa geológico actualizado. Esta etapa se fundamentó en la revisión de informes previos, hojas geológicas oficiales y trabajos académicos, como tesis y publicaciones científicas relacionadas con el área. La integración de los datos más relevantes y recientes permitió definir con mayor precisión las características geológicas del sector y su relación con el contexto regional.

4.3. Elaboración Cartográfica

La cartografía temática preliminar se desarrolló mediante el uso del software QGIS, complementado con herramientas de teledetección y análisis espacial. En primer lugar, se recopiló y sistematizó la cartografía preexistente del área de estudio, incluyendo hojas geológicas oficiales, planos topográficos e imágenes satelitales disponibles en repositorios públicos e institucionales.

Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de interpretación y digitalización de la información, desde el punto de vista geológico e hidrológico. Este procedimiento permitió generar una base cartográfica unificada y actualizada, sobre la cual se aplicaron técnicas de análisis espacial para identificar relaciones entre los distintos componentes del sistema.

La combinación de datos preexistentes con herramientas de SIG y teledetección no solo facilitó la delimitación precisa de unidades y estructuras, sino que también aportó insumos clave para la elaboración del mapa geológico y la representación espacial de las principales características del área de estudio.

4.4. Muestreo

Para la realización de este estudio se trabajó con muestras previamente recolectadas por el grupo de investigación en Biogeoquímica Ambiental (GIBiGeA) (Figura 9; Tabla 2), conformado por investigadores del Centro Regional de Energía y Ambiente para el Desarrollo Sustentable (CREAS-CONICET) y de la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas – UNCA.

Las muestras de sedimentos se tomaron en el dique de Rulito, abarcando tanto la zona saturada como la parte seca, y en el dique intermedio, donde se muestrearon dos niveles diferenciados dentro de un perfil expuesto. En este último caso, se describieron previamente las unidades sedimentarias y se midieron sus espesores antes de recolectar las muestras. El muestreo se realizó de manera ascendente, desde la base hacia la cima del perfil, con el fin de minimizar la contaminación entre niveles (Figura 10).

En los botaderos, se eliminó la capa superficial expuesta a la intemperie y se obtuvo una muestra compuesta. Todos los sedimentos fueron recolectados con pala de teflón, embolsados y sellados en bolsas de plástico, garantizando así la protección frente a la contaminación por metales.

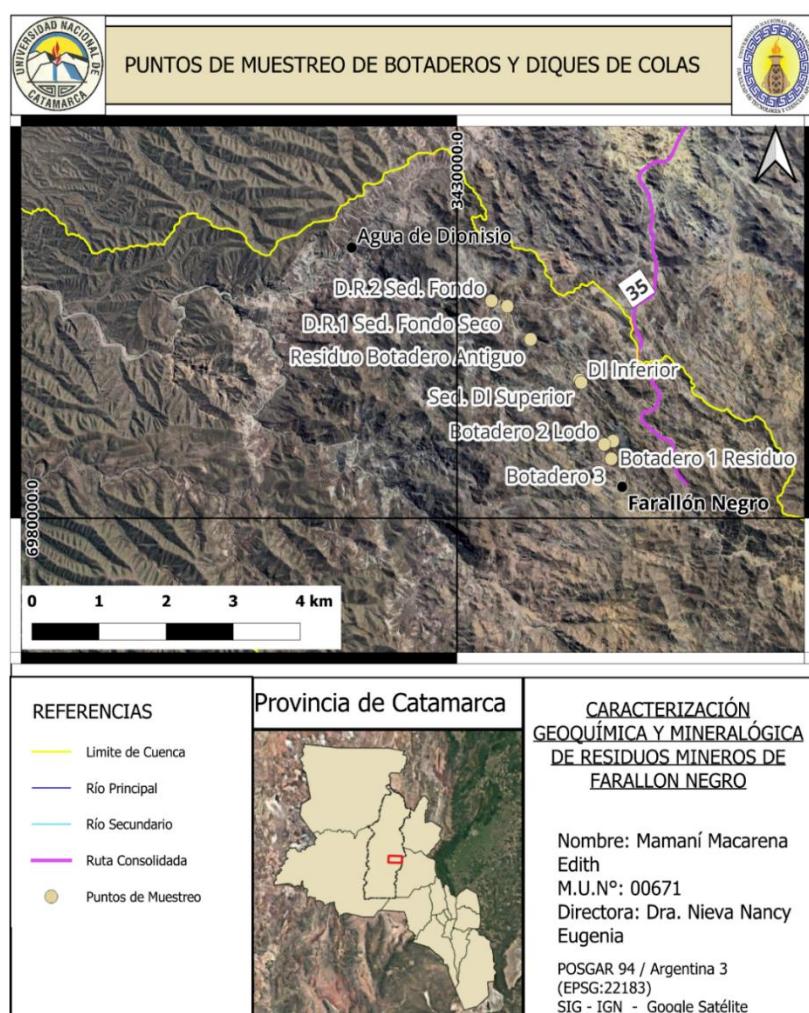


Figura 9: Área de estudio que muestra los puntos de muestreo correspondientes a los distintos botaderos y los diques de colas.

Tabla 2: Coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) de los puntos de muestreo.

Nombre de la Muestra	Descripción	Coordenadas	
		Este	Norte
Bot. 1.	1- Botadero 1 Residuo.	729251,35 m	6978406,53 m
Bot. 2.	2- Botadero 2 Lodo.	729118,63 m	6978362,08 m
Bot. 3.	3- Botadero 3.	729217,47 m	6978152,88 m
D.R.1.	4- Dique de Rulito 1 Sedimento de Fondo Seco.	727721,38 m	6980380,20 m
D.R.2.	5- Dique de Rulito 2 Sedimento de Fondo.	727487,51 m	6980464,12 m
DI Sup.	6- Dique Intermedio Superior.	728770,80 m	6979298,15 m
DI Inf.	7- Dique Intermedio Inferior.	728795,77 m	6979260,30 m
Bot. Ant.	8- Residuo Botadero Antiguo.	728057,50 m	6979897,62 m



Figura 10: a) Perfil del Botadero Antiguo, b) Dique Rulito 2, c) Se visualiza el perfil completo del Dique Intermedio (Nivel Inferior y Superior); d) fotografía panorámica del Dique Intermedio y e) Dique Rulito 1 (seco).

4.5. Tratamiento de las Muestras

En laboratorio las muestras fueron secadas en estufa a 100°C. Posteriormente se tamizaron a fin de separar dos fracciones. Por un lado, la fracción menor a 2 mm (tamiz N.º 10), la cual se utilizó para realizar el análisis granulométrico. Por otro lado, todos los ensayos se realizaron con la fracción menor a 75 µm (tamiz N.º 200).

4.6. Granulometría – Determinación de la Textura

La distribución del tamaño de partículas está estrechamente vinculada con su área superficial específica, lo que influye directamente en su capacidad de adsorber o retener elementos en su superficie. Las fracciones más finas presentan una mayor área superficial por unidad de volumen, otorgándoles una reactividad química y física significativamente superior.

La determinación granulométrica de los sedimentos de los diques de colas y los botaderos se realizó mediante el método del pipeteo, ampliamente reconocido por su precisión en análisis texturales. Para garantizar resultados confiables, las muestras fueron sometidas a un tratamiento químico previo destinado a eliminar agentes cementantes y favorecer la dispersión de las partículas. En particular, los carbonatos se removieron mediante la adición de aproximadamente 25 ml de ácido clorhídrico al 10% sobre cada muestra, seguida de agitación cuidadosa con varilla de vidrio. Tras 24 horas de reposo, se verificó la completa eliminación de carbonatos por la ausencia de burbujeo, y posteriormente las muestras fueron centrifugadas para eliminar el sobrenadante.

Con los carbonatos eliminados, se procedió a la dispersión de las partículas mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) al 5%, que neutraliza las fuerzas de atracción entre partículas, especialmente en las fracciones arcillosas. La mezcla fue agitada mecánicamente durante 30 minutos con un agitador orbital a velocidad constante, asegurando una dispersión homogénea.

Posteriormente, se aplicó el método del pipeteo para cuantificar las fracciones texturales (arena, limo y arcilla) según los principios de sedimentación establecidos por la ley de Stokes (Day, 1965; USDA, 2004). La suspensión se transfirió a cilindros de sedimentación de 1 L, completando el volumen con agua destilada, agitando vigorosamente y dejando reposar sobre una superficie nivelada para iniciar el proceso de sedimentación. La determinación de las fracciones se realizó extrayendo alícuotas de 10 ml mediante pipeta a profundidades fijas de 20 y 5 cm, en tiempos previamente establecidos (Figura 11).

Tabla 3: Tiempos de sedimentación por pipeteo según temperatura, tamaño de partícula y profundidad.

PHI	Micrones	Profundidad	18° C	20° C	22° C	27° C
4	62,5	20cm	20 s	20 s	20 s	20s
4.5	44,2	20cm	2 min	1 min, 54 s	1min 49s	1min 37s
5	31,2	10cm	2 min	1 min, 54 s	1min 49s	1min 37s
5.5	22,1	10cm	4 min	3 min, 48 s	3min 37s	3min 13s
6	15,6	10cm	8 min	7 min, 36 s	7min 15s	6min 27s
7	7,8	10cm	31min, 59 s	30 min, 26 s	28min 59s	25min 49s
8	3,9	5cm	63 min, 58 s	60 min, 51 s	57min 58s	51min 39s
9	1,95	5cm	4 h 16min	4h 3 min	3h 52min	3h 27s
10	0,98	5cm	17 h 3 min	10h 14min	15h 28s	13h 46min
11	0,49	5cm	68 h 14 min	64 h 54 min	61h 50s	55h 5min

Nota: La variación de temperatura fue mínima, por lo que se fijó usar la columna de 22°C, realizando la primera extracción a 20 segundos y la segunda a las 3h 52min.

Las alícuotas extraídas fueron transferidas a cápsulas de porcelana y secadas en una estufa a **105°C hasta peso constante**. Posteriormente, se determinaron las masas de cada fracción, lo que permitió calcular los porcentajes relativos de arena, limo y arcilla presentes en la muestra. Los resultados obtenidos permitieron calcular la proporción relativa de cada fracción granulométrica y, por consiguiente, **clasificar la textura de los sedimentos** analizados conforme al triángulo del USDA.

Cálculo del peso de las muestras:

El peso de la muestra seca (PM) se determina calculando la diferencia entre el peso combinado (PC + PM) y el peso inicial de la cápsula (PC). Esta operación se realiza utilizando la fórmula:

$$PM = (PC + PM) - PC$$

Para el cálculo de texturas se utilizaron las siguientes fórmulas.

1) **Porcentaje de Arena**

$$\% A = 100 - \left(\frac{ms1}{mo} * 100 \right)$$

mo= Cantidad usada de muestra

ms1= Extracción a los 20 s.

2) **Porcentaje de Arcilla**

$$\% Y = \left(\frac{ms2}{mo} * 100 \right)$$

ms2= Extracción a las 3:52 hs.

3) **Porcentaje de Limo**

$$100 - \% A - \% Y$$

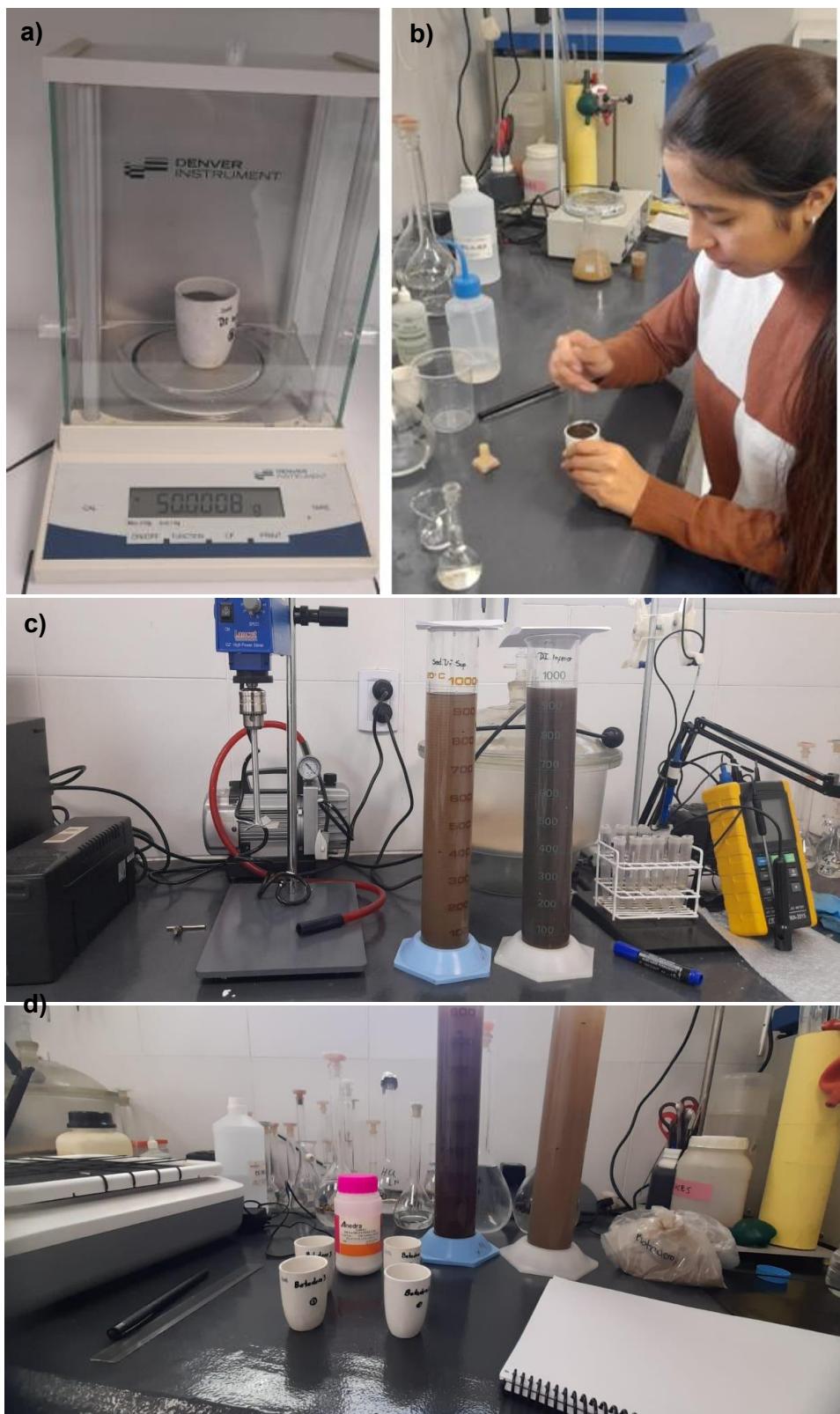


Figura 11: a) Pesaje de muestra en balanza de alta precisión (Denver Instrument), b) etapa de dispersión química con hexametafosfato de sodio, realizada como parte del tratamiento previo al análisis, c) Muestras preparadas para realizar la extracción una vez pasadas las 24hs y d) Reposo y preparación de muestras en laboratorio.

4.7. Determinación de la Densidad

Las densidades de los sedimentos acumulados en los diques de cola y botaderos se determinaron siguiendo el método del picnómetro (Figura 12) basado en Blake y Hartge (1986) y Flint y Flint (2002). Para ello se realizaron diversas pesadas, cuyos datos se transfirieron a la ecuación (1). Primero se pesó el picnómetro (50 ml) vacío (P), luego se le incorporó 20 gr de muestra previamente seca y tamizada (malla 200) (M= picnómetro + muestra). Posteriormente se añadió suficiente agua destilada para cubrir todo el material, y se colocó el picnómetro en un desecador conectado a una bomba de vacío durante 10 minutos, con el objetivo de expulsar todo el aire de los poros en la muestra. La succión se incrementó gradualmente para evitar la formación de espuma.

Una vez concluida la expulsión de todo el aire, se procedió a quitar paulatinamente el vacío; retirar el picnómetro del desecador y llenarlo con agua destilada; se secó exteriormente con papel de filtro y se pesó (S = Picnómetro + agua + mineral).

Para determinar el volumen del picnómetro se procedió a retirar todo el material, se lavó y subsiguientemente se llenó con agua destilada, se secó el exterior y se pesó (W= picnómetro + agua).

$$d = (M-P) / (W+M-P-S) \quad (1)$$



Figura 12: a) picnómetros utilizados para la determinación de la densidad de los sedimentos b) desecador acoplado a una bomba de vacío.

4.8. Caracterización Mineralógica por Difracción de Rayos X (DRX)

El análisis se realizó en el laboratorio Minerales de Arcilla en el Centro de Investigación en Ciencias de la Tierra, Córdoba (CICTERRA-UNC). Se utilizó Difracción de Rayos X (DRX) para identificar los minerales más abundantes en las muestras <75 µm. La DRX se realizó con un difractómetro PANalytical X'Pert Pro operado a 40 kV y 40 mA usando radiación K de Cu. Se obtuvieron datos de difracción de rayos X para muestras aleatorias en el rango de 2θ de 5 a 70° (tamaño de paso: 0,02; 3 s/paso) con un límite de detección de 1%. La identificación y cuantificación de fases se efectuó utilizando el software libre Profex 5.4.

4.9. Análisis de la Composición Química

Primero, se procedió a la digestión ácida de las muestras. Para ello, se pesó una fracción de 1 gr de sedimento tamizado y se disolvió en una mezcla de ácido nítrico (HNO_3 , 65%) y ácido clorhídrico (HCl, 37%) a 95 °C, bajo reflujo para evitar la pérdida de elementos volátiles, como el arsénico. El residuo sólido se eliminó mediante filtración en caliente, y la solución resultante se diluyó con agua tridestilada y desionizada hasta un volumen final de 100 ml.

La solución obtenida se analizó para determinar los contenidos de hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), arsénico (As) y plomo (Pb) mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS), utilizando el equipo del Laboratorio de Control Químico de Procesos de la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas (FTyCA – UNCA). Esta técnica ofrece alta sensibilidad y precisión para la cuantificación de elementos metálicos en las muestras.

Complementariamente, se incorporaron datos de composición química de sedimentos obtenidos de informes ambientales de la empresa minera. En estos informes, las concentraciones de elementos se determinaron mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), técnica reconocida por su exactitud en la detección de elementos traza. Los análisis se realizaron en el laboratorio de análisis ambientales de Enviro Services Group.

Determinación de sulfuros por espectrofotometría UV–Vis

La concentración de sulfuros disueltos se determinó mediante el método colorimétrico del azul de metíleno, empleando un espectrofotómetro UV–Vis con lectura a 665–670 nm. El principio del método se basa en la reacción del sulfuro con N, N-dimetil-p-fenilendiamina en medio ácido, en presencia de Fe^{3+} , que genera azul de metíleno cuya absorbancia es proporcional a la concentración de S^{2-} .

Las muestras fueron preservadas en campo mediante la adición de acetato de zinc (2–5% m/v) y ajuste a $\text{pH} > 9$, evitando la volatilización y oxidación del H_2S . Posteriormente, se acidificaron hasta $\text{pH} 1$ –2 para liberar el sulfuro retenido como ZnS .

La curva de calibración se preparó a partir de estándares frescos de Na_2S (0,02–1,00 mg/L), tratados con el mismo procedimiento que las muestras. En cada ensayo, se adicionaron volúmenes fijos de reactivo cromogénico y oxidante, se dejó reaccionar durante 20 min a temperatura ambiente (25 ± 1 °C) y se registró la absorbancia contra un blanco de reactivos.

La concentración de sulfuro se calculó interpolando la absorbancia en la curva de calibración lineal ($R^2 \geq 0,995$). Se aplicaron controles de calidad mediante blancos, duplicados y recuperaciones por adición estándar (80–120%).

Este método permitió cuantificar sulfuros en el rango de 0,02–1,0 mg/L, con buena sensibilidad y reproducibilidad.

4.10. Pruebas del Potencial Generador de Acidez:

Las pruebas estáticas son procedimientos empíricos que generalmente se llevan a cabo para predecir el potencial de los desechos sulfurosos para producir ácido y conocer la capacidad

de neutralización de la acidez del sistema (disolución de carbonatos y otros minerales que aportan alcalinidad). Las pruebas aplicadas a los residuos estudiados fueron la medida de pH en medio saturado, la relación ácido-base (test ABA) y el ensayo de generación neta de ácido (NAG).

El pH se midió en una pasta preparada con 10 g de muestra y 5 ml de agua bidestilada, utilizando un electrodo del Multi-Analizador de laboratorio marca Lutron modelo WA-2015 (Pope et al., 2010). Este valor indica si la muestra contiene acidez o alcalinidad fácilmente disponibles. Una pasta con pH por encima de 7 sugiere la presencia de carbonato reactivo, mientras que una pasta con pH por debajo de 5 sugiere que el material contiene acidez.

La prueba estática más común es la de cuantificación de la relación ácido-base (ABA, Ferguson y Erickson, 1988), que se basa en la determinación de tres componentes principales: 1) producción de ácido; 2) consumo de ácido; y 3) cálculo de la producción o el consumo neto de ácido usando 1) y 2) (Lottermoser, 2010).

La prueba ABA implica la determinación del potencial de producción de ácido y la capacidad de neutralización de una muestra (Figura 13). Una forma común de expresar el resultado es calcular el potencial neto de producción de ácido (NAPP) mediante la simple resta de los dos valores determinados químicamente (Hughes et al., 2007):

$$\text{NAPP} = \text{MPA} - \text{ANC} \quad (2)$$

Donde MPA es la acidez potencial máxima y ANC es la capacidad de neutralización de la acidez. Si $\text{MPA} > \text{ANC}$, el valor resultante para NAPP será positivo, lo que indica que la muestra generará ácido; por el contrario, si $\text{MPA} < \text{ANC}$, el NAPP será negativo, lo que sugiere que la muestra tendría alguna capacidad de neutralización de la acidez.

El MPA corresponde a la cantidad máxima de H_2SO_4 producido por los desechos mineros sulfurosos y se puede calcular directamente a partir del azufre total (expresado en % en peso) multiplicado por 31, 25 que es la cantidad de CaCO_3 (Kg t-1) necesario para neutralizar la acidez. Este cálculo deriva de suponer que el contenido de azufre medido se produce por la pirita (FeS_2) que reacciona bajo condiciones oxidantes para generar ácido, de acuerdo con la ecuación (3). A su vez, la reacción de la ecuación (4) relaciona la cantidad de H_2SO_4 producido en (3) con la masa de CaCO_3 requerida para neutralizar el ácido.



El uso del azufre total para determinar el MPA puede conducir a una sobreestimación de este valor, porque parte del azufre puede aparecer en formas distintas a la pirita. Algunos sulfatos, por ejemplo, no generan acidez, mientras que otros sulfuros metálicos (por ejemplo, calcopirita y arsenopirita) producen menos acidez que la pirita cuando se oxidan. En consecuencia, en los sistemas ricos en sulfato, el uso del valor de concentración correspondiente al contenido de azufre de los sulfuros es más adecuado para los cálculos de MPA, en lugar de S total (MEND, 1991).

El contenido de sulfuros fue determinado en el laboratorio del GIBIGEA con el Espectrofotómetro visible UV, aplicando el método descrito en el apartado análisis de composición química .

El ANC se determinó siguiendo la metodología descrita en MEND (1991) (ecuación (5)). Se añadió un volumen conocido de HCl 0,05 N a 2,0 g de muestra seca. La suspensión se calentó a casi punto de ebullición y luego se adiciona un volumen de agua desionizada para completar un volumen final de 125 ml. La suspensión obtenida se calentó durante 1 minuto y luego se enfrió a temperatura ambiente antes de titular con NaOH 0,48 N, hasta pH 7,0. El ANC informa como kg CaCO₃ t-1.

$$ANC = \frac{50 a \left[x - \left(\frac{b}{a} \right) y \right]}{c} \quad (5)$$

donde **a** es la normalidad del HCl, **b** es la normalidad del NaOH, **c** peso de la muestra seca (g), **x** es el volumen de HCl adicionado (ml), e **y** es el volumen de NaOH adicionado hasta pH 7 (ml).

La prueba de generación neta de ácido (NAG) evalúa directamente la generación de ácido sulfúrico mediante la oxidación acelerada de los sulfuros presentes en las muestras. Un pH final de NAG mayor o igual a 4,5 clasifica a la muestra como no acidificante. Un pH final de NAG menor a 4,5 indica que la oxidación de sulfuro genera un exceso de acidez y clasifica el material como de mayor riesgo (Schafer, 2000; Liao et al., 2007).

Para realizar la prueba NAG se añadieron 250 ml de H₂O₂ al 15% a 2,5 g de muestra finamente tamizada; la suspensión se colocó dentro de una campana de extracción por 24 h y luego se calentó hasta ebullición durante 1 h. Después de enfriar a temperatura ambiente, se registró el pH final (NAG pH).



Figura 13: Preparación de muestras para realizar pruebas ABA.

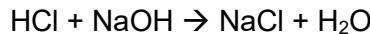
4.11. Determinación de Carbonatos

El contenido de carbonatos fue determinado siguiendo la metodología propuesta por la FAO (2021). El análisis se basó en una valoración por retroceso, mediante un ataque ácido con exceso de ácido clorhídrico (HCl). Durante la reacción, el dióxido de carbono (CO₂) generado fue liberado por ebullición. Posteriormente, el ácido no reaccionado (sobrenadante) fue valorado con una disolución de hidróxido de sodio (NaOH), utilizando fenolftaleína como indicador (Figura 14).

La reacción principal entre los carbonatos presentes en la muestra y el ácido clorhídrico se puede representar de la siguiente manera (para el caso de carbonatos de calcio, CaCO_3).



El ácido no neutralizado fue posteriormente valorado con NaOH, según la siguiente reacción:



1. Preparación de la muestra: Se pesó 5 gr de muestras previamente tamizada. La muestra se transfirió a un matraz Erlenmeyer, asegurando que esté limpio y seco para evitar contaminaciones.

2. Adición de reactivos: Al matraz que contiene la muestra se añadió 20 ml de HCl 1N y 50 ml de agua bidestilada. Esta mezcla aseguró la completa interacción entre los carbonatos presentes en la muestra y el HCl en exceso.

3. Expulsión del dióxido de carbono: El matraz se calentó suavemente sobre una placa calefactora, controlando la temperatura. Este calentamiento favorece la liberación de CO_2 , producto de la reacción entre los carbonatos y el HCl, esto se realizó durante tres minutos. Una vez terminada la reacción y expulsado todo el dióxido de carbono, el matraz se dejó enfriar a temperatura ambiente.

4. Valoración del exceso de ácido: Una vez enfriada la solución, se valoró el exceso de HCl con una disolución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.25N, utilizando fenolftaleína como indicador. La adición del NaOH se realizó gota a gota, mientras se agitó constantemente, hasta que la solución presentó un cambio de coloración al característico magenta, indicando el punto final de la valoración.

$$\% \text{ CaCO}_3 = \left(\frac{V_{\text{HCl}} N_{\text{HCl}} - V_{\text{NaOH}} N_{\text{NaOH}}}{\text{gramos de sedimento}} \right) \times 0.05 \times 100$$

Donde:

V_{HCl} = Volumen de ácido clorhídrico (ml).

N_{HCl} = Normalidad de ácido clorhídrico.

V_{NaOH} = Volumen de hidróxido de sodio (ml).

N_{NaOH} = Normalidad de hidróxido de sodio.

El coeficiente 0.05 correspondiente al equivalente en gramos de CaCO_3 que reacciona con 1 ml de HCl 1 N.

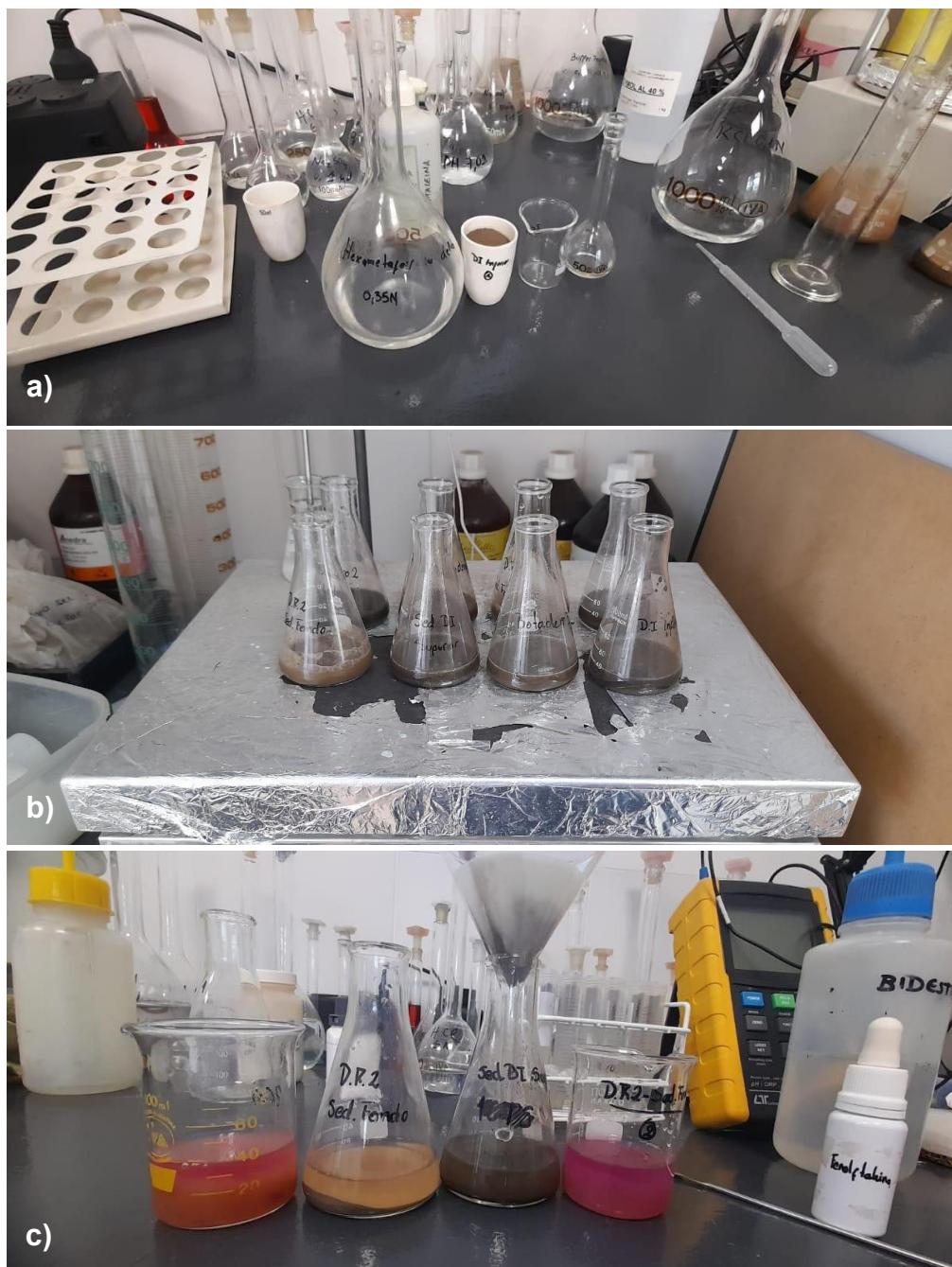


Figura 14: a) Preparación de soluciones, etiquetado y pesaje para tratamiento de muestras, b) Muestras tratadas colocadas en plancha calefactora para favorecer la reacción química previa a la titulación y c) Titulación de muestras con fenolftaleína en análisis de carbonatos.

4.12. Recopilación y Análisis de Información Hidroquímica

Los datos químicos vinculados con la calidad del agua (pH, conductividad eléctrica y contenido elemental) fueron suministrados por el Departamento de Geoquímica Ambiental (DiPGAM) del Ministerio de Minería de la provincia, el cual realizó los análisis bajo estándares de calidad certificados según la norma ISO 9001.

Desde el año 2002, la Unidad de Gestión Ambiental Provincial (UGAP) efectúa monitoreos semestrales de la calidad del agua en la cuenca hidrográfica que actúa como afluente del río Hualfín. Esta se caracteriza principalmente por la presencia de arroyos de régimen

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE RESIDUOS MINEROS DE FARALLÓN NEGRO

esporádico, con excepción de algunas vertientes naturales permanentes ubicadas en la zona conocida como Agua de Dionisio, a 5,6 km al oeste del campamento central de Farallón Negro (Figura 15).

Las determinaciones que se llevaron a cabo son:

- pH
- Conductividad Eléctrica
- Temperatura del Agua
- Toma de muestras para su posterior análisis químico en laboratorios especializados nacionales

Tabla 4: Puntos de muestreo de las aguas en el área de influencia minera.

Punto de muestreo	Ubicación	Coordenadas	
		Y	X
FN – 1	Dique de Colas “El Rulito”	3430531,3992	6983081,0086
FN – 2	Vertiente del Águila	3428470,0039	6983786,4966
FN – 3	Vertiente Aguas de Dionisio	3428343,0355	6983862,7184
FN – 4	Confluencia Vertientes Agua de Dionisio – Del Águila	3428211,939	6983701,809
FN – 5	Confluencia A° Seco con Río Los Nacimientos (El Eje)	3414048,1848	6983811,742

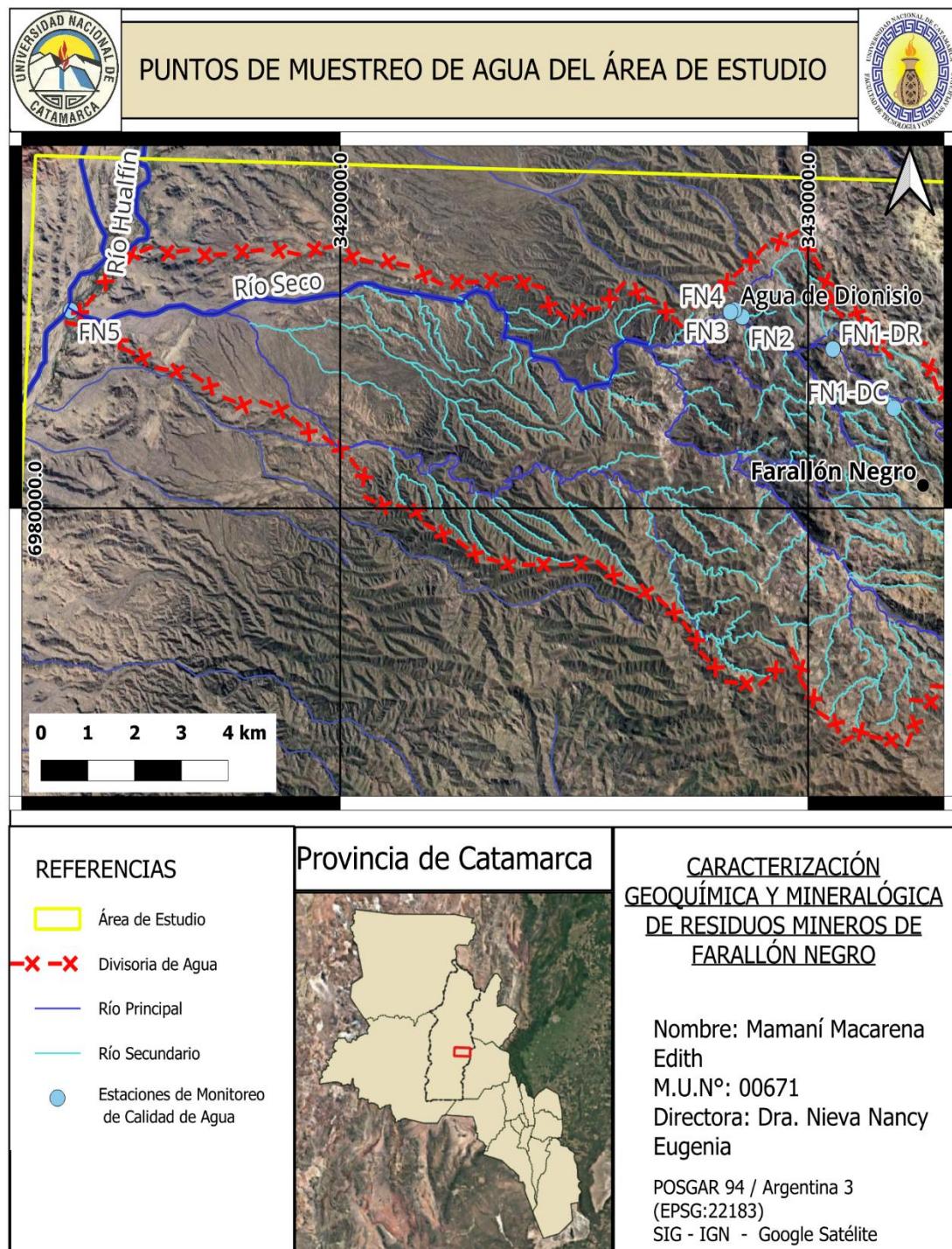


Figura 15: Puntos de monitoreo de calidad de agua del área de influencia minera.

4.12.1. Validación de Información

La información suministrada por el Ministerio de Minería fue sometida a un proceso de validación mediante la aplicación del método de balance iónico. Este procedimiento consistió en verificar los resultados de laboratorio a través del cálculo del balance entre aniones y cationes, empleando la fórmula del porcentaje de error de balance iónico propuesta por Appelo y Postma (2005). Dicho enfoque constituye una herramienta confiable para evaluar la consistencia interna de los análisis químicos, dado que, en una solución eléctricamente neutra, la suma de las cargas positivas (provenientes de los cationes) debe ser equivalente a

la suma de las cargas negativas (aportadas por los aniones). Para este estudio, se estableció como criterio de aceptación un error de balance inferior a 5%, valor ampliamente reconocido en la literatura especializada como un umbral adecuado para garantizar la calidad de los datos.

Si bien la fórmula puede aplicarse a todos los iones determinados, en la práctica se consideran principalmente los iones mayoritarios y, en algunos casos, los minoritarios que presentan concentraciones relativamente elevadas. Este criterio responde a que la precisión del cálculo mejora con la presencia de una mayor cantidad de sales disueltas, lo cual permite reducir la incertidumbre asociada a los errores analíticos. En este sentido, la interpretación del porcentaje de error no solo proporciona un indicador de la confiabilidad de los resultados, sino que también constituye un paso fundamental en la validación de las bases de datos hidroquímicas utilizadas en estudios ambientales y de gestión de recursos hídricos.

Fórmula de balance iónico utilizada:

$$\text{Error (\%)} = (\Sigma \text{caciones} - \Sigma \text{aniones}) / (\Sigma \text{caciones} + \Sigma \text{aniones}) \times 100$$

La fórmula de balance fue aplicada a los resultados de los análisis de laboratorio mediante carga manual de los datos en planillas de elaboración propia, utilizando la herramienta Microsoft Excel para los cálculos (Anexo 1 – Tablas 13 a 16).

4.12.2. Procesamiento e Interpretación de la Información

Las muestras que cumplieron con el criterio de aceptación establecido por el porcentaje de error del balance iónico fueron sistematizadas en una planilla de cálculo en Microsoft Excel, donde los resultados se expresaron en mg/L. Posteriormente, estos datos fueron procesados con el software *Diagrammes*, , herramienta que permite transformar las concentraciones de los principales analitos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y alcalinidad) a unidades de meq/L, facilitando así la comparación y análisis de la composición iónica de las aguas.

La caracterización hidroquímica se llevó a cabo organizando las muestras de acuerdo con la estación de monitoreo correspondiente, lo que permitió evaluar la variación temporal de la composición química a lo largo de los distintos períodos de muestreo considerados. Este enfoque posibilitó identificar tendencias y cambios en la calidad del agua vinculados tanto a factores naturales como a posibles influencias antrópicas.

Para la representación gráfica y posterior interpretación de los resultados, se recurrió a diferentes diagramas hidroquímicos. Entre ellos, se empleó el **diagrama de Stiff**, propuesto por Stiff (1951), el cual permite visualizar la composición iónica de cada muestra a través de un polígono simétrico dispuesto a ambos lados de un eje central. En la parte izquierda se grafican los cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}), mientras que en la derecha se representan los aniones (Cl^- , SO_4^{2-} y $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$). El tamaño global del polígono refleja el contenido total de sólidos disueltos, mientras que los vértices más destacados señalan los iones dominantes de la muestra (Figura 16). Este diagrama resultó particularmente útil para establecer

comparaciones entre diferentes muestras y reconocer similitudes o contrastes en su composición hidroquímica.

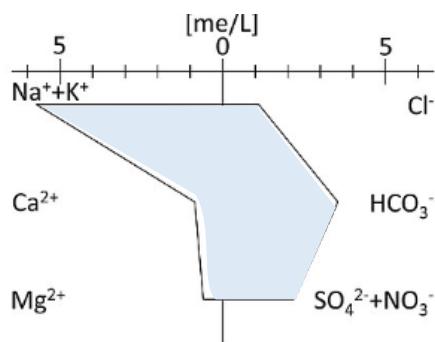


Figura 16: Diagrama tipo Stiff que representa la composición iónica de la muestra en meq/L. La forma del polígono permite identificar el tipo hidroquímico predominante.

Diagrama de Piper: Este diagrama integra dos triángulos equiláteros (uno destinado a los cationes y otro a los aniones) y un rombo central que combina la información de ambos, permitiendo definir el tipo hidroquímico del agua. En cada triángulo, los vértices corresponden a iones específicos, y los resultados se expresan en porcentajes equivalentes de miliequivalentes por litro. La proyección en el rombo posibilita la clasificación de las aguas según su facies hidroquímica, lo que favorece una interpretación global y comparativa de su composición iónica (Figura 17). Esta herramienta fue utilizada para analizar las similitudes y diferencias entre muestras de distintos puntos de monitoreo, así como para identificar posibles patrones y tendencias hidroquímicas dentro de la cuenca.

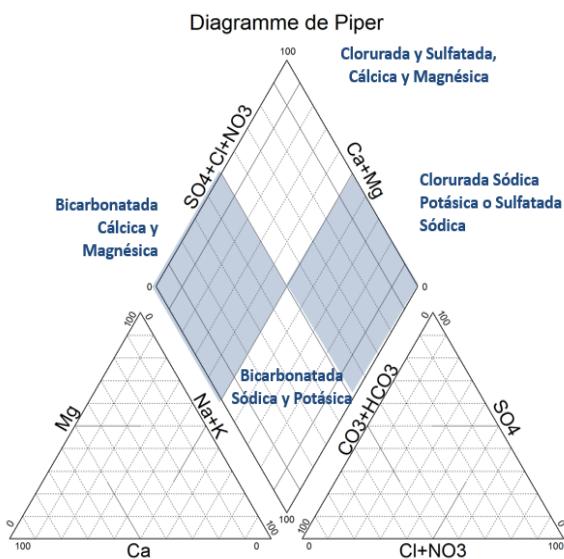


Figura 17: Diagrama Piper, (Piper, 1944).

4.13. Preparación del Informe Técnico-Científico

La elaboración del informe final se llevó a cabo integrando de manera coherente todos los componentes desarrollados a lo largo del trabajo. Para ello, los contenidos fueron organizados en capítulos temáticos, siguiendo una estructura lógica que facilitara la lectura y comprensión del documento. En el texto se incorporaron los antecedentes geológicos y ambientales más relevantes, así como una caracterización detallada del área de estudio, con énfasis en los aspectos físicos, químicos y antrópicos que condicionan su dinámica.

Se describieron de manera sistemática las metodologías aplicadas en gabinete, campo y laboratorio, destacando los procedimientos técnicos y los criterios de calidad empleados en cada etapa. Los resultados obtenidos fueron presentados y analizados mediante gráficos, tablas comparativas y cartografía temática elaborada con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo cual permitió una interpretación visual y espacial más clara y precisa.

Finalmente, los resultados fueron discutidos a la luz de enfoques geológicos y geoquímicos. Este enfoque integrador permitió no solo validar los hallazgos obtenidos, sino también contextualizarlos con relación a la gestión sostenible de los recursos naturales.



Capítulo 5

Resultados

5. Resultados

En esta sección se exponen de manera ordenada y sistemática los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, con el fin de proporcionar evidencia objetiva que respalde los análisis y conclusiones posteriores. Los datos se presentan siguiendo los criterios metodológicos descritos en capítulos anteriores, organizados por temáticas o variables de estudio para facilitar su interpretación. Se incluyen tablas y gráficos, cuando corresponda, con el fin de visualizar patrones, tendencias y relaciones relevantes dentro del área de estudio. Además, los resultados se comparan con referencias teóricas y valores reportados en la literatura científica, permitiendo contextualizar los hallazgos y evaluar su significancia en relación con los objetivos planteados.

5.1. Clasificación Textural

Los resultados del análisis granulométrico realizado en los distintos sectores de botaderos y diques de cola del área de estudio evidencian una notable variabilidad en la proporción de fracciones granulométricas (arena, limo y arcilla), lo cual permite identificar diferentes clases texturales asociadas a los residuos mineros evaluados.

En el **Botadero 1**, correspondiente a residuos relativamente recientes, se determinó un contenido de 69,2% de arena, 11,2 % de limo y 19,6 % de arcilla, clasificando su textura como **Franco Arenoso**. Por su parte, el **Botadero 2**, compuesto mayoritariamente por lodo, presentó una distribución de 39,4 % de arena, 32,2% de limo y 28,4% de arcilla, con una textura correspondiente a **Franco Arcilloso**. En el **Botadero 3**, se observó un predominio de la fracción arenosa 67,2 %, seguido por 12,4 % de limo y 20,4% de arcilla, lo que permitió clasificar su textura como **Franco Arcillo Arenoso a Franco Arenoso**.

En relación con los materiales del dique de cola conocido como **Rulito 1**, el **sedimento seco** arrojó una composición de 59,2 % de arena, 24,4 % de limo y 16,4% de arcilla, con una textura **Franco Arenoso**, mientras que el **sedimento saturado del dique Rulito 2** mostró una distribución de 40,01 % de arena, un contenido elevado de limo 50,19 % y 9,80 % de arcilla, clasificándose como **Franco Limoso**. En el dique intermedio, el **nivel superior** presentó una textura **Franco Arcillo Arenoso**, con 59,4 % de arena, 17 % de limo y 23,6% de arcilla, en tanto que el **nivel inferior** exhibió una proporción de 34 % de arena, 38,6% de limo y 27,4 % de arcilla, correspondiente a una textura **Franca**. Finalmente, en el **Botadero Antiguo**, se identificó una mayor proporción de arcilla 39,8 %, acompañada de 36,8 % de arena y 23,4 % de limo, lo que permite clasificar su textura como **Franco Arcilloso**. A continuación, en la (Tabla 5) y en la (Figura 18) se presentan los resultados obtenidos para cada sitio (ver cálculos en el Anexo 2).

Tabla 5: Distribución Granulométrica y clasificación textural de las muestras.

Muestra	% Arena	% Arcilla	% Limo	Clase Textural
Bot. 1 Res.	69,2 %	19,6 %	11,2 %	Franco Arenoso
Bot. 2 Lod.	39,4%	28,4%	32,2%	Franco Arcilloso
Bot. 3.	67,2%	20,4%	12,4%	Franco Arcillo Arenoso a Franco Arenoso
D.R.1 Sed.	59,2%	16,4%	24,4%	Franco Arenoso
D.R.2 Sed.	40,01%	9,80%	50,19%	Franco Limoso
DI Sup.	59,4	23,6%	17%	Franco Arcillo Arenoso
DI Inf.	34%	27,4%	38,6%	Franco
Bot. Antiguo.	36,8%	39,8%	23,4%	Franco Arcilloso

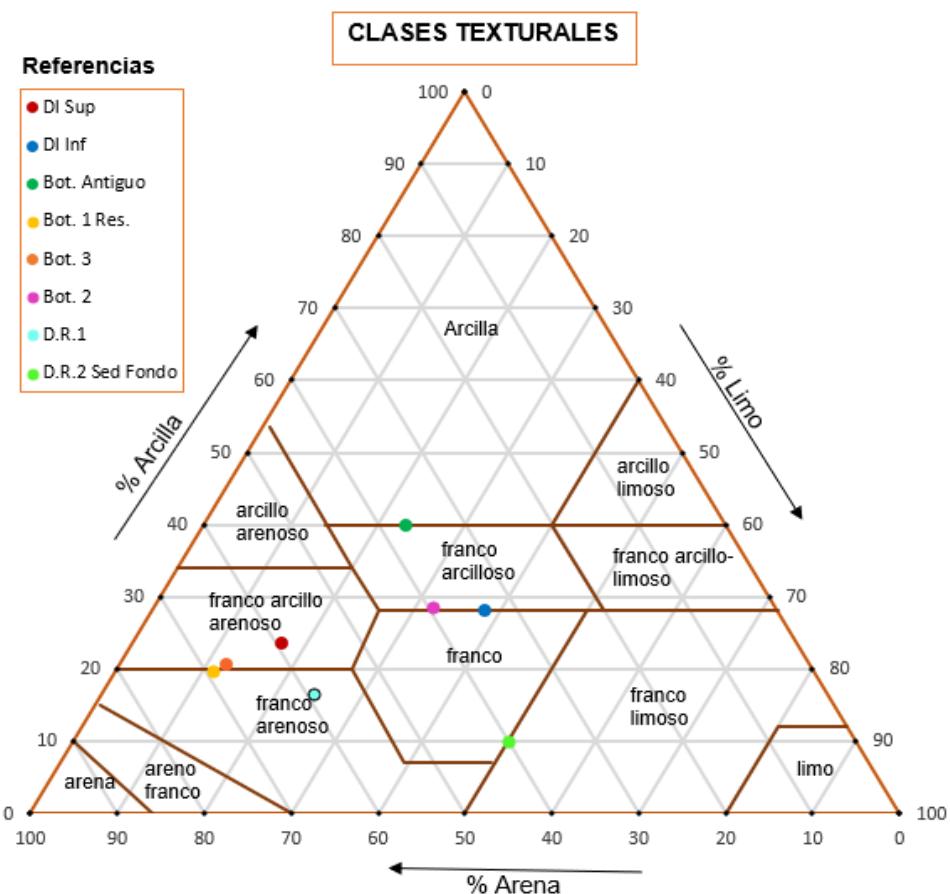


Figura 18: Diagrama triangular que representa las Clases texturales según porcentaje de arena, limo y arcilla – Triángulo del USDA para la clasificación de suelos.

5.2. Densidad Real

La determinación de la densidad real permite conocer la masa por unidad de volumen de las partículas sólidas que componen un sedimento, excluyendo poros y espacios vacíos. Este parámetro es clave para caracterizar la composición mineralógica y evaluar el comportamiento

físico de materiales en ambientes impactados por la actividad minera, como botaderos y diques de cola.

Los valores de densidad real obtenidos en las distintas muestras analizadas oscilaron entre 1,86 y 3,14 g/cm³, permitiendo clasificarlos en tres rangos distintos (Figura 19).

En el grupo de mayor densidad real (>2,60 g/cm³), se encuentran las muestras correspondientes al Dique Intermedio Superior, con un valor de 3,14 g/cm³, y al Botadero 1 (Residuos), con 2,68 g/cm³.

Las muestras con densidad real intermedia, entre 2,18 y 2,39 g/cm³, incluyen al Botadero 2 (Lodo), con 2,18 g/cm³; el Botadero 3, con 2,20 g/cm³; el Dique de Rulito 1, con 2,19 g/cm³; y el Dique Intermedio Inferior, con 2,39 g/cm³.

Finalmente, el grupo con menor densidad real (<2,00 g/cm³) está representado por las muestras del Dique de Rulito 2, con 1,90 g/cm³, y del Botadero Antiguo, con 1,86 g/cm³.

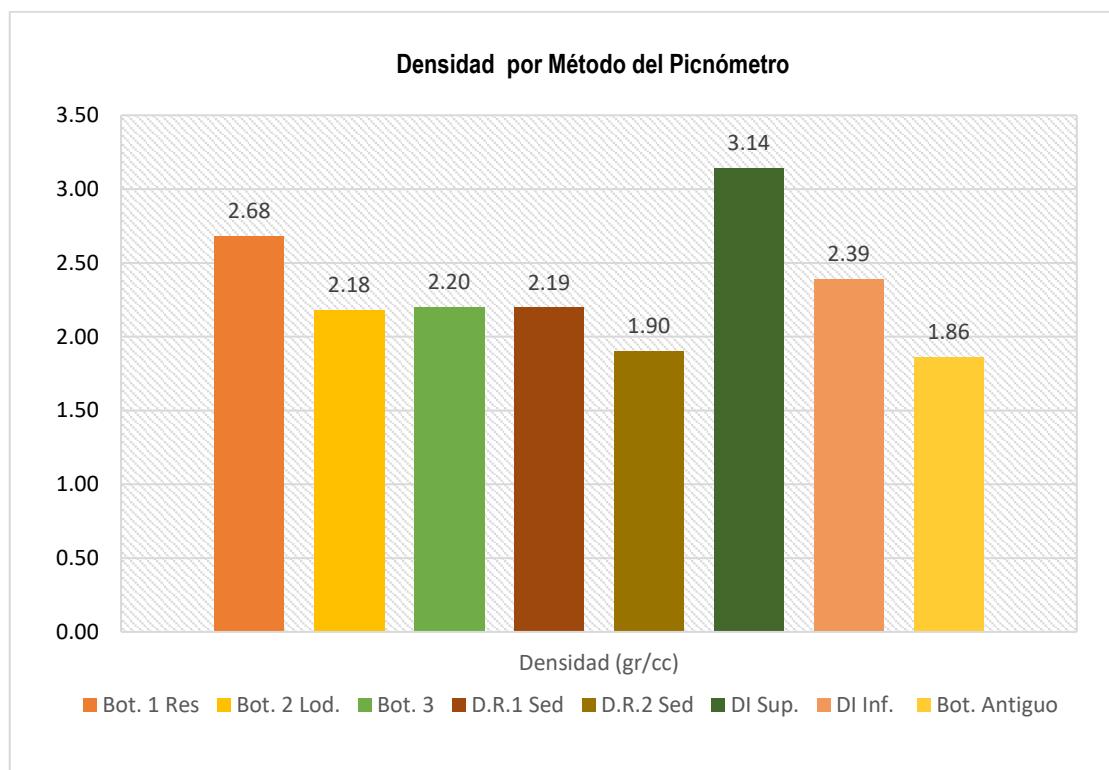


Figura 19: Gráfico de barras que presenta los valores de densidad real (gr/cc) obtenidos mediante el método del picnómetro para las muestras de botaderos y diques de colas del área de estudio.

5.3. Carbonatos

La determinación del contenido de carbonatos en residuos mineros constituye un indicador clave para evaluar la capacidad de los materiales para neutralizar procesos de acidificación, como el drenaje ácido de mina (DAM). Los carbonatos, especialmente los de calcio y magnesio, actúan como agentes tamponadores que pueden reducir la liberación de metales tóxicos al medio ambiente, disminuyendo así el impacto ambiental asociado a pasivos mineros. Por este motivo, su cuantificación resulta esencial en el diagnóstico geoquímico de

botaderos y diques de cola. Los resultados obtenidos en las muestras analizadas se detallan en la Figura 20.

El dique de Rulito 1 (sedimento saturado) presentó el contenido más bajo de carbonatos, con un valor de 49,08 %. Le siguió el Dique de Rulito 2 (sedimento seco), con un valor apenas superior de 49,20 %, aunque ambos se mantienen dentro del rango más bajo registrado. En el dique Intermedio, tanto el nivel inferior como el nivel superior mostraron contenidos medios de carbonatos, con valores de 49,78 % y 49,70 %, respectivamente.

Los Botaderos 2 y 3 presentaron concentraciones similares, de 49,73 % y 49,75 %, mientras que el Botadero Antiguo registró un valor ligeramente menor, de 49,45 %. Finalmente, el Botadero 1 alcanzó el tenor más alto de carbonatos entre todas las muestras analizadas, con un ≈ 50 %.

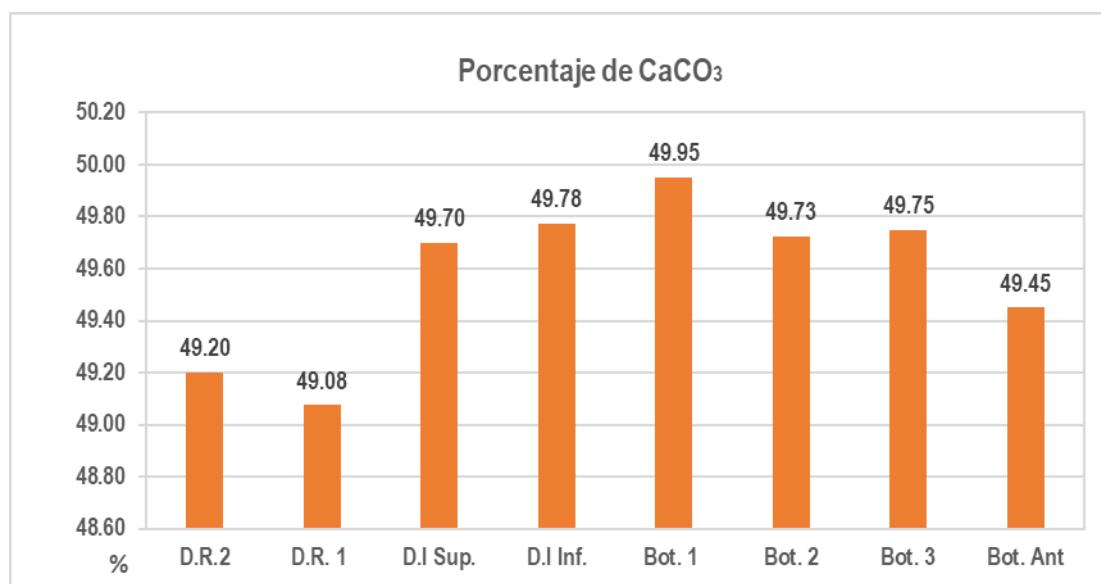


Figura 20: Gráfico de barra que evidencia el contenido de carbonatos de las muestras de residuos.

5.4. Caracterización Mineralógica

La mineralogía de los sedimentos de los botaderos y diques de cola reportados en (Tabla 6) corresponde a las fases cristalinas identificadas por DRX (Figura 21). La caracterización reveló una composición variada, con predominancia de minerales silicatados, carbonatados y arcillosos, junto con fases metálicas menores.

En el Botadero 1, se identificó una predominancia de cuarzo (44%), seguido por una cantidad significativa de calcita (30%). A esto se sumó la presencia de caolinita (10%) y, una proporción importante de óxidos, tales como magnetita (13%) y rutilo (4%). En cuanto al Botadero 2, el mineral más abundante también fue el cuarzo (54%), acompañado por calcita (27%), albita (9%), caolinita (8%) y una proporción menor de pirolusita (2%).

Por su parte, el Botadero 3 presentó una composición mineralógica dominada por calcita (37%), seguida por illita (25%), cuarzo (24%), y en proporciones menores, yeso (13%) y vermiculita (2%). En el caso del Botadero Antiguo, se evidenció un marcado predominio de minerales arcillosos, con una alta concentración de illita (60%) y caolinita (21%). El cuarzo

representó un 13%, mientras que la vermiculita alcanzó un 5%, y tanto la goethita como la ferrihidrita estuvieron presentes en proporciones marginales, con un 1% cada una.

En relación con los diques de colas, el Dique Intermedio mostró diferencias entre sus niveles. En el nivel inferior, la illita fue el mineral dominante con un 60%, seguida por cuarzo (24%), calcita (8%), y en igual proporción del 2% se identificaron caolinita, dolomita, yeso y anglesita. Por otro lado, en el nivel superior, el contenido de cuarzo se incrementó notablemente al 76%, mientras que la calcita alcanzó un 14% y la caolinita un 3%. Una característica importante en este nivel fue la identificación de sulfuros tales como calcopirita (4%), pirrotina (2%) y pirita (1%).

Finalmente, en el Dique de Rulito 1, se analizaron dos tipos de sedimentos (seco y saturado). En la muestra seca, los minerales primarios predominantes fueron moscovita (45%), cuarzo (24%), albita (16%) y magnetita (3%), a los que se sumó como mineral secundario la montmorillonita (2%). En muestra saturada, la composición primaria fue similar, con moscovita (45%), cuarzo (19%), albita (15%) y calcita (4%). Asimismo, se reconoció una asociación de arcillas secundarias, compuesta por illita (13%), caolinita (3%) y montmorillonita (2%).

Tabla 6: Distribución porcentual de fases minerales identificadas mediante análisis por Difracción de Rayos X (DRX) en muestras de botaderos.

Fases Minerales	Porcentaje por Muestras			
	Bot. 1	Bot. 2	Bot. 3	Bot. Ant
Albita $(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8)$	---	9%	---	---
Anglesita PbSO_4	---	---	---	---
Calcita (CaCO_3)	30%	27%	37%	---
Calcopirita CuFeS_2	---	---	---	---
Caolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	10%	8%		21%
Cuarzo (SiO_2)	44%	54%	24%	13%
Dolomita $(\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$	---	---	---	---
Goethita $(\text{FeO} (\text{OH})$	---	---	---	1%
Illita $(\text{K, H}_3\text{O}) (\text{Al, Mg, Fe})_2(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})$	---	---	25%	60%
Magnetita Fe_3O_4	13%	---	---	---
Montmorillonita $(\text{Na, Ca}) (\text{Al, Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10}) (\text{OH})_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$	---	---	---	---
Muscovita $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}) (\text{OH})_2$	---	---	---	---
Pirita FeS_2	---	---	---	---
Pirolusita MnO_2	---	2%	---	---
Pirrotina (Fe_7S_8)	---	---	---	---
Rutilo (TiO_2)	3%	---	---	---
Vermiculita $(\text{Mg, Fe, Al})_3 (\text{Al, Si})_4\text{O}_{10} (\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	---	---	2%	6%
Yeso $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$	---	---	13%	---

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALOGICA DE RESIDUOS MINEROS DE FARALLÓN NEGRO

Tabla 7: Distribución porcentual de fases minerales identificadas mediante análisis por Difracción de Rayos X (DRX) en muestras de botaderos.

Fases Minerales	Porcentaje por Muestras			
	D.R.1	D.R.2	DI Sup.	DI Inf.
Albita (NaAlSi ₃ O ₈)	16%	15%	---	---
Anglesita PbSO ₄	---	---	---	2%
Calcita (CaCO ₃)	---	4%	14%	8%
Calcopirita CuFeS ₂	---	---	4%	---
Caolinita Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄		3%	3%	2%
Cuarzo (SiO ₂)	24%	19%	76%	24%
Dolomita (Ca Mg (CO ₃) ₂)	---	---	---	2%
Goethita (FeO (OH))	---	---	---	---
Illita (K, H ₃ O) (Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ (H ₂ O)]	---	13%	---	60%
Magnetita Fe ₃ O ₄	3%	---	---	---
Montmorillonita (Na, Ca) (Al, Mg) ₂ (Si ₄ O ₁₀) (OH) ₂ -nH ₂ O	2%	2%	---	---
Muscovita KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀) (OH) ₂	45%	45%	---	---
Pirita FeS ₂	---	---	1%	---
Pirolusita MnO ₂	---	---	---	---
Pirrotina (Fe ₇ S ₈)	---	---	2%	---
Rutilo (TiO ₂)	---	---	---	---
Vermiculita (Mg, Fe, Al) ₃ (Al, Si) ₄ O ₁₀ (OH)·4H ₂ O	---	---	---	---
Yeso (CaSO ₄ · 2H ₂ O)	---	---	---	2%

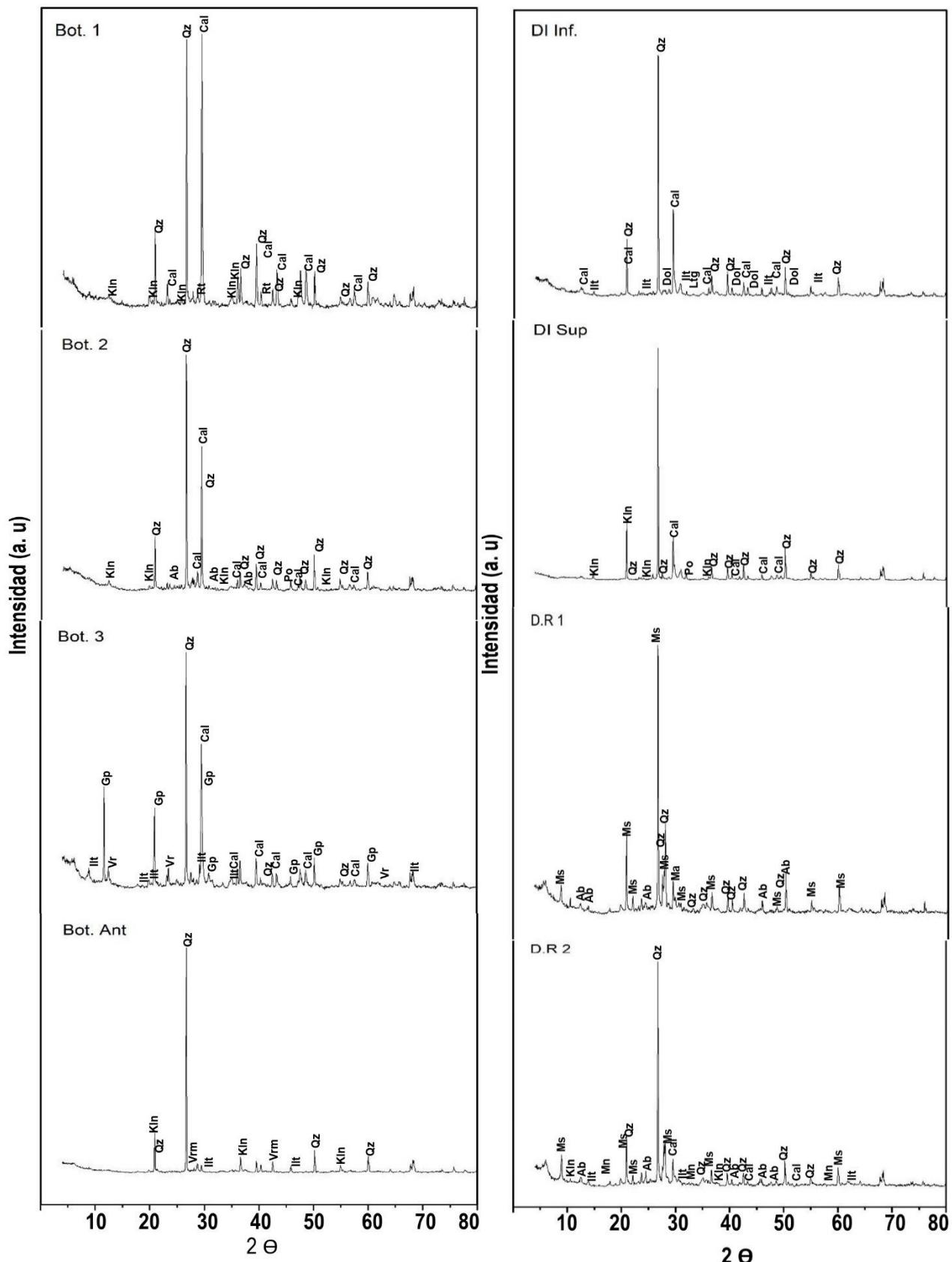


Figura 21: Difractogramas de rayos X de los sedimentos que conforman los botaderos y diques de cola del Yacimiento Minero Farallón Negro. Albita (Ab), Anglesita (Ang), Calcita (Cal), Calcopirita (Ccp), Caolinita (Kln), Cuarzo (Qz), Dolomita (Dol), Goethita (Gth), Illita (Ilt), Magnetita (Mag), Montmorillonita (Mnt), Muscovita (Ms), Pирita (Py), Pirolusita (Pyr), Pirrotina (Po), Rutilo (Rt), Vermiculita (Vrm), Yeso (Gp).

5.5. Composición Química:

La composición química de los sedimentos analizados en los botaderos y diques de cola evidencian concentraciones variables de metales pesados y elementos traza (Figura 22 y 23). Para la representación en los gráficos de barra se adoptó un criterio basado en su comportamiento geoquímico y origen mineralógico, con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados y la comparación entre sectores o campañas de muestreo. Los elementos se agruparon en función de su asociación con fases minerales específicas, su movilidad en el medio acuoso y su relevancia ambiental, conforme a la siguiente clasificación:

Metales asociados a minerales sulfurados (Fe, Cu, Zn, Pb): reflejan procesos de oxidación de sulfuros y posibles aportes de drenaje ácido de mina o meteorización natural.

Metales de alta movilidad en condiciones oxidantes o ácidas (Mn, Ni, Co): representan elementos liberados por la disolución de óxidos e hidróxidos metálicos y por la alteración de minerales secundarios.

Metales potencialmente tóxicos o de interés ambiental (As, Cd, Cr): seleccionados por su importancia en la evaluación de la calidad ambiental y en el monitoreo de contaminación.

En el Botadero 1, se registraron 257,1 ppm de hierro (Fe), 9,02 ppm de zinc (Zn), 435,5 ppm de manganeso (Mn), 0,764 ppm de cobre (Cu) y 3,486 ppm de plomo (Pb). En cuanto al Botadero 2, se observó un aumento en las concentraciones, destacándose 382,2 ppm de Fe, 16,62 ppm de Zn, 963,2 ppm de Mn, 1,754 ppm de Cu y 5,688 ppm de Pb. El Botadero 3 presentó 338,2 ppm de Fe, 24,72 ppm de Zn, 508,8 ppm de Mn, 1,199 ppm de Cu y 10,08 ppm de Pb, lo cual indica una mayor concentración de zinc y plomo respecto a los botaderos anteriores. En el caso del Botadero Antiguo, los valores más destacados fueron 645,3 ppm de Fe, 14,13 ppm de Zn, 891,8 ppm de Mn, 1,061 ppm de Cu y 8,697 ppm de Pb, con un valor adicional de 100 ppm de arsénico (As), el único caso donde se midió este metaloide.

Respecto a los diques de colas, el Intermedio, en su nivel superior, mostró 174,9 ppm de Fe, 17,64 ppm de Zn, 653,9 ppm de Mn, 1,853 ppm de Cu y 6,326 ppm de Pb. Por otro lado, en su nivel inferior, los valores se incrementaron notablemente, alcanzando 776,1 ppm de Fe, 31,84 ppm de Zn, 744,2 ppm de Mn, 1,913 ppm de Cu y 6,945 ppm de Pb.

En el Dique Rulito 1, correspondiente al sedimento de fondo seco, se detectaron 653,1 ppm de Fe, 15,45 ppm de Zn, 233,1 ppm de Mn, 0,871 ppm de Cu y 4,535 ppm de Pb. En tanto que el Dique Rulito 2, con sedimento saturado, presentó concentraciones más bajas de la mayoría de los elementos, con 312,2 ppm de Fe, 8,89 ppm de Zn, 140,2 ppm de Mn, 0,848 ppm de Cu y 4,75 ppm de Pb.

Asimismo, se presentan los resultados de la composición química de los sedimentos que conforman algunos de los botaderos y diques de cola (Figura 24 y 25). Estos datos fueron proporcionados por la empresa minera y se obtuvieron mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), una técnica analítica de alta precisión que permite determinar concentraciones elementales en el orden de partes por millón (ppm).

El Botadero 1 presentó concentraciones de molibdeno (Mo) de 2,54 ppm, zinc (Zn) de 841 ppm, cromo (Cr) de 7,05 ppm, cobre (Cu) de 41,5 ppm, plomo (Pb) de 419 ppm, arsénico (As) de 42,8 ppm y cadmio (Cd) de 1,49 ppm. En el caso del Botadero 2, se observaron valores

superiores de la mayoría de los elementos, con 3,17 ppm de Mo, 2240 ppm de Zn, 5,56 ppm de Cr, 58,3 ppm de Cu, 463 ppm de Pb, 126 ppm de As y 12,6 ppm de Cd.

En cuanto a los diques de cola, el Dique Intermedio - Nivel superior presentó 5,45 ppm de Mo, 517 ppm de Zn, 9,53 ppm de Cr, 52,1 ppm de Cu, 581 ppm de Pb, 752 ppm de As y 1,64 ppm de Cd. El Dique Intermedio - Nivel inferior mostró niveles ligeramente inferiores en general: 2,02 ppm de Mo, 543 ppm de Zn, 6,31 ppm de Cr, 6,31 ppm de Cu, 262 ppm de Pb, 209 ppm de As y 0,9 ppm de Cd.

Finalmente, el Dique Rulito 2 (sedimento del fondo saturado) registró 1,02 ppm de Mo, 806 ppm de Zn, 3,21 ppm de Cr, 28,7 ppm de Cu, 415 ppm de Pb, 115 ppm de As y 1,54 ppm de Cd.

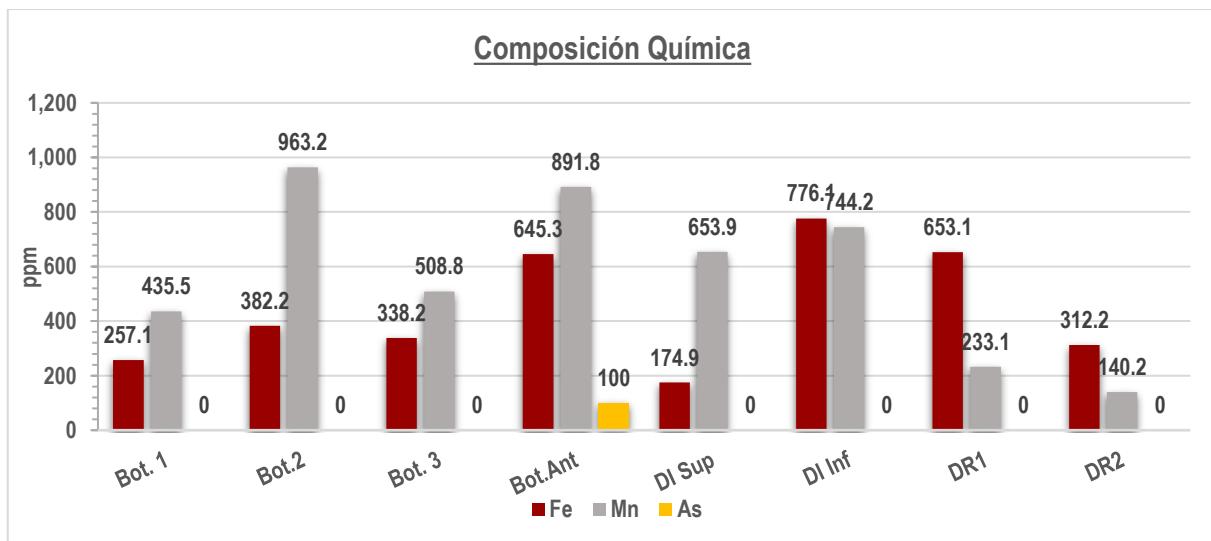


Figura 22: Gráfico de barra de la composición química de Fe, Mn y As, en los botaderos y diques de cola obtenidas a partir de AAS.

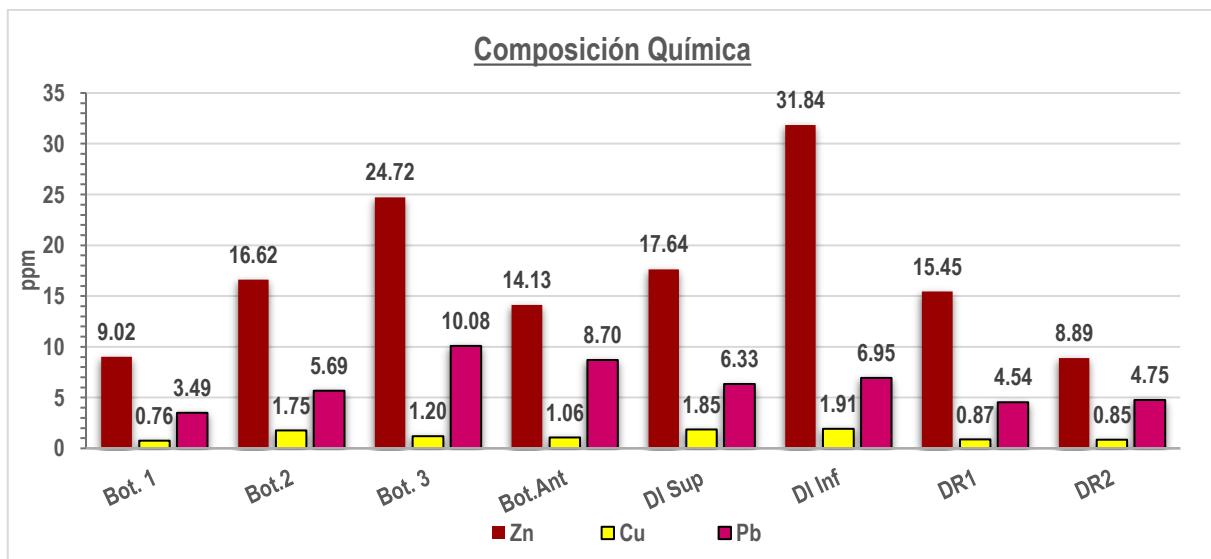


Figura 23: Gráfico de barra de la composición química de Zn, Cu y Pb, en los botaderos y diques de cola obtenidas a partir de AAS.

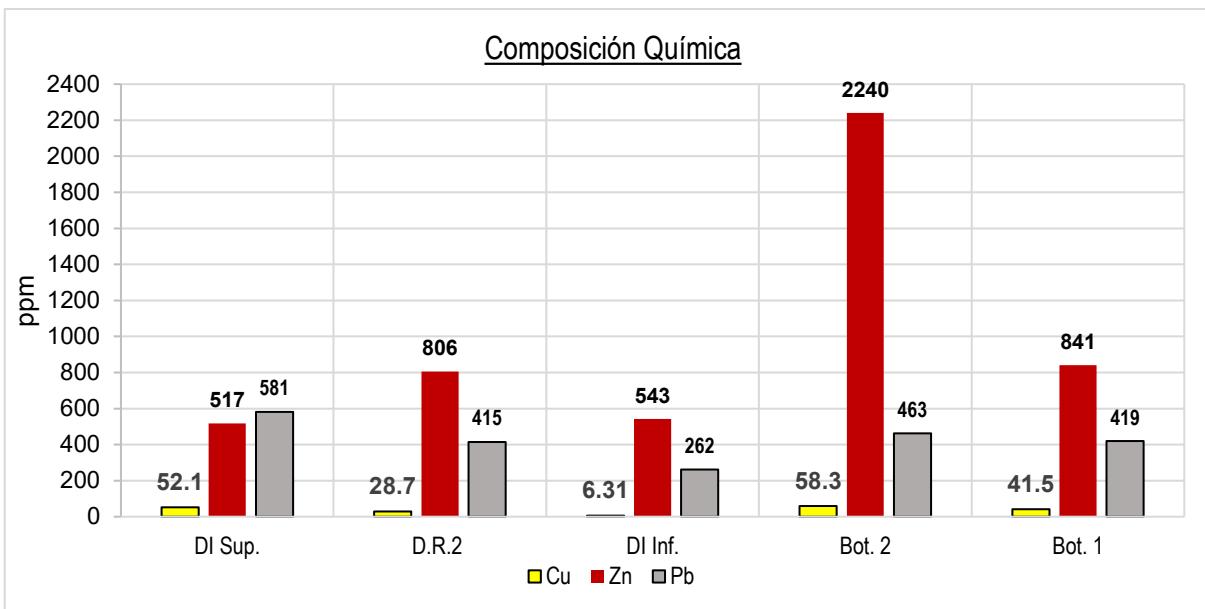


Figura 24: Gráfico de barras de la composición química de Pb, Zn y As, en los botaderos y diques obtenidas a partir de ICP.OES.

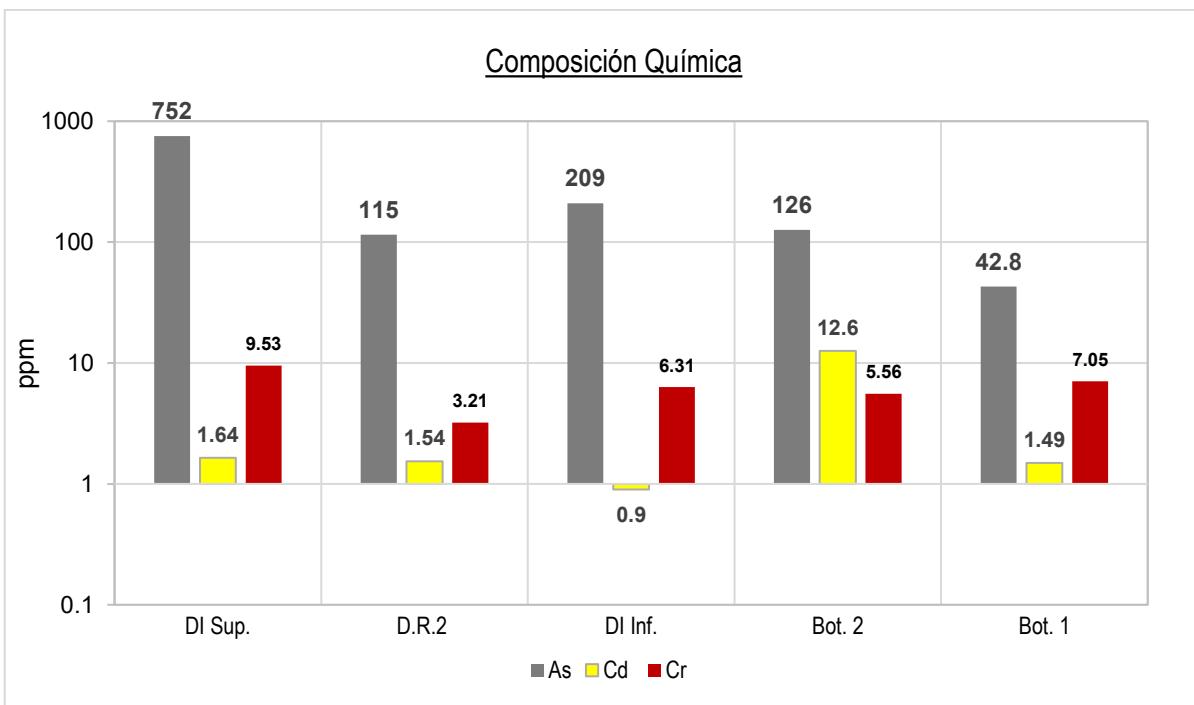


Figura 25: Gráfico de barra de la composición química de Mo, Cr, Cd y Cu, en los botaderos y diques de cola obtenidas a partir de ICP-OES.

5.6. Potencial Generador de Acidez:

Los resultados obtenidos de las pruebas estáticas pasta de pH, ABA (Acid-Base Accounting –relación Ácido-base) y NAG (Net Acid Generation – Generación Neta de Ácido) realizadas para determinar la acidez potencial generada por los desechos acumulados en los botaderos y diques de cola, se muestran en la Tabla 8.

El pH de la pasta osciló entre 7,7 y aproximadamente 9 en todas las muestras analizadas, lo que evidencia una alta capacidad de neutralización del sistema. Esta condición se debería, en parte, a la adición de cal (CaO), utilizada para mantener el pH del proceso en valores cercanos a 10–11, con el fin de evitar la volatilización del cianuro empleado en la etapa de extracción.

Los valores de MPA (Maximum Potential Acidity - Acidez Potencial Máxima) obtenidos muestran una variabilidad relativa entre las distintas muestras. Los botaderos 1 y 2 presentaron valores bajos, entre 0,53 y 1,54, respectivamente. En contraste, los Botaderos 3 y el Antiguo registraron cifras más elevadas, de 5,99 y 5,55. Por su parte, los Diques Rulito 1, Rulito 2 y el nivel inferior del dique Intermedio mostraron tenores medios, dentro de un rango estrecho de 2,00 a 3,04. El valor más alto se cuantificó en el nivel superior del dique Intermedio, con 7,78.

En todos los casos, los valores de ANC (Acid Neutralizing Capacity - Capacidad de Neutralización de la Acidez) fueron positivos, variando entre 55,95 y 419,81, lo que indica una elevada presencia de minerales con capacidad neutralizante, como la calcita, y un contenido muy bajo de sulfuros en los residuos. Esta capacidad neutralizante se refleja en los valores fuertemente negativos del NAPP (Net Acid Producing Potential - Potencial Neto de Producción de Ácido).

Según los criterios de clasificación comúnmente aceptados (p. ej., MEND, 2001; Price, 2009), los materiales con NAPP (Net Acid Producing Potential- Potencial de Producción Neto de Ácido) < -20 kg CaCO₃/t se consideran no generadores de drenaje ácido, debido a su alto potencial de neutralización. En este sentido, todas las muestras analizadas se clasifican como materiales no acidogénicos, lo que implica un riesgo bajo de generación de drenaje ácido en las condiciones actuales.

Los resultados de la prueba NAG (Net Acid Generation – Capacidad de Generación de Ácido) concuerdan con los obtenidos en los ensayos ABA (Ácid-Base Accounting). Los valores de pH registrados al finalizar el experimento (NAG pH final) fueron superiores a 4,5 en todas las muestras analizadas (Figura 26), manteniéndose relativamente constantes en un rango estrecho entre 7,20 y 7,60.

Tabla 8: Resultados del pH de la pasta y las pruebas ácido-base (ABA) y el pH NAG realizadas en las muestras de botaderos y diques de cola.

Muestras	pH Pasta	Test ABA				NAG
		% S	MPA (Kg CaCO ₃ /t)	ANC	NAPP	
Botaderos						
Bot. 1	8,96	0,017	0,53	419,806	-419,28	7,60
Bot. 2	8,4	0,049	1,54	287,800	-286,26	7,60
Bot. 3	7,74	0,191	5,99	347,318	-341,33	7,19
Bot. Ant	8,14	0,177	5,55	55,948	-50,40	7,44
Diques de Cola						
D.R.1	7,68	0,100	3,04	95,336	-92,30	7,19
D.R.2	7,91	0,0641	2,0	105,022	-103,02	7,17
DI Sup.	9,38	0,249	7,78	299,525	-291,75	7,27
DI Inf.	7,34	0,064	2,0	305,191	-303,20	7,40

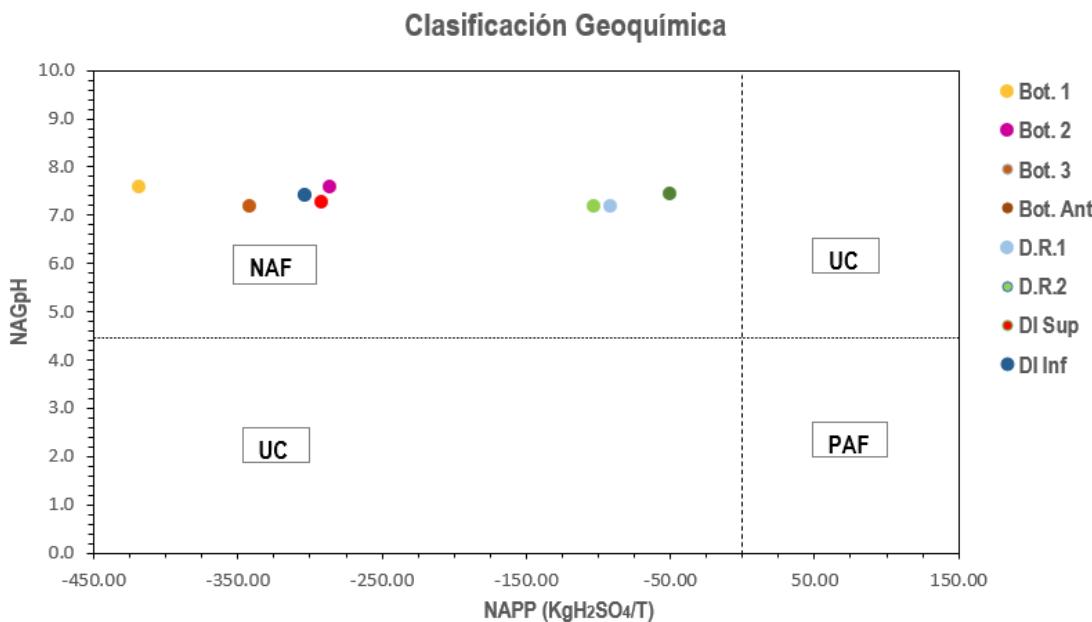


Figura 26: Diagrama de clasificación geoquímica de los residuos mineros en función de su potencial de producción neta de ácido (NAPP) y los valores de pH de NAG. NAF: no formador de ácido; FAP: formador potencial de ácido; UC: incierto.

5.7. Caracterización química del agua de la cuenca del Yacimiento Farallón Negro

Los resultados de la caracterización fisicoquímica y de la composición elemental de las aguas superficiales obtenidos en distintos sectores de la cuenca del yacimiento Farallón Negro, correspondientes a los años 2003 y 2017, tanto en períodos húmedos como secos, se presentan en las (Tablas 9 al 12). Estos años fueron seleccionados por contar con registros representativos de ambas estaciones y por cumplir con los criterios de calidad requeridos para la validación del balance iónico ($\pm 5\%$).

Durante la estación seca del año 2003, los valores de pH oscilaron entre 8,01 y 8,41, manteniéndose dentro de un rango característico de aguas ligeramente alcalinas. La conductividad eléctrica mostró una amplia variación, desde 1019 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta un máximo de 3020 $\mu\text{S}/\text{cm}$ registrado en el punto FN-1 (dique de colas El Rulito), lo que evidencia una elevada carga iónica en ese sector. En cuanto a la concentración de arsénico (As), se evidenciaron concentraciones por debajo del límite de detección en FN-1, mientras que en los demás sitios oscilaron entre 14 y 55 $\mu\text{g}/\text{L}$, alcanzando el valor más alto en FN-3, correspondiente a la vertiente termal Aguas de Dionisio. Las concentraciones de cobre (Cu) y plomo (Pb) se mantuvieron por debajo de los límites de detección en la mayoría de las muestras. No obstante, se detectaron niveles de Cu en FN-1 (53 $\mu\text{g}/\text{L}$), FN-4 (8 $\mu\text{g}/\text{L}$, confluencia de las vertientes Aguas de Dionisio y del Águila) y FN-5 (2 $\mu\text{g}/\text{L}$, confluencia del arroyo Seco con el río Los Nacimientos). En cuanto al zinc (Zn), sus concentraciones variaron entre 11 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-5 y 67 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-1. Por su parte, el hierro (Fe) presentó valores entre 13 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-4 y 137 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-5. El estroncio (Sr) mostró concentraciones elevadas en toda la cuenca, con valores comprendidos entre 151 $\mu\text{g}/\text{L}$ (FN-5) y 2358 $\mu\text{g}/\text{L}$ (FN-3). Finalmente, el manganeso (Mn) evidenció una alta variabilidad espacial, con concentraciones que oscilaron entre 35 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-5 y 1669 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-1, sugiriendo condiciones geoquímicas locales favorables para su movilización en determinados sectores.

Durante la estación húmeda del año 2003, los valores de pH se mantuvieron relativamente estables en comparación con la estación seca, con un rango que varió entre 8,15 y 8,44, confirmando condiciones ligeramente alcalinas a lo largo de la cuenca. Las conductividades eléctricas oscilaron entre 1241 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (FN-5) y 2450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (FN-4); sin embargo, es importante señalar que no se dispone de registros para el punto FN-1 en este período. En cuanto a los metales disueltos, las concentraciones de Cu, Pb y Fe se mantuvieron por debajo del límite de cuantificación en la mayoría de las muestras, con la excepción de Fe en FN-5, donde se determinó un valor de 40 $\mu\text{g}/\text{L}$. Las concentraciones de As fluctuaron entre 22 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-2 y 62 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-4, superando a las registradas durante la estación seca, lo que podría indicar una movilización más activa del metaloide bajo condiciones hidrológicas caracterizadas por una mayor escorrentía. Un comportamiento similar se observó en el caso del Sr, cuyas concentraciones variaron entre 195 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-5 y 2682 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-4, manteniéndose como uno de los elementos mayoritarios en solución. Por último, el Mn presentó valores significativamente más atenuados respecto al período seco, con concentraciones que oscilaron entre 2 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-2 y 17 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-4, lo que podría reflejar una disminución en su disponibilidad debido a cambios en las condiciones redox o dilución hidrológica.

En el año 2017, durante su estación seca, los valores de pH fueron ligeramente inferiores a los registrados en 2003, oscilando entre 7,73 en FN-1 y 8,15 en FN-5. La conductividad también mostró una notable disminución respecto a los valores previos, con registros que variaron entre 805 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en FN-1 y 2777 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en FN-3, sector donde aflora la vertiente termal Aguas de Dionisio. En cuanto al contenido de metales disueltos, las concentraciones de Cu, Pb y Zn se encontraron por debajo del límite de cuantificación del método analítico empleado, a excepción del dique El Rulito (FN-1), donde se detectaron 6,7 $\mu\text{g}/\text{L}$ de Cu y 32 $\mu\text{g}/\text{L}$ de Zn. El arsénico (As) estuvo presente en todas las muestras, con concentraciones que variaron entre 13 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-1 y 54 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-4. Por su parte, el estroncio (Sr) presentó valores relativamente similares a los registrados en 2003, con concentraciones entre 215 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-5 y 2356 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-3. Finalmente, el manganeso (Mn) mostró una amplia variabilidad, con contenidos que fueron desde 8 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-5 hasta 2774 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-1.

Durante la estación húmeda del mismo año hidrológico, los valores de pH se mantuvieron relativamente constantes respecto a la estación seca, con registros de 7,89 en FN-2 (Vertiente del Águila) y 8,20 en FN-4. Cabe señalar que no se dispone de datos para la muestra FN-1. En cuanto a la conductividad eléctrica, osciló entre 1197 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en FN-5 y 2850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en FN-2. Las concentraciones de Cu, Pb y Zn se mantuvieron por debajo del límite de detección, con excepción del Zn en la muestra FN-4, donde se registró un valor de 4,10 $\mu\text{g}/\text{L}$. El arsénico (As) presentó concentraciones más elevadas que en el período seco, variando entre 36 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-2 y 76 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-4 y FN-5. Las concentraciones de estroncio (Sr) se mantuvieron relativamente constantes en ambos períodos, con un mínimo de 167 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-5 y un máximo de 2379 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-3. En cambio, los contenidos de manganeso disuelto (Mn) disminuyeron de 17 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-5 a 7 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-4.

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALOGICA DE RESIDUOS MINEROS DE FARALLÓN NEGRO

Tabla 9: Parámetros del agua correspondientes al periodo seco del año 2003.

Punto de Muestreo	pH	Conductividad	As	Cu	Pb	Zn	Fe	Sr	Mn
Periodo Seco – Año 2003		(μ S/cm)	(μ g/L)						
FN – 1	8,01	3020	<10	53	<7	67	50	1250	1669
FN – 2	8,10	2270	14	<2	<7	20	66	2011	39
FN – 3	8,30	2710	55	<2	<7	22	15	2358	60
FN – 4	8,41	2520	46	8	<7	43	13	2170	92
FN – 5	8,26	1019	23	2	<7	11	137	151	35

Tabla 10: Parámetros químicos del agua correspondientes al periodo húmedo del año 2003.

Punto de Muestreo	pH	Conductividad	As	Cu	Pb	Zn	Fe	Sr	Mn
Periodo Húmedo - Año 2003		(μ S/cm)	(μ g/L)						
FN – 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FN – 2	8,15	2050	22	<2	<5	7	<5	2059	2
FN – 3	8,42	2380	59	<2	<5	9	<5	2619	10
FN – 4	8,39	2450	62	<2	<5	9	<5	2682	17
FN – 5	8,44	1241	48	<2	<5	<2	40	195	15

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALOGICA DE RESIDUOS MINEROS DE FARALLÓN NEGRO

Tabla 11: Parámetros químicos del agua correspondientes al periodo seco del año 2017.

Punto de Muestreo	pH	C.E	As	Cu	Pb	Zn	Fe	Sr	Mn
Periodo Seco – Año 2017		($\mu\text{S}/\text{cm}$)				($\mu\text{g}/\text{L}$)			
FN – 1	7,73	805	13	6,7	<7,5 (**)	32	15	662	2774
FN – 2	7,74	2757	13	<3,6 (**)	<7,5 (**)	2	3	2142	21
FN – 3	7,88	2777	52	<3,6(**)	<7,5(**)	<0,7(**)	3	2356	<4(**)
FN – 4	8,10	2770	54	<3,6(**)	<7,5(**)	<0,7(**)	5	2334	28
FN – 5	8,15	824,67	17	<3,6(**)	<7,5(**)	<0,7(**)	7,5	215	8

Tabla 12: Parámetros químicos del agua correspondientes al periodo húmedo del año 2017.

Punto de Muestreo	pH	C.E	As	Cu	Pb	Zn	Fe	Sr	Mn
Periodo Húmedo – Año 2017		($\mu\text{S}/\text{cm}$)				($\mu\text{g}/\text{L}$)			
FN – 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FN – 2	7,89	2850	36	<3,6	<7,5 (**)	<0,7(**)	65	2150	16
FN – 3	7,96	2621	76	<3,6	<7,5(*)	<0,7(**)	16	2379	<4(*)
FN – 4	8,20	2766	76	<3,6	<7,5(*)	4,10	26	2217	7
FN – 5	8,14	1197	68	<3,6	<7,5(**)	<0,7(**)	33	167	17

5.8. Clasificación Hidroquímica

La clasificación hidroquímica de las aguas superficiales de la cuenca del yacimiento Farallón Negro se mantuvo constante a lo largo de los distintos períodos hidrológicos (secos y húmedos) y años de muestreo (2003 y 2017), sin observarse variaciones significativas en la composición iónica dominante de las muestras analizadas (Figura 27 a 31). La muestra FN-1, correspondiente al dique de colas El Rulito, se clasificó como agua de tipo sulfatada cálcica, con una tendencia a una mayor mineralización durante los períodos secos. En contraste, los ejemplares FN-2, FN-3 y FN-4, vinculadas a vertientes naturales (como la vertiente del Águila y vertiente Termal Aguas de Dionisio), se clasificaron como sulfatadas sódicas. Por su parte, la muestra FN-5, ubicada en la confluencia del arroyo Seco con el río Los Nacimientos, se clasificó como bicarbonatada sódica, una composición característica de aguas de recarga o tránsito superficial en zonas de menor influencia minera.

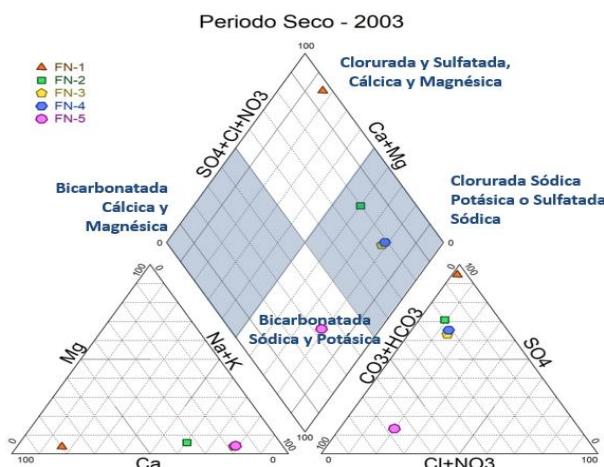


Figura 27: Diagrama de Piper del periodo húmedo (2003), mostrando la clasificación hidroquímica de las muestras FN-1 a FN-5.

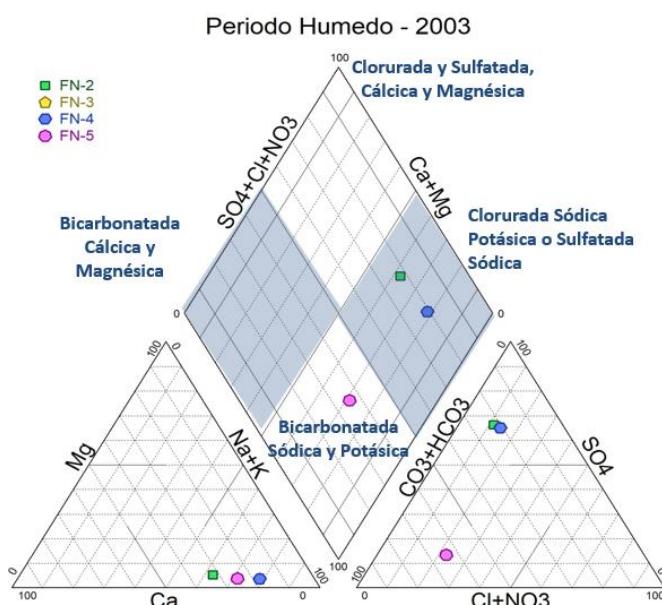


Figura 28: Diagrama de Piper del periodo húmedo (2003), mostrando la clasificación hidroquímica de las muestras FN-2 a FN-5.

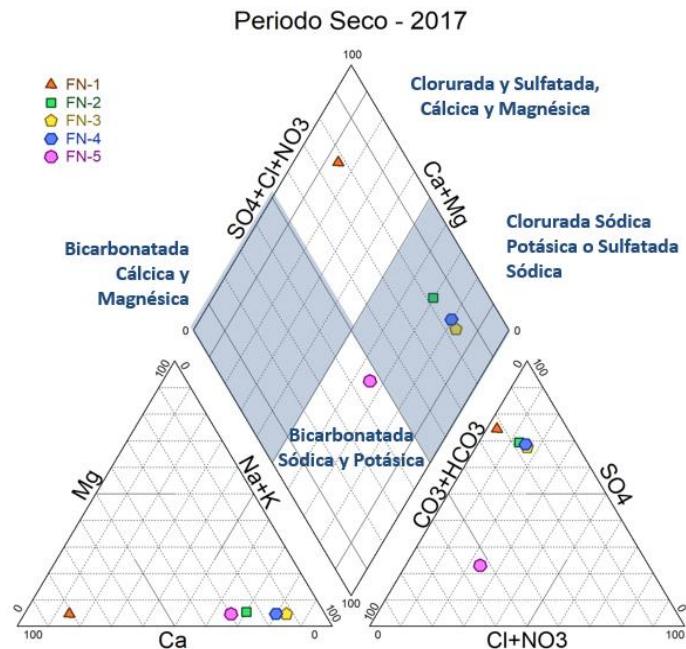


Figura 29: Diagrama de Piper del periodo seco (2017), mostrando la clasificación hidroquímica de las muestras FN-1 a FN-5.

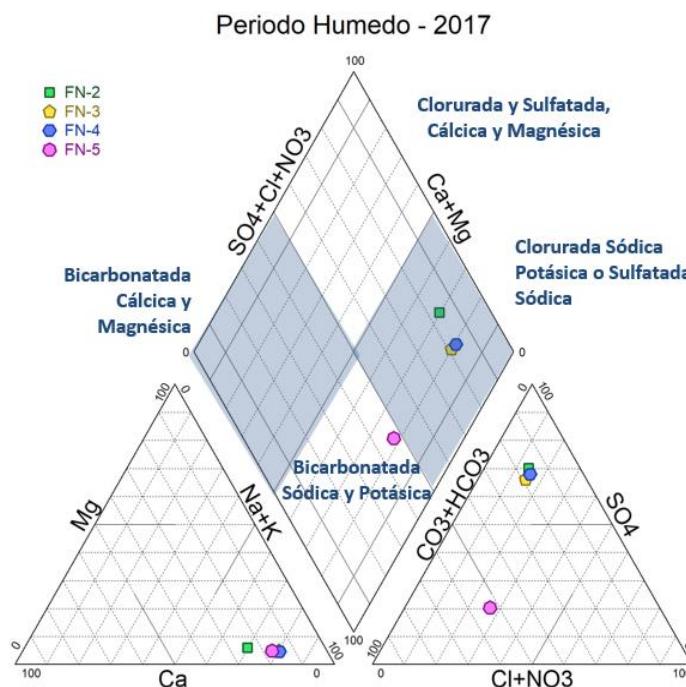


Figura 30: Diagrama de Piper del periodo húmedo (2017), mostrando la clasificación hidroquímica de las muestras FN-2 a FN-5.

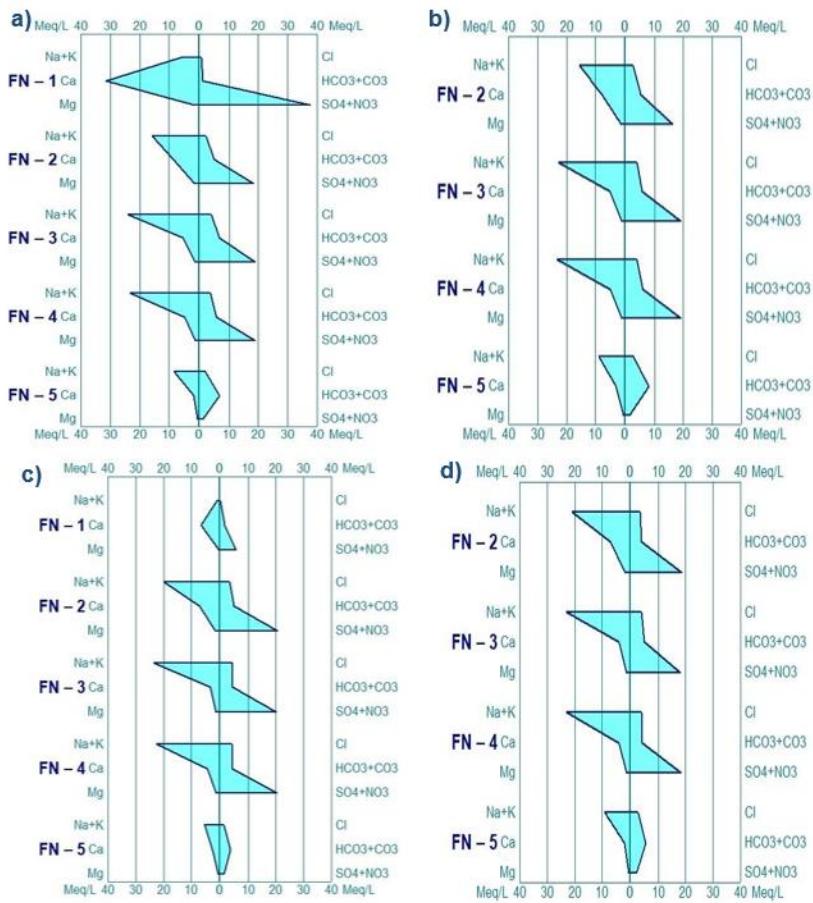


Figura 31: Diagrama tipo Stiff que ilustran la distribución iónica en (meq/L) de las muestras FN-1 a FN-5. Se presentan los resultados correspondientes a: a) correspondiente al periodo seco y b) periodo húmedo del año 2003; c) periodo seco y d) periodo húmedo del año 2017.



Capítulo 6

Discusión

6. Discusión

En este capítulo se interpretan y analizan críticamente los resultados obtenidos durante la investigación, con el propósito de relacionarlos con los objetivos planteados y los antecedentes revisados. Se busca identificar patrones, tendencias y posibles causas que expliquen los hallazgos, contrastándolos con información reportada en la literatura científica y con valores de referencia normativos o experimentales. La discusión permite evaluar la coherencia de los datos, considerar las limitaciones del estudio y proponer explicaciones fundamentadas para los procesos observados, integrando de manera sintética la información geológica, geoquímica y ambiental relevada.

Los resultados obtenidos evidencian una marcada heterogeneidad en las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los sedimentos presentes en botaderos y diques de cola, lo cual resulta crucial para evaluar su comportamiento geoquímico y su potencial impacto ambiental (Lottermoser, 2010).

6.1 Caracterización física y geoquímica de residuos mineros: granulometría y densidad real

Los resultados del análisis granulométrico de los botaderos y diques de cola del yacimiento Farallón Negro muestran una marcada heterogeneidad en cuanto a la composición textural de los materiales residuales, esto podría estar relacionado a diferencias en los procesos de deposición, tipo de tratamiento mineralúrgico aplicado, y condiciones ambientales posteriores a la disposición. Estas variaciones texturales tienen implicancias directas en la estabilidad física de los depósitos, la movilidad de contaminantes y el comportamiento hidrogeológico de los residuos (Ribeiro et al., 2014; Lottermoser, 2010).

En los botaderos más recientes, como el Botadero 1, se observó dominancia de fracciones gruesas, con textura Franco Arenosa (59,2 % arena), indicando una deposición de materiales de mayor tamaño relativo, posiblemente vinculada a una menor alteración química y escaso transporte hídrico. Este tipo de textura favorece la permeabilidad y, por ende, la infiltración de agua, lo que puede favorecer los procesos de oxidación de sulfuros y generación de drenaje ácido si existieran minerales reactivos (Younger et al., 2002). La alta permeabilidad de estos sedimentos, sugieren una mayor facilidad de drenaje, pero menor capacidad de retención química. Esto puede influir en la rápida dispersión de contaminantes facilitando su movilidad tanto por escorrentía como por infiltración hacia el subsuelo (Lottermoser, 2010).

Por contraste, el Botadero 2, compuesto mayoritariamente por lodo, presentó una textura Franco Arcillosa, con un incremento significativo en las fracciones finas. Este tipo de textura se asocia generalmente con baja permeabilidad, lo que puede generar condiciones de anoxia, reteniendo algunos elementos químicos, pero dificultando el drenaje interno del depósito (Dold, 2008; Sharma y Reddy, 2004). Esta textura, tiende a presentar mayor capacidad de adsorción de contaminantes debido a su amplia superficie específica y contenido en minerales con cargas superficiales activas. Estas características permiten la retención temporal de metales, afectando su movilidad y biodisponibilidad (Sposito, 2008).

El Botadero 3 mostró una textura transicional entre Franco Arenoso y Franco Arcillo Arenoso, con una alta proporción de arena (67,2 %) pero presencia no despreciable de arcilla (20,4 %). Esta variabilidad sugiere una disposición mixta, posiblemente asociada a materiales

parcialmente lavados o mezclados durante la operación minera. En este sentido, la heterogeneidad textural podría influir en la capacidad de retención de agua y transporte de contaminantes a través del perfil (Bussière, 2007).

Respecto a los diques de colas, las diferencias entre condiciones secas y saturadas también revelan contrastes marcados. En el Dique Rulito 1, el sedimento seco mostró una textura Franco Arenosa, similar al Botadero 1, lo cual implica condiciones de alta porosidad y posible lixiviación vertical. En cambio, el sedimento saturado del Dique Rulito 2 presentó una textura Franco Limoso, con más del 50 % de limo. Esta composición puede favorecer la retención superficial de agua, influir en la consolidación de las colas y limitar la aireación del perfil (Smith y Mudder, 1991).

Por su parte, el Dique Intermedio reflejó una estratificación textural vertical, con una textura Franco Arcillo Arenosa en el nivel superior y Franca en el inferior, lo que podría indicar diferentes pulsos de deposición o alteración post-depositacional. Esta variabilidad sugiere una evolución textural del depósito en el tiempo, posiblemente ligada a cambios operacionales o climáticos.

Finalmente, el Botadero Antiguo presentó una textura Franco Limoso, dominada por la fracción limosa, lo cual podría deberse a una mayor meteorización de los materiales originales. Este tipo de textura es común en depósitos antiguos, donde los procesos de degradación mecánica y química han reducido progresivamente el tamaño de grano (Hudson-Edwards et al., 1999). Estos materiales tienden a retener agua en mayor medida que los arenosos, lo cual puede inducir procesos de compactación y reducir la permeabilidad, afectando tanto la estabilidad física del depósito como el movimiento de solutos (Mendez y Maier, 2008).

Otro de los parámetros de gran importancia es la densidad real, el cual es fundamental para caracterizar las propiedades físicas de los residuos mineros, ya que refleja la naturaleza mineralógica del material, excluyendo los espacios porosos o vacíos entre partículas. En ambientes impactados por la actividad minera, como botaderos y diques de cola, este valor permite inferir no solo la composición mineral predominante, sino también aspectos clave relacionados con la estabilidad física, la compactación y el comportamiento geoquímico del material (Lottermoser, 2010).

En este estudio, el Dique Intermedio Superior y el Botadero 1 presentaron los valores más altos de densidad real ($>2,60 \text{ g/cm}^3$). En el primer caso, dicha densidad sugiere una notable abundancia de minerales pesados o con alto contenido metálico, como pirita, galena y pirrotina, los cuales fueron identificados mediante difracción de rayos X (DRX). Estos sulfuros son típicos de ambientes hidrotermales y de residuos mineros activos, y su presencia está estrechamente relacionada con procesos de generación de drenaje ácido de mina (DAM) debido a su inestabilidad en condiciones oxidantes (Jambor y Blowes, 1994; Nordstrom, 2011).

Por su parte, en el Botadero 1, la elevada densidad podría deberse principalmente a la presencia de minerales oxidados de alta masa específica, como magnetita y rutilo, también identificados por DRX. Estos minerales, aunque menos reactivos que los sulfuros, pueden actuar como portadores de metales traza y favorecer su liberación bajo determinadas condiciones geoquímicas (Sánchez España y Bozau, 2004).

La identificación de estos minerales no solo proporciona información sobre el origen y la naturaleza del residuo, sino también sobre su potencial de impacto ambiental. En especial, los residuos con alta densidad real y contenido en sulfuros representan un mayor riesgo de acidificación y movilización de metales pesados, lo que requiere un control ambiental adecuado para prevenir la contaminación de aguas superficiales y subterráneas (Lottermoser, 2010; Kossoff et al., 2014).

En el grupo de densidad real intermedia (entre 2,18 y 2,39 g/cm³) se incluyen muestras del Botadero 2 (Iodo), Botadero 3, Dique de Rulito 1 y el Dique Intermedio Inferior. Estos valores son indicativos de una composición mineralógica mixta, en la que predominan minerales silicatados tales como cuarzo, albita y moscovita, y una variedad de arcillas (caolinita, illita y vermiculita). La presencia de materiales finos como filosilicatos (arcillas), que poseen densidades moderadas y alta capacidad de retención de agua, podría explicar estos valores intermedios (Sposito, 2008). Además, estos minerales tienden a retener metales mediante mecanismos de adsorción superficial o intercambio catiónico, reduciendo temporalmente su movilidad (Mendez & Maier, 2008). Sin embargo, bajo cambios en el pH o el potencial redox, estos metales pueden ser liberados, lo que convierte a estos residuos en reservorios potenciales. Según Sánchez España y Bozau (2004), dichos valores de densidad pueden ser indicativos de procesos de lixiviación parcial o alteración mineralógica, asociados a la pérdida de componentes solubles

Finalmente, el grupo con menor densidad real (<2,00 g/cm³), representado por el Dique de Rulito 2 y el Botadero Antiguo, muestra una marcada divergencia en relación con el resto de las muestras analizadas. Estas bajas densidades podrían estar asociadas a un alto grado de alteración superficial y a la presencia de materia orgánica, como resultado de procesos prolongados de acumulación y descomposición biogénica. En el caso del Dique de Rulito 2, el material ha permanecido en condiciones de estancamiento durante largos períodos, lo que favorece la descomposición de la vegetación circundante. Por su parte, el Botadero Antiguo se encuentra en una zona con abundante vegetación autóctona, cuyo desarrollo prolongado podría haber contribuido significativamente a la formación de horizontes orgánicos.

Adicionalmente, aunque en menor proporción, esta baja densidad puede estar relacionada con la presencia de óxidos hidratados de hierro, como goethita y ferrihidrita, identificados mediante difracción de rayos X (DRX). Según Sposito, (2008), tanto el material orgánico como los óxidos hidratados constituyen indicadores de densidades bajas. Asimismo, los materiales de granulometría muy fina, principalmente minerales arcillosos como illita, caolinita y vermiculita (también identificados por DRX), con elevada porosidad intra-particular, puede contribuir a la reducción de la densidad.

Las características texturales del material de los depósitos, como la alta proporción de partículas finas (illita, caolinita, vermiculita) y la presencia de óxidos hidratados de hierro con elevada porosidad intra-particular, generan una baja densidad aparente (Sposito, 2008). Esta baja densidad implica un menor grado de compactación y cohesión interna, disminuyendo así la resistencia mecánica del depósito. En el caso de diques de colas o botaderos, esta reducción de la estabilidad mecánica aumenta la susceptibilidad a deformaciones, asentamientos diferenciales o deslizamientos, especialmente bajo condiciones de saturación hídrica, donde la elevada porosidad facilita la retención de agua y el incremento de presión de poro (Kossoff et al., 2014). En consecuencia, estas propiedades texturales finas y porosas incrementan la vulnerabilidad del depósito a procesos de movilización de partículas y dispersión de contaminantes.

6.2 Influencia de los carbonatos en el comportamiento geoquímico y la neutralización de acidez

En relación con el contenido de carbonatos, se observa que algunos sectores presentan concentraciones moderadas a altas, lo cual es esperable, dado que la litología y en especial la veta mineralizada, está contenida en carbonatos. También puede hacer su aporte la precipitación secundaria de estas fases como resultado de la interacción entre aguas meteoríticas y materiales enriquecidos en cationes metálicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+}). Este proceso es característico de ambientes áridos a semiáridos, como el de Farallón Negro, donde la intensa evaporación favorece la concentración iónica y la formación de minerales carbonatados (Nordstrom y Alpers, 1999; Jambor et al., 2000).

En los diques de colas, en cambio, las concentraciones de carbonatos (principalmente calcita, identificada por DRX) suelen ser bajas o presentar distribución heterogénea. Esta condición se relaciona con la mayor proporción de silicatos y sulfuros en dichos depósitos, así como con la oxidación de sulfuros metálicos (especialmente pirita) que generan condiciones ácido-formadoras. En este contexto, los carbonatos preexistentes se consumen como agentes tamponantes en las reacciones de neutralización, reduciendo su abundancia. Este comportamiento es típico del drenaje ácido de roca (DAR), el cual puede disminuir notablemente el contenido carbonatado en los residuos (Plumlee y Logsdon, 1999; Lottermoser, 2010). No obstante, en algunos casos se detectaron remanentes de carbonatos, probablemente vinculados a la adición de cal durante procesos metalúrgicos como la cianuración. Este aporte externo debe considerarse en la interpretación geoquímica, ya que puede enmascarar la señal natural de neutralización (Dold, 2006).

Los botaderos muestran un patrón diferente. En ciertos sectores, especialmente aquellos conformados por material estéril hidrotermalmente alterado, se registran concentraciones relativamente elevadas de carbonatos, predominando la calcita y en menor medida la dolomita. Estas fases pueden corresponder tanto a minerales primarios de las rocas huésped como a productos de alteración supergénica, favorecidos por la exposición superficial y el almacenamiento prolongado (Parbhakar-Fox y Lottermoser, 2015). Los botaderos más antiguos, en particular, evidencian una mayor acumulación de sales secundarias, incluidas fases carbonatadas, lo que apunta a una fuerte influencia de los procesos de meteorización química en condiciones semiáridas (Sullivan y Dubé, 1997).

Desde una perspectiva geoambiental, la presencia de carbonatos en los residuos mineros resulta estratégica por su capacidad neutralizante, constituyéndose en un factor clave en la atenuación del drenaje ácido. En este marco, la caracterización precisa del contenido carbonatado es fundamental para evaluar la relación entre el potencial de neutralización y el potencial generador de ácido, y estimar así la capacidad amortiguadora del sistema (Price, 2009; Jennings et al., 2008). La alta alcalinidad registrada se corresponde con la presencia predominante de calcita y dolomita, detectadas mediante DRX, y con los elevados valores de capacidad de neutralización de acidez ($\text{ANC} > 50 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$) en todas las muestras. Estos valores, junto con el bajo contenido de sulfuros, originan resultados fuertemente negativos del potencial neto de generación de acidez (NAPP), clasificando a los materiales como no acidogénicos según los criterios de MEND (2001) y Price (2009). En efecto, materiales con

NAPP < $-20 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$ son considerados no generadores de drenaje ácido (NDA), ya que poseen suficiente capacidad neutralizante incluso bajo condiciones oxidantes.

La tendencia alcalina observada en los valores de pH de pasta refuerza esta interpretación y confirma la elevada capacidad de neutralización de los residuos. Parte de esta alcalinidad se explica por la adición de cal (CaO) durante el procesamiento metalúrgico, práctica común en la minería aurífera para mantener un pH elevado (10–11) y evitar la volatilización del cianuro en la lixiviación de oro (Dold, 2006; Price, 2009; Miller et al., 2003). La persistencia de valores alcalinos tras el procesamiento evidencia que una fracción de la cal permanece en los residuos.

Finalmente, los resultados de la prueba de generación neta de ácido (NAG) corroboran los obtenidos mediante el ensayo ABA. En todas las muestras, el pH final de la solución NAG fue superior a 4,5, confirmando la ausencia de generación neta de acidez y la estabilidad geoquímica de los residuos bajo condiciones oxidativas (Sullivan y Dubé, 1997; Jambor et al., 2000).

6.3. Caracterización mineralógica y geoquímica de los residuos mineros

Los resultados de la caracterización mineralógica y geoquímica de los residuos mineros del yacimiento Farallón Negro evidencian una notable heterogeneidad tanto en su composición mineral como en la concentración elemental. Esta diversidad responde a múltiples factores, entre ellos, la mineralogía original del depósito, los procesos metalúrgicos aplicados y las condiciones geoquímicas post-deposición.

Desde el punto de vista mineralógico, los botaderos presentan una predominancia de fases silicatadas (cuarzo, albita), carbonatadas (calcita, dolomita) y arcillosas (illita, caolinita, montmorillonita), lo que sugiere un entorno geoquímico moderadamente estable y con capacidad de adsorción de metales pesados. En particular, el botadero antiguo se destaca por una fuerte presencia de minerales arcillosos, lo que podría conferir una capacidad significativa para inmovilizar metales mediante procesos de intercambio catiónico y adsorción superficial, tal como lo reportan estudios previos (Sposito, 2008; Moore et al., 2010).

En contraste, la mineralogía de los diques de colas, particularmente en el nivel superior del dique intermedio, muestra una mayor abundancia de minerales resistentes a la alteración química, destacándose el cuarzo (76%), cuya presencia puede explicarse por el descarte posterior a la recuperación de metales y su origen en vetas auríferas o en la silicificación de las rocas hospedantes. Asimismo, se identificaron sulfuros como calcopirita, pirita y pirrotina, cuya relevancia ambiental radica en su capacidad de generar drenaje ácido de mina (DAM) a través de procesos de oxidación en condiciones aeróbicas (Nordstrom y Alpers, 1999). No obstante, la coexistencia de estas fases con minerales carbonatados (principalmente calcita y dolomita) sugiere la existencia de un cierto equilibrio entre los procesos productores y neutralizantes de acidez, lo cual fue corroborado por los ensayos realizados.

Desde la composición química, se identifican concentraciones variables de Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, As y Cd. El Dique Intermedio (nivel superior) registró concentraciones particularmente elevadas de Pb (581 ppm) y As (752 ppm), elementos con alta toxicidad ambiental y movilidad en ambientes oxidados. Estos valores superan ampliamente los niveles guía establecidos por agencias internacionales como la USEPA o la OMS para suelos no contaminados, lo que

implica un riesgo potencial de lixiviación hacia sistemas hídricos si no se aplican estrategias adecuadas de contención o remediación.

En el Botadero 2, las concentraciones de Zn (2240 ppm) y Cd (12,6 ppm) resultan particularmente elevadas, lo que reviste importancia dado que ambos elementos pueden liberarse en condiciones de baja acidez o bajo ambientes reductores, con potencial impacto tanto en la biota acuática como en la calidad de las aguas subterráneas (Alloway, 2013). La asociación observada entre estos niveles elevados de metales pesados y la presencia de minerales secundarios como pirolusita y goethita indica la existencia de procesos de oxidación-reprecipitación activos, característicos de ambientes sometidos a meteorización avanzada.

Un aspecto relevante es el comportamiento geoquímico diferenciado entre los niveles del Dique Intermedio. Mientras que el nivel inferior presenta mayores concentraciones de Fe (776 ppm), Zn (31,8 ppm) y Cu (1,91 ppm), el nivel superior concentra Pb, As y Mo. Esta distribución podría explicarse por procesos de movilización vertical asociados a fluctuaciones del nivel freático, que generan redistribución de elementos en función de sus afinidades geoquímicas. Dichas variaciones producen cambios cíclicos en el potencial redox y en el grado de saturación de los sedimentos. En períodos secos, la oxidación de sulfuros metálicos (como pirita y calcopirita) libera metales que son transportados verticalmente mediante procesos de capilaridad o infiltración. En la capa superior, al aumentar la oxigenación y el pH, se favorece la precipitación o adsorción diferencial según la afinidad de cada elemento: Fe, Cu y Zn tienden a precipitar en niveles más profundos como hidróxidos o carbonatos (Stumm y Morgan, 1996).

En contraste, As y Mo, presentes como especies aniónicas, exhiben menor afinidad por fases sólidas a pH elevado, lo que favorece su migración hacia las capas superficiales. Estos elementos presentan mayor movilidad bajo condiciones oxidantes y pH neutro a alcalino, donde forman especies solubles como arseniato (AsO_4^{3-}) y molibdato (MoO_4^{2-}), que pueden escapar de los sitios de adsorción en óxidos de hierro o aluminosilicatos cuando estas fases están saturadas o el pH es alto (Smedley y Kinniburgh, 2002; Goldberg et al., 2007). En el caso del Pb, aunque su movilidad es generalmente baja en forma iónica, bajo condiciones alcalinas puede formar carbonatos o asociarse a materia orgánica disuelta, lo que facilita su migración hacia niveles superficiales (Alloway, 2013).

Finalmente, la presencia de minerales como montmorillonita y vermiculita en los depósitos de diques de cola o botaderos aporta una capacidad adicional de retención de cationes debido a su alta superficie específica y capacidad de hinchamiento. Estos minerales, clasificados como arcillas expansivas, presentan una alta capacidad de intercambio catiónico (CEC) y una elevada superficie específica, lo que les permite adsorber y retener cationes metálicos y nutrientes, contribuyendo a la estabilidad química del sistema. Además, su capacidad de hinchamiento, especialmente en presencia de agua, puede inducir cambios volumétricos significativos, lo que puede tener implicaciones tanto positivas como negativas en el diseño de barreras geotécnicas o sistemas de confinamiento pasivo. Por un lado, su expansión puede mejorar la impermeabilidad y la estabilidad estructural de las barreras; por otro lado, cambios volumétricos excesivos pueden generar fisuras o deformaciones que comprometen la integridad del sistema. Por lo tanto, es esencial considerar estas propiedades en el diseño y monitoreo de infraestructuras geotécnicas para garantizar su eficacia y durabilidad a largo plazo (Dutz, 2012).

6.4. Hidroquímica y análisis elemental de las aguas superficiales en la cuenca del yacimiento Farallón Negro

La caracterización hidroquímica y el análisis de metales pesados y trazas del agua superficial de la cuenca del yacimiento Farallón Negro revelan la influencia de procesos geogénicos y antrópicos sobre la calidad del recurso hídrico. Durante ambos años de monitoreo (2003 y 2017), el pH se mantuvo mayormente dentro del rango de aguas ligeramente alcalinas, indicando una alta capacidad de neutralización del sistema acuático (Lottermoser, 2010). Estos valores confirman la existencia de minerales neutralizantes como carbonatos en las matrices rocosas y residuales, que contrarrestan la posible generación de acidez por oxidación de sulfuros metálicos (Dold, 2010).

La conductividad eléctrica mostró variaciones marcadas entre los distintos puntos de muestreo y campañas, con valores especialmente altos en los sectores vinculados a las vertientes termales (FN-3) y zonas de influencia minera directa (FN-1). En particular, el punto FN-1 (dique de colas El Rulito) en 2003 exhibió una conductividad de 3020 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica una alta carga iónica asociada probablemente a procesos de lixiviación de residuos mineros y liberación de cationes metálicos y aniones (sulfatos, cloruros) al medio acuoso (Younger et al., 2002).

Respecto a los metales disueltos, el As fue uno de los elementos más persistentemente detectados. En todos los períodos y años analizados, sus concentraciones estuvieron por encima del valor guía de 10 $\mu\text{g}/\text{L}$ propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable (WHO, 2017), alcanzando un máximo de 76 $\mu\text{g}/\text{L}$ en FN-3 y FN-4 durante el período húmedo de 2017. Este patrón sugiere un origen geogénico del As asociado a la fuente termal Aguas de Dionisio, cuya solubilidad puede incrementarse en ambientes oxidados y alcalinos (Smedley y Kinniburgh, 2002). Las variaciones entre estaciones secas y húmedas podrían explicarse por procesos de dilución de sales solubles que retienen arseniato y mayor movilización del As en condiciones de elevada escorrentía superficial. La presencia de sales es muy común a lo largo de la cuenca. Estas fases pueden actuar como sumideros de contaminantes ya que retienen As y otros elementos traza por adsorción o co-precipitación, procesos que son particularmente importantes en regiones con altas tasas de evaporación. Sin embargo, esta función puede ser limitada porque algunas de estas sales son altamente solubles y por lo tanto se disuelven rápidamente durante eventos de lluvia ocasionales, dando lugar a la liberación de metales y metaloides que se pueden incorporar al agua de escorrentía como especies iónicas en solución. Según Frau (2000), cuando más largo es el período seco, más intenso será el impacto ambiental durante el período húmedo posterior.

En cuanto al Cu, Pb y Zn, sus contenidos se mantuvieron generalmente por debajo de los límites de cuantificación, con algunas excepciones puntuales de Cu y Zn en FN-1 durante el período seco. Estos elementos suelen estar relacionados con la presencia de sulfuros metálicos (calcopirita, galena, esfalerita), cuya oxidación puede liberar iones metálicos a las aguas superficiales, aunque su movilidad puede verse atenuada por procesos de precipitación o adsorción sobre óxidos de hierro y manganeso (Nordstrom y Alpers, 1999).

El Sr se presentó como uno de los elementos mayoritarios en solución, con concentraciones bastante elevadas, lo cual refuerza la hipótesis de un aporte desde fuentes termales profundas o por alteración de minerales ricos en este elemento, como plagioclasas cárnicas (Hem, 1985).

Su persistencia a lo largo de los años y estaciones lo posiciona como un posible trazador geoquímico de aguas de origen profundo o fuertemente mineralizadas.

En el caso del Mn, se observó una marcada variabilidad estacional, con concentraciones muy elevadas durante los períodos secos y valores significativamente más bajos durante los períodos húmedos. Este comportamiento puede deberse a cambios en las condiciones redox del sistema y a procesos de dilución durante los eventos de mayor escorrentía. El Mn es altamente móvil bajo condiciones reductoras, comunes en ambientes con materia orgánica, escasa oxigenación o alta reactividad geoquímica (Stumm y Morgan, 1996).

La clasificación hidroquímica de las aguas superficiales se mantuvo constante a lo largo de los distintos períodos hidrológicos y años de muestreo, sin observarse variaciones significativas en la composición iónica dominante. Esta estabilidad sugiere un sistema hidrogeoquímico relativamente consolidado, con fuentes de solutos controladas principalmente por la litología y los procesos de alteración mineral más que por fluctuaciones estacionales de escorrentía o precipitación (Freeze y Cherry, 1979; Domenico y Schwartz, 1990).

La muestra FN-1, correspondiente al dique de colas El Rulito, fue clasificada como agua sulfatada cárquica, tipo característico de ambientes influenciados por la disolución de minerales secundarios ricos en calcio (como yeso o carbonatos) en presencia de sulfatos derivados de la oxidación de sulfuros metálicos (Hem, 1985; Lottermoser, 2010). La tendencia a una mayor mineralización durante los períodos secos puede explicarse por fenómenos de evaporación y concentración de sales, comunes en regiones semiáridas y en sistemas mineros donde se reduce el flujo superficial y aumenta el tiempo de residencia del agua (Younger et al., 2002).

En contraste, las muestras FN-2, FN-3 y FN-4, vinculadas a vertientes naturales como la vertiente del Águila y termal Aguas de Dionisio, fueron clasificadas como aguas sulfatadas sódicas. Este tipo hidroquímico es común en ambientes volcánicos o hidrotermales, donde la interacción prolongada con materiales ricos en sodio y sulfato, como feldespatos sódicos alterados o piroclastos, puede enriquecer las aguas en estos iones (Smedley et al., 2002). En particular, las vertientes termales podrían estar aportando soluciones más evolucionadas desde profundidad, lo que justificaría tanto el tipo iónico dominante como las altas conductividades registradas en esas zonas.

Por su parte, la muestra FN-5, ubicada en la confluencia del arroyo Seco con el río Los Nacimientos, se clasificó como bicarbonatada sódica, una composición característica de aguas de recarga reciente o tránsito superficial, con menor interacción roca-agua y baja influencia de procesos de alteración (Stumm & Morgan, 1996). Este tipo de agua refleja condiciones hidrogeoquímicas diluidas, propias de sectores más alejados de los focos mineralizados o de las áreas de acumulación de residuos mineros.



Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. Heterogeneidad litogegeoquímica de los residuos mineros

La caracterización de los botaderos y diques de cola del yacimiento Farallón Negro evidencian una significativa heterogeneidad mineralógica y química, asociada principalmente a la litología y mineralogía de la zona, a los procesos de explotación y a la meteorización post-depositacional de los residuos mineros. Estos contienen una mezcla de minerales silicatados, carbonatados, arcillosos y sulfuros metálicos en proporciones variables, lo que influye directamente en su comportamiento geoquímico y en su capacidad para liberar o retener elementos tóxicos.

2. Presencia de minerales con potencial neutralizante y acidogénicos

La mayoría de los residuos mineros presentan una alta proporción de minerales carbonatados (calcita, dolomita) y arcillosos (illita, caolinita, montmorillonita), lo cual otorga una capacidad significativa de neutralización de acidez. Esta condición fue confirmada por los valores elevados de ANC (Acid Neutralizing Capacity) y NAPP (Net Acid Producing Potential) negativos, clasificando a los materiales como no acidogénicos.

3. Distribución diferencial de metales pesados y metaloides

Las concentraciones de metales como Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, As y Cd mostraron patrones espaciales contrastantes. Algunos botaderos, como el Botadero 2, y sectores del Dique Intermedio superior, exhibieron niveles elevados de Pb, As, Cd y Zn, superando en varios casos los umbrales establecidos por (Normas EPA, 2017) para suelos no contaminados. Esta distribución podría estar relacionada con la mineralogía local y los procesos de movilización vertical inducidos por fluctuaciones del nivel freático, lo que genera una redistribución controlada por afinidades geoquímicas específicas.

4. Influencia del contenido elemental en la calidad del agua superficial

La composición química de las aguas superficiales de la cuenca presentó valores elevados de conductividad y concentraciones detectables de ciertos elementos como As, Sr y Mn, especialmente en sectores próximos a los residuos mineros (p. ej., FN-1, FN-3). Entre estos, el arsénico fue el contaminante más persistente, con concentraciones de 13 a 76 µg/L, superando el valor guía de 10 µg/L para agua potable (OMS), atribuible principalmente a la influencia de la fuente termal Aguas de Dionisio. En general, las concentraciones de metales derivados de la actividad minera son bajas y no parecen representar un aporte significativo al sistema acuático. Esto sugiere que, aunque los procesos de disolución y lixiviación de elementos traza están activos y contribuyen a la carga iónica del agua, la minería no genera un impacto metalúrgico relevante sobre la calidad de las aguas superficiales de la cuenca.

5. Efecto estacional en la movilidad de contaminantes

Las variaciones entre las estaciones secas y húmedas evidenciaron un patrón diferenciado en la movilidad de ciertos elementos traza. El arsénico (As) presentó concentraciones más elevadas durante la temporada húmeda, lo que se asocia con el lavado superficial de sales solubles y la mayor escorrentía que moviliza este metaloide hacia los cauces. En cambio, manganeso (Mn) y estroncio (Sr) mostraron incrementos en los períodos secos, probablemente favorecidos por condiciones reductoras y la concentración de solutos por evaporación. Estas diferencias estacionales indican que, aunque la mayoría de los metales permanecen en niveles bajos, As, Mn y Sr pueden comportarse como elementos anómalos dentro del sistema acuático.

6. Estabilidad hidroquímica de la cuenca con zonas críticas de mineralización

La clasificación hidroquímica de las aguas se mantuvo estable en términos de composición iónica dominante, aunque con diferencias marcadas entre sectores. Las aguas cercanas a los diques de cola se clasificaron como sulfatadas cálcicas, mientras que las de vertientes termales fueron sulfatadas sódicas. Las aguas más alejadas del área de influencia minera (FN-5) presentaron un carácter bicarbonatado sódico, típico de aguas de recarga. Estas diferencias reflejan el grado de interacción agua-roca-residuo y permiten delimitar áreas críticas para el monitoreo ambiental.

7. 2. Recomendaciones

Se recomienda la implementación de un programa continuo de monitoreo geoquímico de los residuos mineros del yacimiento Farallón Negro, con el propósito de evaluar la evolución temporal de las condiciones fisicoquímicas y prevenir posibles cambios asociados a procesos de oxidación, alteración mineral secundaria o variaciones en el régimen hídrico. Si bien el sistema presenta actualmente un bajo potencial de generación de drenaje ácido, el monitoreo a largo plazo resulta esencial para garantizar la estabilidad geoquímica. Asimismo, se sugiere la revalorización de los materiales arcillosos expansivos identificados en el botadero antiguo (illita, montmorillonita y caolinita) como insumos naturales para la conformación de barreras de baja permeabilidad o coberturas multicapas, con el objetivo de disminuir el ingreso de agua y oxígeno hacia los residuos y minimizar la reactividad geoquímica. Finalmente, las áreas donde se registran concentraciones elevadas de As, Pb y Cd, se recomienda aplicar técnicas de encapsulamiento selectivo mediante coberturas geotécnicas compuestas por capas de arcillas compactadas, geotextiles y materiales inertes, en línea con experiencias exitosas documentadas en otras operaciones mineras andinas (Méndez et al., 2017).

Por último, se propone implementar un monitoreo diferenciado de la calidad del agua, considerando la clasificación hidroquímica y las variaciones sectoriales identificadas. Se debe prestar especial atención a las aguas próximas a los diques de cola y a las vertientes termales, dado que ambas presentan una mayor interacción agua-roca-residuo y podrían actuar como indicadores tempranos de cambios en la composición química del sistema. Este enfoque permitirá delimitar con mayor precisión las áreas críticas y optimizar los programas de monitoreo ambiental, priorizando los sectores con mayor vulnerabilidad o riesgo potencial de alteración geoquímica.

8. Bibliografía:

- Aceñolaza, G., y Aceñolaza, F. (2005). La Formación Suncho y unidades vinculadas en el basamento ígneo-metamórfico del noroeste argentino. Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO).
- Aceñolaza, F. G. (2013). Farallón Negro: epopeya de un sueño minero. Miscelánea 20, Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), Universidad Nacional de Tucumán.
- Aceñolaza, F., Durand, F., & Omarini, R. (1989). El basamento cristalino del noroeste argentino y su vinculación con la Formación Puncoviscana. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 217–230.
- Adriano DC, Wenzel WW, Vangronsveld J, Bolan NS, 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*.122, 121-142.
- Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Springer.
- Alderete, M. C. (1999). Geología y metagénesis del distrito Farallón Negro, provincia de Catamarca. Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad Nacional de Tucumán.
- Argerich, A. (1976). Mapa de provincias geológicas de Catamarca. Informe técnico, Dirección Nacional de Minería, República Argentina.
- Bain, J. H. C., & Smith, R. A. (2003). Heavy mineral sands: Resources, controls and environments of formation. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.
- Barton, P. B., & Skinner, B. J. (1979). Sulfur in hydrothermal deposits. In H. L. Barnes (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (2nd ed., pp. 165–218). New York: Wiley-Interscience.
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed., pp. 363–382). Agronomy Monograph 9. American Society of Agronomy–Soil Science Society of America.
- Benítez, M. (2012). Informe sobre producción minera en Farallón Negro. Presentación técnica interna, YMAD.
- Bossi, G. E., y Muruaga, C. M. (2009). Evolución sedimentaria neógena en el área de Hualfín. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 64(3), 377–392.
- Bossi, G. E., Muruaga, C. M., y Tineo, D. (2001). Estratigrafía del Cuaternario en el área de Corral Quemado. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 56(3), 245–260.

- Buatois, L. A., y Mángano, M. G. (2003a). Ichnología de la Formación Puncoviscana. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 1–20.
- Buatois, L. A., y Mángano, M. G. (2003b). Ambientes marinos tempranos en el noroeste argentino. *Journal of South American Earth Sciences*, 1–15.
- Buatois, L. A., y Mángano, M. G. (2004). Trace fossils and sedimentary facies of the Puncoviscana Formation. *Palaios*, 1–22.
- Bundschuh, J., Maity, J. P., Nath, B., Baba, A., Gunduz, O., & Kuriakose, T. (2012). Medical geology in the framework of the Sustainable Development Goals. *Science of the Total Environment*, 566–567, 494–504.
- Bussière, B. (2007). Colloquium 2004: Hydro-geotechnical properties of hard rock tailings from mines and implications for their disposal. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019–1052.
- Buchanan, L. J. (1981). Precious metal deposits associated with volcanic environments in the southwest. In G. H. Raines, B. E. Galloway, & J. M. Worr (Eds.), *Vein-type deposits in volcanic rocks* (pp. 1–13). U.S. Geological Survey Open-File Report 81-838.
- Corbett, G. J., y Leach, T. M. (1998). Southwest Pacific rim gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralization. *Society of Economic Geologists Special Publication*.
- Corpacci, P. M. (2020). *Prospección geológica – Veta Macho Muerto, sector sureste, distrito minero Farallón Negro, departamento Belén, provincia de Catamarca*. Trabajo Final de Licenciatura en Geología, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca.
- Chávez, W. E. R. (2017). Desarrollo de herramientas de diseño para minería por sublevel stoping y su impacto económico en un proyecto minero (Tesis de Magíster en Minería). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Day, P. R. (1965). Particle fractionation and particle-size analysis. In C. A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1* (pp. 545–567). American Society of Agronomy.
- Durand, F., & Aceñolaza, F. (1990). Revisión estratigráfica de la Formación Suncho. Serie Correlación Geológica, INSUGEO, 6, 55–64.
- Dutz, J. (2012). Comportamiento geotécnico de arcillas expansivas: implicancias en diseño de barreras y confinamiento. Informe técnico, Instituto de Geotecnia Aplicada, Alemania
- Dold, B. (2006). Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1–3), 10–13.

- Dold, B. (2008). Sustainability in metal mining: From exploration, over processing to mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7, 275–285.
- Dold, B. (2010). Basic concepts in environmental geochemistry of sulfide mine-waste management. *Waste Management*, 30(7), 1217–1232.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, New York.
- Ferguson KD, Erickson PM, 1988. Pre-mine prediction of acid mine drainage. In: Salomons, W., Forstner, U. (Eds) *Dredged material and mine tailings*. Springer, Berlin.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Flint, A. L., & Flint, L. E. (2002). Particle density. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods* (pp. 229–240). Soil Science Society of America Book Series No. 5.
- Frau, C. (2000). Impacto ambiental de los pasivos mineros en regiones áridas: dinámica de sales y metales en ciclos secos-húmedos. En *Situación Ambiental Argentina 2000* (pp. 145–152). Fundación Vida Silvestre Argentina.
- Hong, J., Aceñolaza, F., y Miller, H. (2001). Dataciones isotópicas en el basamento del noroeste argentino. *Revista Geológica de Chile*, 28(2), 215–230.
- García, M. P. (2018). Caracterización geoquímica de unidades volcánicas en el distrito Farallón Negro. Informe técnico, SEGEMAR.
- González, L. R. (2010). Fuegos sagrados: el taller metalúrgico del sitio 15 de Rincón Chico (Catamarca, Argentina). *Boletín del Museo Chileno de Arte Precolombino*, 47–62.
- Goldberg, S., Lesch, S. M., y Suarez, D. L. (2007). Predicting molybdenum adsorption by soils using soil chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6), 1939–1945.
- González Bonorino, G. (1950). Geología estructural de las Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 5(1), 5–20.

- Hammarstrom, J. M., Sibrell, P. L., & Belkin, H. E. (2005). Characterization of mine waste for predicting acid mine drainage. U.S. Geological Survey Circular 1283. Reston, Virginia: U.S. Department of the Interior.
- Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper.
- Hughes, T., Miller, S., & Robertson, D. (2007). Interpretation of geochemical data for acid-base accounting. In D. J. Robertson & S. Miller (Eds.), Mine Waste Management Guidelines (pp. 45–60). Australian Government Publishing Service.
- Huang, B., Yuan, Z., Li, D., Zheng, M., Nie, X., & Liao, Y. (2020). Effects of soil particle size on the adsorption, distribution, and migration behaviors of heavy metal(loid) in soil: A review. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22, 1596–1615. <https://doi.org/10.1039/D0EM00189A>
- Hedenquist, J. W. (2005). Epithermal gold deposits. In J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards (Eds.), Economic Geology 100th Anniversary Volume (pp. 389–404). Littleton, CO: Society of Economic Geologists.
- Hudson-Edwards, K. A., Jamieson, H. E., & Lottermoser, B. G. (2011). Mine wastes: Past, present, future. *Elements*, 7(6), 375–380.
- INAP (International Network for Acid Prevention). (2003). Global Acid Rock Drainage Guide. <http://www.gardguide.com>
- Jambor, J. L., & Blowes, D. W. (1994). Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes. Mineralogical Association of Canada.
- Jambor, J. L., & Blowes, D. W. (1998). Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes. Mineralogical Association of Canada.
- Jambor, J. L., Blowes, D. W., & Ritchie, A. I. M. (2000). Environmental aspects of mine wastes. Mineralogical Association of Canada, Short Course Volume 31.
- Jennings, S. R., Neuman, D. R., & Blicker, P. S. (2008). Acid mine drainage and effects on fish health and ecology. U.S. Office of Surface Mining.
- Japan International Cooperation Agency (JICA). (1987). Informe técnico sobre exploración geológica y mineralógica en el distrito Farallón Negro, Catamarca, Argentina. Proyecto de cooperación bilateral con YMAD.
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants (4th ed.). CRC Press.
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failures, environmental impacts,

and remediation. Applied Geochemistry, 51, 229–245.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>

- Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry*. Prentice Hall.
- Lindgren, W. (1911). *Mineral Deposits*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Liu, Q., Chen, B., Zhou, Y., et al., 2017. Study on secondary minerals from different sediments in Caoduikeng acid mine drainage, Dabaoshan Mine, north Guangdong province. *Earth Environ.* 45 (3), 259–266.
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3rd ed.). Springer.
- Llambías, E. J. (1972). Estructura del Grupo Volcánico Farallón Negro, Catamarca, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 27, 161–169.
- Llambías, E. J. (2011). Magmatismo y evolución tectónica del Complejo Farallón Negro. Informe técnico, Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), Universidad Nacional de Tucumán.
- MDPI. (2024). Granular soils and contaminant modeling in tailing dams. *Minerals*, 14(11), 1134. <https://doi.org/10.3390/mins14111134>
- Malvicini, L., & Llambías, E. J. (1963). Estudio sobre la mineralización vetiforme en el yacimiento Farallón Negro. Informe técnico interno, Yacimientos Mineros de Agua de Dionisio (YMAD), Catamarca, Argentina.
- Martínez, F., Fogliata, A., Montenegro, N., & Hagemann, S. (2014). Metalogénesis de la veta Farallón Negro rama norte, Farallón Negro, provincia de Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71(4), 553–561.
- Mendez, M. O., & Maier, R. M. (2008). Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—An emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives*, 116(3), 278–283. <https://doi.org/10.1289/ehp.10608>
- MEND (Mine Environment Neutral Drainage). (2001). Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials. Report 1.20.1.
- Meyer, C., & Hemley, J. J. (1967). Wall-rock alteration. In H. L. Barnes (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (pp. 166–235). New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Miller, G. C., Lyons, W. B., & Davis, A. (2003). Understanding the environmental chemistry of cyanide. *Reviews in Environmental Contamination and Toxicology*, 183, 21–54.

- Mirré, C., y Aceñolaza, F. (1972). Geología de la región de Belén, provincia de Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 289–306.
- Muruaga, C. M. (1998). Geología de la Formación Chiquimil en la Sierra de Hualfín, Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 53(2), 123–136.
- Moore, D. M., Reynolds, R. C., & Sposito, G. (2010). *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Nieva, N. E. (2019). Procesos geoquímicos que controlan la dinámica del arsénico en pasivos ambientales mineros (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CONICET–UNC).
- Nordstrom, D. K. (2011). Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. *Applied Geochemistry*, 26(11), 1777–1791.
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. In G. S. Plumlee & M. J. Logsdon (Eds.), *The environmental geochemistry of mineral deposits* (Vol. 6A, pp. 133–160). Society of Economic Geologists.
- Omarini, R., & Baldis, B. (1982). Ambiente sedimentario de la Formación Puncoviscana. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 245–260.
- Ovejero, I. (2007). Mineralogía y relaciones texturales de mena y ganga en depósitos epitermales: ejemplo vetiforme del Complejo Volcánico Farallón Negro, Catamarca. Tesis de Maestría en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales, Universidad Internacional de Andalucía, España.
- Pantorilla, J., & Ávila, R. (1996). Estudio mineralógico y metalogenético del yacimiento Alto de la Blenda, distrito Farallón Negro, (YMAD).
- Parbhakar-Fox, A., & Lottermoser, B. G. (2015). A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*, 82, 107–124.
- Penck, W. (1920). *Morphologische Analyse*. Stuttgart: J. Engelhorn.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transactions of the American Geophysical Union*, 25(6), 914–928.

- Plumlee, G. S., & Logsdon, M. J. (Eds.). (1999). *The environmental geochemistry of mineral deposits. Reviews in Economic Geology*, Vol. 6A. Society of Economic Geologists.
- Price, W. A. (2009). Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials. MEND Report 1.20.1.
- Pope, J., Weber, P., Mackenzie, A., Newman, N., Rait, R., 2010. Correlation of acid base accounting characteristics with the Geology of commonly mined coal measures, West Coast and Southland, New Zealand. *Zeal. J. Geol. Geophy.* 53, 153-166.
- Ribeiro, A. B., Rodríguez-Maroto, J. M., Mateus, E. P., & Ottosen, L. M. (2014). Electrokinetic remediation of organic and inorganic contaminants in soil. In *Electrokinetic remediation for environmental security and sustainability*. Springer.
- Ritchie, A. I. M. (1994). Sulphide oxidation mechanisms: Controls and rates of oxygen transport. In *Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference*.
- Rojas, R. (2000). Geología y metalogénesis del distrito Farallón Negro, provincia de Catamarca. Tesis de Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán.
- Sánchez España, J., & Bozau, E. (2004). Mobilization of trace elements from carbonate-rich mining wastes in the Iberian Pyrite Belt: The role of hydrochemical processes. *Environmental Geology*, 45(7), 1001–1015.
- Sasso, M. (1997). Geoquímica del Complejo Volcánico Farallón Negro. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Juan.
- Sánchez España, J., & Bozau, E. (2004). Mobilization of trace metals from oxidized mine wastes: Influence of mineralogy and geochemical conditions. *Environmental Geology*, 46(4), 563–576.
- Sharma, H. D., & Reddy, K. R. (2004). *Geoenvironmental engineering: Site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies*. Wiley.
- Seggiaro, R., & Becchio, R. (2014). Geomorfología del Cuaternario en el área de Farallón Negro. Informe técnico, SEGEMAR.
- Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). (2018). Informe preliminar de peligrosidad en el Lago Manso y Río Manso Superior 1: Estudio geoambiental Farallón Negro, provincia de Catamarca. Buenos Aires, Argentina.

- Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). (2018). Estudio geoambiental Farallón Negro, provincia de Catamarca. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Ministerio de Desarrollo Productivo, Presidencia de la Nación
- Sillitoe, R. H. (1977). Characteristics and controls of the epithermal precious metal deposits. Geological Society of America Abstracts with Programs.
- Sillitoe, R. H. (1995). Exploration and discovery of epithermal gold–silver deposits: Geological criteria. SEG Newsletter, 23, 1–13.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sillitoe, R. H. (1995). Lithocaps and their significance in epithermal and porphyry exploration. SEG Newsletter, 23, 1–13.
- Sillitoe, R. H. (1989). Gold deposits in western Pacific island arcs: The magmatic connection. In J. A. Whitney & A. J. Naldrett (Eds.), *Ore Deposit Models* (Vol. 6, pp. 90–100). Geological Association of Canada.
- Sister, H. (1965). Estudio microscópico de la mineralización en la zona de Chomnales, Catamarca. Informe técnico, Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD), Catamarca, Argentina.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517–568.
- Smith, A., & Mudder, T. (1991). The environmental geochemistry of tailings. Golder Associates.
- Smith, K. S. (2009). Mineralogical controls on mine drainage chemistry. *Reviews in Engineering Geology*, 17, 97–117.
- Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- Sullivan, P. J., & Dubé, B. (1997). Evaluating the stability of acid-generating mining wastes in arid climates. *Environmental Geology*, 29(1/2), 140–146.
- Stelzner, A. (1885). Beiträge zur Geologie der Argentinischen Republik. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*.

- Schafer, WM., 2000. Use of the net acid generation pH test for assessing risk of acid generation, in: Proceedings from the 5th international conference on acid rock drainage, ICARD. 1, 613–618.
- Stiff, H. A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10), 15–17.
- Tineo, D., y Ruiz, F. (2014). Facies sedimentarias de la Formación Andalhuala en el área de Hualfín. *Revista de Geología del NOA*, 31(2), 145–160.
- Torres, F., Marchevsky, N., & Aguirre, F. (2018). Procesos de destrucción de complejos cianurados. XIV Congreso Argentino de Metalurgia y Ciencia de los Materiales (SAM–UNLP), Universidad Nacional de Cuyo.
- Turner, J. C. M. (1962). Estratigrafía del noroeste argentino. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias*, 43, 1–30.
- Turner, J. C. M. (1971). Geología del noroeste argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 26(1), 1–30.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2017). Regional Screening Levels (RSLs) for Chemical Contaminants in Soil. Retrieved from <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls>
- USDA (United States Department of Agriculture). (2004). Soil survey laboratory methods manual. *Soil Survey Investigations Report No. 42*, Version 4.0.
- WHO (World Health Organization). (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the first addendum).
- Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

ANEXOS

ANEXO 1 – Balance Iónico

Tabla 13: Balance Iónico Estación Seca año 2003.

Punto de Muestreo	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Alcalinidad Total Lab, (CaCO ₃) (mg/L)	Σ cat, (meq/L)	Σ an, (meq/L)	(Σ cat - Σ an) x 100/ (Σ cat + Σ an) = <5%
FN – 1	138,00	17,00	635,00	18,00	27,00	1814,00	69,00	39,67	39,93	0
FN – 2	361,00	11,00	179,00	19,00	86,00	900,00	270,00	26,49	26,57	0
FN – 3	549,00	16,00	110,00	15,00	150,00	922,00	350,00	31,01	30,43	1
FN – 4	533,00	16,00	103,00	15,00	142,00	928,00	315,00	29,97	29,63	1
FN – 5	195,00	7,00	37,00	5,50	72,00	67,00	350,00	10,96	10,42	3

Tabla 14: Balance Iónico Estación Húmeda año 2003.

Punto de Muestreo	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Alcalinidad Total Lab, (CaCO ₃) (mg/L)	Σ cat, (meq/L)	Σ an, (meq/L)	(Σ cat - Σ an) x 100/ (Σ cat + Σ an) = <5%
FN – 2	352,00	12,00	161,00	16,00	100,00	799,00	285,00	24,98	25,16	0
FN – 3	519,00	17,00	105,00	13,00	147,00	931,00	313,00	29,32	29,80	1
FN – 4	529,00	17,00	107,00	13,00	153,00	941,00	318,00	29,85	30,27	1
FN – 5	204,00	10,00	64,00	6,10	102,00	83,00	421,00	12,83	13,02	1

Tabla 15: Balance Iónico Estación Seca año 2017.

Punto de Muestreo	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Alcalinidad Total Lab, (CaCO ₃) (mg/L)	Σ cat, (meq/L)	Σ an, (meq/L)	(Σ cat - Σ an) x 100/ (Σ cat + Σ an) = <5%
FN – 1	21,00	11,00	136,00	4,70	9,20	290,00	111,00	8,38	8,52	1
FN – 2	454,00	12,00	142,00	19,00	136,00	998,00	330,00	28,71	31,22	4
FN – 3	533,00	17,00	70,00	16,00	171,00	971,00	303,00	28,43	31,11	5
FN – 4	512,00	17,00	89,00	16,00	162,00	990,00	299,00	28,46	31,17	5
FN – 5	125,00	7,70	51,00	5,40	61,00	81,00	247,00	8,63	8,35	2

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE RESIDUOS MINEROS DE FARALLÓN NEGRO

Tabla 16: Balance Iónico Estación Húmeda año 2017.

Punto de Muestreo	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Alcalinidad Total Lab, (CaCO ₃) (mg/L)	Σ cat, (meq/L)	Σ an, (meq/L)	(Σ cat - Σ an) x 100 / (Σ cat + Σ an) = <5%
FN - 2	476,00	16,00	147,00	22,00	131,00	907,00	268,00	30,27	27,95	4
FN - 3	519,00	21,00	87,00	17,00	147,00	878,00	325,00	28,85	28,93	0
FN - 4	522,00	21,00	86,00	16,00	151,00	896,00	284,00	28,85	28,60	0
FN - 5	206,00	11,00	41,00	7,00	107,00	109,00	379,00	11,86	12,86	4

ANEXO 2 – Cálculo de Método de Pipeteo

Tabla 17: Resultados de extracciones secuenciales, muestra Botadero 1 Residuo.

Botadero 1 Residuo					
Tiempo de Extracción	Muestra + Capsula (gr)	Capsula (gr)	Muestra Seca (gr)	Muestra en 10ml	Muestra 1000ml
22 seg	43,9772	38,9771	43,9618	0,0154	1,54
3:52 horas	28,3634	23,3633	28,3536	0,0098	0,98

Cálculo de Porcentajes

1) Porcentaje de Arena

$$\%A = 34 \%$$

2) Porcentaje de Arcilla

$$\% Y = 27,4 \%$$

3) Porcentaje de Limo

$$100 - 34 \% - 27,4 \% = 38,6 \%$$

$$\%L = 38,6 \%$$

Tabla 18: Resultados de extracciones secuenciales, muestra Botadero 2 Lodo.

Botadero 2 Lodo					
Tiempo de Extracción	Muestra + Capsula (gr)	Capsula (gr)	Muestra Seca (gr)	Muestra en 10ml	Muestra 1000ml
22 seg	40,1109	35,1099	40,0806	0,0303	3,03
3:52 horas	38,3516	33,3506	38,3374	0,0142	1,42

Cálculo de Porcentajes

1) Porcentaje de Arena

$$\%A = 39,4 \%$$

2) Porcentaje de Arcilla

$$\% Y = 28,4 \%$$

3) Porcentaje de Limo

$$100 - 39,4 \% - 28,4 \% = 32,2 \%$$

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE RESIDUOS MINEROS DE FARALLÓN NEGRO

Tabla 19: Resultados de extracciones secuenciales, muestra Botadero 3.

Botadero 3					
Tiempo de Extracción	Muestra + Capsula (gr)	Capsula (gr)	Muestra Seca (gr)	Muestra en 10ml	Muestra 1000ml
22 seg	39,3676	34,366	39,3512	0,0164	1,64
3:52 horas	38,9250	33,9234	38,9148	0,0102	1,02

Cálculo de Porcentajes

1) Porcentaje de Arena

$$\%A = 67,2 \%$$

2) Porcentaje de Arcilla

$$\% Y = 20,4 \%$$

3) Porcentaje de Limo

$$100 - 39,4 \% - 28,4 \%$$

$$\%L = 12,4 \%$$

Tabla 20: Resultados de extracciones secuenciales, muestra D.R. 1 – Sed Fondo Seco.

D.R.1 – Sed. Fondo Seco					
Tiempo de Extracción	Muestra + Capsula (gr)	Capsula (gr)	Muestra Seca (gr)	Muestra en 10ml	Muestra 1000ml
22 seg	28,3909	23,3903	28,3705	0,0204	2,04
3:52 horas	43,9801	38,9795	43,9719	0,0082	0,82

Cálculo de Porcentajes

1) Porcentaje de Arena

$$\%A = 59,2 \%$$

2) Porcentaje de Arcilla

$$\% Y = 16,4 \%$$

3) Porcentaje de Limo

$$100 - 59,2 \% - 16,4 \% \quad \%L = 24,4 \%$$

Tabla 21: Resultados de extracciones secuenciales, muestra D.R. 2 – Sed Fondo.

D.R.2 – Sed. Fondo					
Tiempo de Extracción	Muestra + Capsula (gr)	Capsula (gr)	Muestra Seca (gr)	Muestra en 10ml	Muestra 1000ml
22 s	47,1266	42,1256	47,0966	0,03	3,00
3:52 hs	46,1211	41,1201	46,1162	0,0049	0,49

Cálculo de Porcentajes

1) Porcentaje de Arena

$$\% A = 40,01 \%$$

2) Porcentaje de Arcilla

$$\% Y = 9,80 \%$$

3) Porcentaje de Limo

$$100 - 40,01 \% - 9,80 \% \quad \%L = 50,19 \%$$

Tabla 22: Resultados de extracciones secuenciales, muestra Sed. DI Superior.

Sed. DI. Sup					
Tiempo de Extracción	Muestra + Capsula (gr)	Capsula (gr)	Muestra Seca (gr)	Muestra en 10ml	Muestra 1000ml
22 seg	47,6012	42,6011	47,5809	0,0203	2,03
3:52 horas	47,1099	42,1098	47,0981	0,0118	1,18

Cálculo de Porcentajes

1) Porcentaje de Arena

$$\%A = 59.4 \%$$

2) Porcentaje de Arcilla

$$\% Y = 23.6 \%$$

3) Porcentaje de Limo

$$100 - 59.4 \% - 23.6 \%$$

$$\%L = 17 \%$$

Tabla 23: Resultados de extracciones secuenciales, muestra Sed. DI Inferior.

Sed. DI. Inferior					
Tiempo de Extracción	Muestra + Capsula (gr)	Capsula (gr)	Muestra Seca (gr)	Muestra en 10ml	Muestra 1000ml
22 seg	38,3706	33,3706	38,3376	0,033	3,3
3:52 horas	42,3540	37,354	42,3403	0,0137	1,37

Cálculo de Porcentajes

1) Porcentaje de Arena

$$\%A = 34 \%$$

2) Porcentaje de Arcilla

$$\% Y = 27.4 \%$$

3) Porcentaje de Limo

$$100 - 34 \% - 27.4 \%$$

$$\%L = 38.6 \%$$

Tabla 24: Resultados de extracciones secuenciales, muestra Residuo Botadero Antiguo.

Residuo Botadero Antiguo					
Tiempo de Extracción	Muestra + Capsula (gr)	Capsula (gr)	Muestra Seca (gr)	Muestra en 10ml	Muestra 1000ml
22 seg	46,1514	41,1511	46,1198	0,0316	3,16
3:52 horas	47,5833	42,5830	47,5642	0,0191	1,91

Cálculo de Porcentajes

1) Porcentaje de Arena

$$\%A = 36.8 \%$$

2) Porcentaje de Arcilla

$$\% Y = 39.8 \%$$

3) Porcentaje de Limo

$$100 - 28.2 \% - 19.8 \% = 52 \%$$

$$\%L = 23.4 \%$$

ANEXO 3 – Cálculo de Densidad

Tabla 25: Resultados del cálculo de Peso Específico Real-Densidad.

Muestra	Bot. 1	Bot. 2	Bot. 3	D.R.1	D.R.2	DI Sup.	DI Inf.	Bot. Ant
M	24,26	24,26	24,27	24,26	24,26	24,25	24,27	24,28
P	22,27	22,26	22,25	22,26	22,26	22,26	22,27	22,28
W	46,89	47,01	46,84	46,79	46,96	46,79	46,97	46,93
S	48,14	48,10	47,94	47,88	47,90	48,15	48,13	47,85
ρ (gr/cc)	2,68	2,18	2,20	2,19	1,90	3,14	2,39	1,86

ANEXO 4 – Composición Química

Tabla 26: Datos de la composición química realizados por espectrofotómetro de absorción atómica en la FTyCA (<LD (debajo del límite de detección)).

Muestras	Fe	Zn	Mn	Cu	Pb	As
	ppm					
Bot, 1	257,1	9,02	435,5	0,76	3,49	<LD
Bot, 2	382,2	16,62	963,2	1,75	5,69	<LD
Bot, 3	338,2	24,72	508,8	1,20	10,08	<LD
Bot. Ant	645,3	14,13	891,8	1,06	8,70	100
DI Sup	174,9	17,64	653,9	1,85	6,33	<LD
DI Inf	776,1	31,84	744,2	1,91	6,95	<LD
DR1	653,1	15,45	233,1	0,87	4,54	<LD
DR2	312,2	8,89	140,2	0,85	4,75	<LD

Tabla 27: Datos de composición química en ug/g proporcionados por la empresa minera.

Muestras	Pb	Mo	Cr	Cu	Zn	Cd	As
	ppm						
DI Sup.	581	5,45	9,53	52,1	517	1,64	752
D.R.2	415	1,02	3,21	28,7	806	1,54	115
DI Inf.	262	2,02	6,31	6,31	543	0,9	209
Bot. 2	463	3,17	5,56	58,3	2240	12,6	126
Bot. 1	419	2,54	7,05	41,5	841	1,49	42,8

ANEXO 5 – Cálculos de Carbonatos

Tabla 28: Datos para cálculo de porcentaje de carbonato presente en las muestras.

Muestra	Peso	V _{HCl}	N _{HCl}	V _{NaOH}	N _{NaOH}	% CaCO ₃
D.R.2	5,0026	20,00	0,5	3,2	0,25	49,20
D.R. 1	5,0017	20,00	0,5	3,7	0,25	49,08
D.I Sup.	5,0012	20,00	0,5	1,2	0,25	49,70
D.I Inf.	5,0009	20,00	0,5	0,9	0,25	49,78
Bot. 1	5,0018	20,00	0,5	0,2	0,25	49,95
Bot. 2	5,0010	20,00	0,5	1,1	0,25	49,73
Bot. 3	5,0003	20,00	0,5	1,0	0,25	49,75
Bot. Ant	5,0012	20,00	0,5	2,2	0,25	49,45

ANEXO 6 – Porcentajes de Fases Minerales

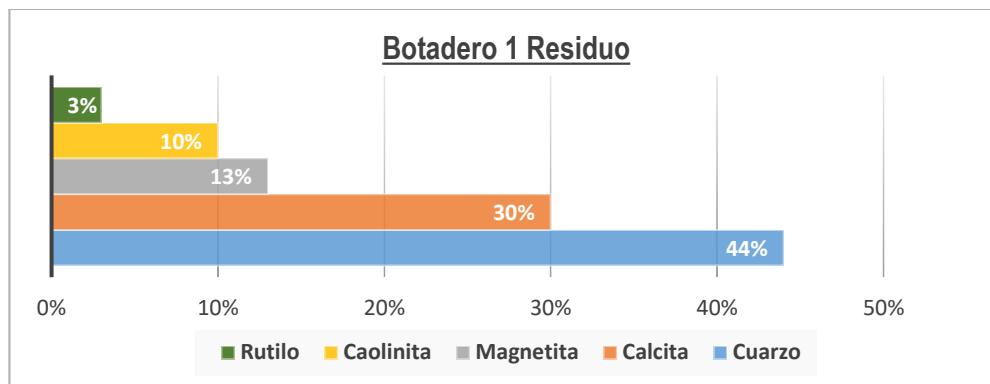


Figura 32: Porcentaje de fases minerales en Botadero 1 Residuo.

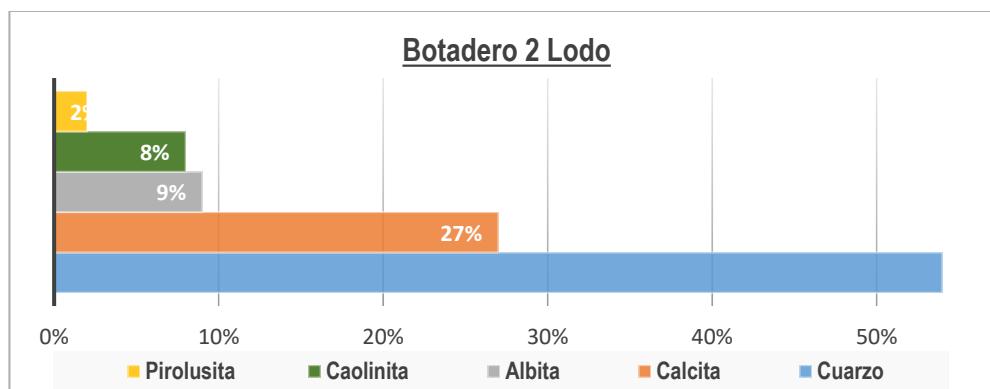


Figura 33: Porcentaje de fases minerales en Botadero 2 Lodo.

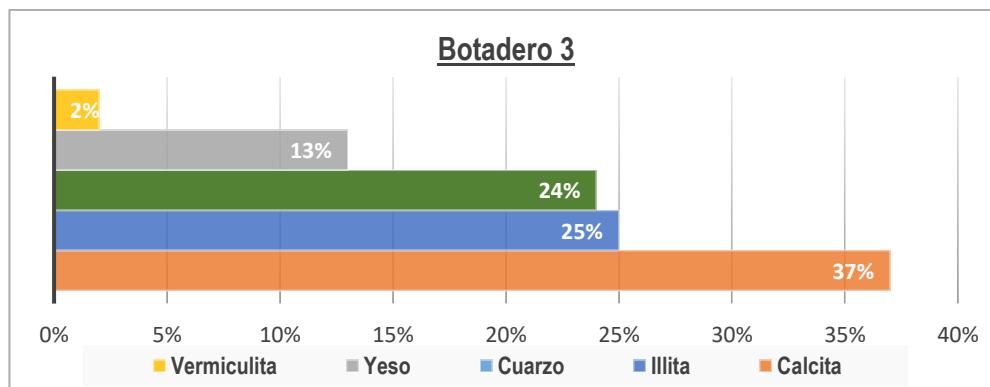


Figura 34: Porcentaje de fases minerales en Botadero 3.

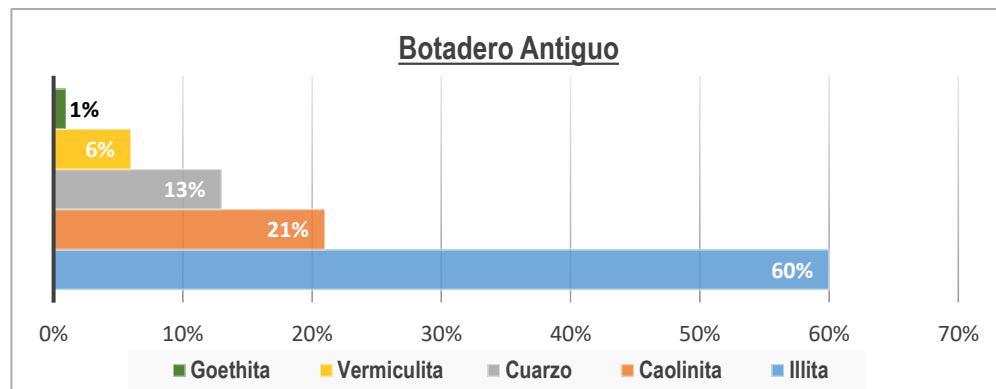


Figura 35: Porcentaje de fases minerales en Botadero Antiguo.

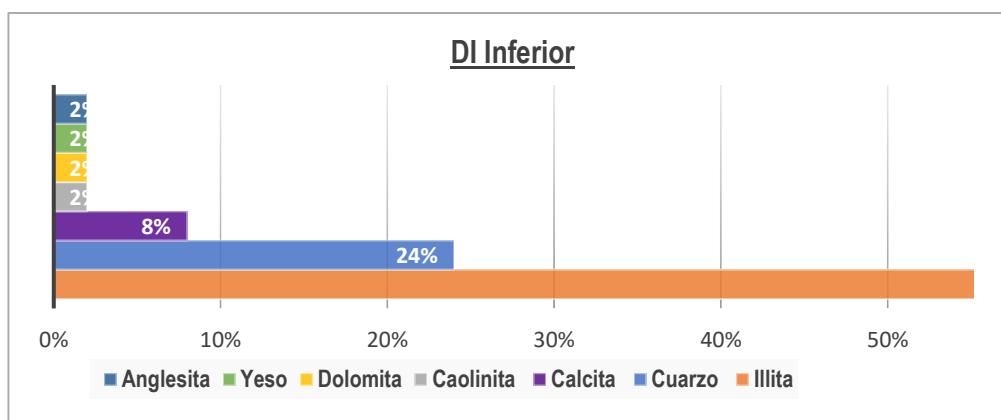


Figura 36: Porcentaje de fases minerales en Dique Intermedio (nivel inferior).

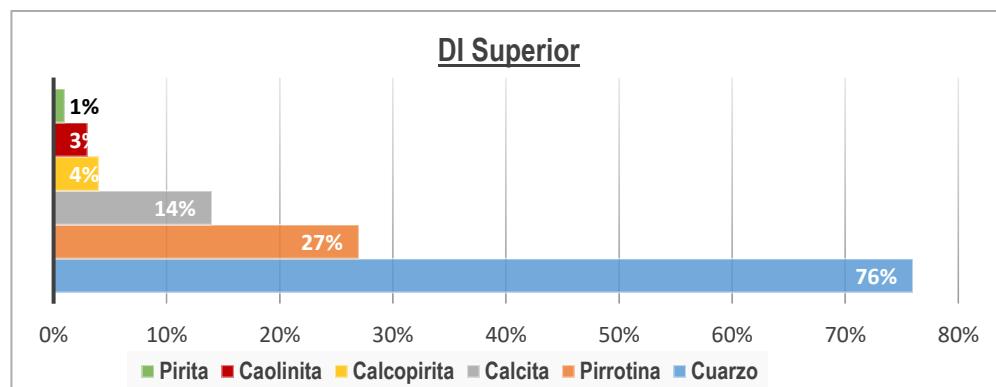


Figura 37: Porcentaje de fases minerales en Dique Intermedio (nivel superior).

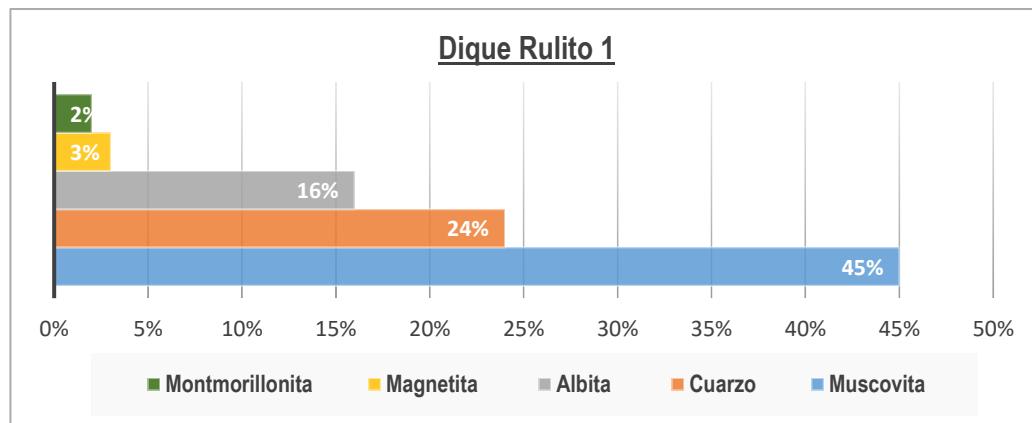


Figura 38: Porcentaje de fases minerales en Dique Rulito 1.

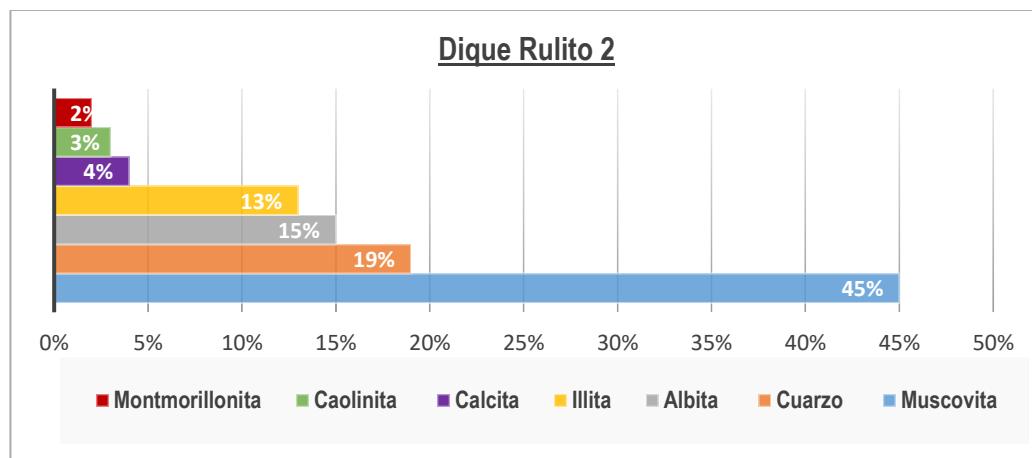


Figura 39: Porcentaje de fases minerales en Dique Rulito 2.