



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS APLICADAS



**“APOORTE A LA EVALUACIÓN DEL RIESGO
AMBIENTAL A PARTIR DE LA
CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA
DE SEDIMENTOS DEL RÍO VIS VIS-AMANAO,
CATAMARCA”**

TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA EN GEOLOGÍA

LUCIANA GISEL CORONEL

2025

DIRECTOR: DRA. NANCY EUGENIA NIEVA CO DIRECTOR: DR. JUAN MARTIN
HERNÁNDEZ



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS APLICADAS
LICENCIATURA EN GEOLOGÍA**

Trabajo Final de Licenciatura en Geología

**“Aporte a la evaluación del riesgo
ambiental a partir de la caracterización
química y mineralógica de sedimentos del
Río Vis Vis-Amanao, Catamarca”**

Coronel, Luciana Gisel

M.U. N° 00624

Director:

Dra. Nancy Eugenia Nieva

Co Director:

Dr. Juan Martin Hernández

San Fernando del Valle de Catamarca

Agosto de 2025

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento, en primer lugar, a mi familia. A mis padres, por haberme dado la mejor herencia que uno puede recibir: la posibilidad de estudiar y forjar un mejor futuro. A mis hermanos, cuñados, y sobrinos, gracias por su apoyo incondicional y por estar siempre presentes.

A mi pareja, Gabriel, gracias por tu acompañamiento constante, por tus valiosos aportes no solo en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi vida. Tu amor, comprensión y aliento han sido fundamentales en este camino.

También agradezco a mis tíos y primos, por ser parte de cada paso que he dado. Su presencia y cariño han significado mucho para mí.

Deseo expresar mi especial agradecimiento a mi directora de tesis, Dra. Eugenia Nieva, por su experiencia, dedicación, comprensión y paciencia, que fueron clave en este complejo y enriquecedor camino de la investigación. Al Dr. Juan Hernández, mi más sincero reconocimiento por su constante apoyo, por los comentarios constructivos que permitieron mejorar este trabajo y por su capacidad para motivarme a seguir adelante. A la futura colega Candelaria, gracias por tu colaboración y por el apoyo en la realización de los ensayos.

A mis compañeros de facultad, gracias por cada palabra de aliento en los momentos necesarios, por los debates compartidos y por contribuir a mi formación. A mis compañeros de trabajo, por acompañarme en este proceso y brindarme la flexibilidad necesaria para continuar con mis estudios.

A mis amigos de la vida, por acompañarme en momentos de estrés y alegría de este largo camino. A Elsa Agüero, por su apoyo constante, su buena luz y energía que me acompañaron estos años.

A la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, por ofrecerme el espacio, los recursos y el instrumental necesarios para desarrollar mi trabajo. Su apoyo fue fundamental para alcanzar los resultados obtenidos.

A mis profesores, por su guía constante a lo largo de estos años, por compartir conocimientos y generar discusiones enriquecedoras que fueron clave en esta etapa.

Por último, a la Universidad Nacional de Catamarca, gracias por haberme brindado la oportunidad de formarme como profesional. Culmino esta etapa con profunda gratitud y orgullo, sabiendo que cada esfuerzo ha valido la pena.

RESUMEN

El presente estudio se desarrolló en la cuenca del río Vis Vis-Amanao, situada en el ámbito del Complejo Volcánico Farallón Negro (Catamarca), una región de intensa actividad minera caracterizada por la explotación de depósitos de sulfuros y pórfidos metalíferos. La interacción entre el contexto geológico, las alteraciones hidrotermales y las actividades antrópicas generan un entorno con potencial vulnerabilidad a la contaminación por metales pesados. El objetivo principal fue caracterizar química y mineralógicamente los sedimentos de corriente del río Vis Vis-Amanao, con el fin de aportar al diagnóstico de la dinámica geoquímica de la cuenca y contribuir a la evaluación del riesgo ambiental asociado a la presencia de metales.

Para ello, se realizaron muestreos de sedimentos en ocho sitios de la cuenca y un sitio de control externo. En laboratorio se determinaron pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, carbonatos, silicatos, capacidad de intercambio catiónico y mineralogía mediante difracción de rayos X. Asimismo, se analizaron los contenidos de metales por técnicas de INAA y AAS. Los índices de geoacumulación (Igeo) y riesgo ecológico (Er, RI) se emplearon para contextualizar el impacto ambiental potencial. Además, se procesaron y compararon registros hidroquímicos históricos y recientes del agua superficial.

Los resultados indican que los sedimentos están compuestos por fases primarias (cuarzo, micas, plagioclasas) y secundarias (arcillas, calcita, talco), en concordancia con la evolución geológica y los procesos de alteración hidrotermal. La interacción sedimento-agua está modulada por condiciones levemente alcalinas, valores variables de conductividad y la capacidad de adsorción de los sedimentos. Las concentraciones más altas de Cu, Zn, Pb, Mn y As se detectaron en la cuenca alta, en asociación con zonas mineralizadas y aportes hidrotermales, con una tendencia a la disminución aguas abajo. El Igeo indicó niveles moderados a fuertes de contaminación por Cu y Zn en sitios puntuales, y contaminación moderada por As en determinadas áreas. El índice de riesgo ecológico (RI) global fue bajo en toda la cuenca.

En conclusión, el sistema presenta un bajo riesgo ecológico en general, aunque persisten sectores donde las concentraciones de ciertos metales son elevadas. La distribución espacial de los metales sugiere que su enriquecimiento podría estar influenciado por fuentes naturales propias del contexto geológico. Los sedimentos actúan como reservorios de metales, limitando su movilidad en la columna de agua. Sin embargo, las concentraciones de As disuelto superan los valores permitidos para el consumo humano, y los elevados niveles de salinidad limitan el uso del recurso hídrico. La estabilidad observada en la composición iónica y los parámetros fisicoquímicos del agua sugiere un sistema relativamente equilibrado, aunque se considera necesario mantener un monitoreo continuo para detectar posibles cambios en el riesgo ambiental.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. OBJETIVOS.....	10
1.1.1. OBJETIVO GENERAL.....	10
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	10
1.2.1. UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO.....	10
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	13
CAPÍTULO II.....	14
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1.1. ANTECEDENTES DEL ÁREA, ESTUDIOS PREVIOS Y LÍNEA DE BASE..	15
2.1.1.1. HISTORIA DE EXPLOTACIÓN DE MINERA ALUMBRERA Y TIPO DE MINERALIZACIÓN.....	15
2.1.1.2. ESTUDIOS PREVIOS Y LÍNEA DE BASE.....	15
2.1.1.3. ESTUDIOS SEDIMENTOLÓGICOS Y GEOQUÍMICOS EN LA CUENCA VIS VIS-AMANA O.....	17
2.1.2. DINÁMICA DE LOS SEDIMENTOS DE CORRIENTE COMO INDICADORES AMBIENTALES.....	18
2.1.2.1. FORMACIÓN TRANSPORTE Y DEPOSICIÓN DE LOS SEDIMENTOS ..	18
2.1.2.2. PAPEL DE LOS SEDIMENTOS EN LA RETENCIÓN Y LIBERACIÓN DE METALES.....	19
2.1.2.3. SEDIMENTOS COMO REGISTROS GEOQUÍMICOS DEL IMPACTO AMBIENTAL.....	20
2.1.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE SEDIMENTOS.....	20
2.1.3.1. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS RELEVANTES: PH, CONDUCTIVIDAD, MATERIA ORGÁNICA.....	21
2.1.4. RIESGO AMBIENTAL Y RIESGO ECOLÓGICO EN AMBIENTES AFECTADOS POR MINERÍA.....	22
2.1.4.1. CONCEPTO Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO AMBIENTAL.....	22
CAPÍTULO III.....	24
3. MARCO GEOLÓGICO.....	25
3.1. GEOLOGÍA REGIONAL DE LAS SIERRAS PAMPEANAS.....	25
3.2. GEOLOGÍA LOCAL.....	27
3.3. GEOMORFOLOGÍA.....	36
3.4. TECTÓNICA.....	37
CAPÍTULO IV.....	38

4. METODOLOGÍA	39
4.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PREVIA	39
4.2. MUESTREO Y TRATAMIENTO DE LA MUESTRA	39
4.3. ANÁLISIS DE PARÁMETROS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS	43
4.3.1. DETERMINACIÓN DE PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	43
4.3.2. ANÁLISIS DE SILICATOS	45
4.3.3. ANÁLISIS DE MATERIA ORGÁNICA	48
4.3.4. ANÁLISIS DE CARBONATOS	50
4.3.5. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC)	52
4.3.6. DETERMINACIÓN MINERALÓGICA MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X	54
4.3.7. ANÁLISIS DEL CONTENIDO METAL/OID/ES	54
4.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	55
4.5. ELABORACIÓN CARTOGRÁFICA	55
4.5.1. CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA	56
4.5.2. CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA	56
4.6. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA	56
4.6.1. VALIDACIÓN DE INFORMACIÓN	57
4.6.2. PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN	57
4.7. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA	59
4.8. REDACCIÓN DEL INFORME FINAL	59
CAPÍTULO V	60
5. RESULTADOS	61
5.1. PARÁMETROS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS EN SEDIMENTOS DE CORRIENTE	61
5.1.1. PH	61
5.1.2. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) (mS/cm)	62
5.1.3. CONTENIDO DE SILICATOS	63
5.1.4. CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA	64
5.1.5. CONTENIDO DE CARBONATOS	65
5.1.6. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC)	66
5.1.7. CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALOGÍA	67
5.1.8. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE CORRIENTE	68
5.1.9. ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN (IGEO)	70
5.1.10. RIESGO ECOLÓGICO POTENCIAL DE ELEMENTOS PELIGROSOS (ER) E ÍNDICE DE RIESGO ECOLÓGICO (RI)	71

5.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL AGUA DEL RÍO VIS VIS-AMANAQ	72
5.2.1. PARÁMETROS QUÍMICOS ANALIZADOS.....	72
5.2.2. CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA	74
CAPÍTULO VI.....	76
6. DISCUSIÓN.....	77
CAPÍTULO VII.....	88
7. CONCLUSIONES.....	89
7.1. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS.....	90
7.2. BIBLIOGRAFÍA.....	92
7.3. ANEXOS.....	106



CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El área de estudio se encuentra dentro del complejo volcánico Farallón Negro (CVFN), el cual se emplazó a fines del Terciario (Mioceno superior) dando origen a yacimientos vetiformes y de tipo pórfidos de cobre epitermal. Estas zonas de mineralización, están ubicadas en la caldera de un estrato-volcán erodado (Llambías, 1970) poseen en la zona central y noroeste los yacimientos epitermales, Farallón Negro, Alto de la Blenda, Agua Tapada, Santo Domingo, La Josefa y Morro Bola, cuyas vetas están constituidas por filones de cuarzo y carbonatos conteniendo minerales de Au, Ag y Mn (JICA, 1987; Pantorrilla, 1995). En la zona periférica se emplazan los yacimientos tipo pórfidos a los que se asocia la mineralización metálica de Cu, Mo y Au, en Las Pampitas, El Durazno, Cerro Atajo, Bajo San Lucas, Agua Rica y Bajo de la Alumbraera.

Entre ellos, Bajo de la Alumbraera es un yacimiento de tipo pórfido al que se asocia la mineralización metálica de Cu, Mo y Au. La explotación de este yacimiento se realizó mediante un megaproyecto de extracción a cielo abierto, conocido como mina Bajo de la Alumbraera, el cual se encuentra actualmente en la fase de cierre de mina.

Otro sector relevante para este trabajo es el depósito de hierro Visvil, el cual se ubica en las adyacencias del río Vis Vis, y está compuesto por hematita y cuarzo, asociado a esquistos verdes (Lannefors, 1929).

La actividad minera es una de las principales fuentes de contaminación metálica a nivel mundial (Panagos et al., 2013; Touceda-González et al., 2017), siendo los principales focos los acopios de material estéril (residuos de la operación extractiva) y las colas o relaves (residuos de la planta de procesamiento). De no contar con un correcto tratamiento, estos materiales pueden quedar expuestos a los agentes climáticos y sufrir dispersión de sus componentes por medios físicos (erosión, transporte eólico, pluvial) más allá de la mina y generar un impacto sobre el ambiente (Nordstrom y Alpers, 1999).

La explotación de los depósitos de sulfuros masivos en el CVFN implica la remoción de enormes cantidades de materiales para la extracción de la mena. El residuo generado es rico en metales y metaloides que no son extraídos con fines comerciales y que se acumulan en dos tipos de depósitos, escombreras y diques de colas (Lottermoser y Ashley, 2006). Por tanto, la finalización del proceso extractivo minero implica, entre otros, el tratamiento adecuado de los residuos generados, para su control y disposición final como pasivos ambientales.

El río Vis Vis-Amanao tiene sus nacientes en el Bajo de la Alumbraera, es coincidente por tramos con la traza de una falla que desplaza rocas del basamento y conecta la zona donde se encuentran las labores mineras con el valle del río. El mismo desagua en el sector norte de la cuenca intermontana Salar de Pipanaco recorriendo una distancia aproximada de 45 km. con dirección NNO-SSE. Desde el dique de colas de Minera Alumbraera hasta las fuentes termales no escurre agua superficial por el río Vis Vis-Amanao debido a que el agua fluye por el manto aluvial del río. Los restos del antiguo baño termal se encuentran en la margen derecha del río Vis Vis-Amanao. Desde los baños termales hacia el Sur el agua escurre superficialmente por tramos (debido al escaso espesor del manto aluvial y afloramiento del manto rocoso) y otras veces fluye en el manto aluvial cuando éste tiene mayor espesor.

Este baño termal, es conocido como fuente de Vis Vis y su clasificación sería “agua mesotermal sulfatada - clorurada - alcalina bicarbonatada débil - sódica - cálcica, de mineralización media e hipotónica” con 33.8°C (Carrizo, 2013).

El clima en la región se caracteriza por ser árido y cálido. Las precipitaciones son muy escasas, del orden de los 150 a 300 mm anuales, con una fuerte concentración estival. Los vientos más frecuentes provienen del cuadrante NE. La vegetación es propia de la Provincia Fitogeográfica del Monte, Dominio Chaqueño, Región Neotropical (Morlans, 1995).

Debido a la presencia de fallas se registra una importante zona de fracturación que incrementa la permeabilidad de las rocas aumentando la capacidad de circulación de fluidos. Según Kirschbaum y Seggiaro (2011), desde el punto de vista hídrico, Minera Alumbreira influye sobre la cuenca del río Vis Vis-Amanao, en cuya cabecera se encuentra el dique de colas.

A partir de un análisis comparativo de los sedimentos de corriente entre los años 1970 y 2000 muestra un aumento generalizado en los contenidos de cationes Cu, Pb y Zn, con factores de incremento de 1,8, 2,4 y 1,3 respectivamente, y un incremento aún más marcado en los aniones, especialmente en sulfatos (x7,4) y cloruros (x3,5). Este aumento se interpreta como un posible efecto combinado de procesos naturales, como la alteración hidrotermal en la zona de Los Jejenes, y actividades antrópicas, como la influencia del dique de colas de Mina Alumbreira. Se destaca que el aumento de sulfatos puede favorecer la movilidad de Cu y Zn, mientras que tiende a inmovilizar el Pb como sal insoluble. Aunque los valores absolutos aún no son alarmantes, se recomienda un monitoreo continuo para detectar cambios que puedan comprometer la calidad ambiental de la cuenca (Secretaría de Minería Catamarca, 2001).

En aguas receptoras con pH neutro, los metales derivados de actividades mineras y procesamiento de minerales tienden a tener baja solubilidad y fuerte afinidad por las fases sólidas. Estas propiedades conducen a la pérdida de metales de la fase acuosa mediante precipitación y adsorción en los sedimentos, lo que reduce la toxicidad de los metales para los peces y otros organismos acuáticos en la columna de agua. Sin embargo, los metales asociados con precipitados y partículas suspendidas pueden acumularse en altas concentraciones en los sedimentos del lecho, lo que lleva a una exposición elevada a los metales y posibles efectos tóxicos en los organismos bentónicos, principalmente los macroinvertebrados bentónicos. Los efectos tóxicos de los sedimentos contaminados con metales sobre los invertebrados bentónicos (que viven en sedimentos) pueden dar como resultado una reducción de la productividad de los invertebrados y/o la pérdida de taxones sensibles a los metales (Canfield et al., 1994). Además, la acumulación de altos niveles en invertebrados tolerantes a los metales puede plantear riesgos de toxicidad dietética para los peces u otros depredadores (Cain et al., 2004). Debido a que estos efectos de los sedimentos contaminados en la biota pueden extenderse mucho más abajo de las fuentes de metales, caracterizar la gravedad y la extensión regional de los efectos puede ser un componente importante del monitoreo regulatorio, las evaluaciones de sitios y la restauración ecológica.

A pesar de los numerosos estudios que cubren cuestiones ambientales relacionadas con la contaminación por el drenaje ácido de minas, se necesita un mejor estudio de la toxicidad de los sedimentos de corrientes en esta región para evaluar el riesgo potencial asociado

con las áreas mineras. Por tal motivo, el presente estudio busca contribuir al análisis de la dinámica biogeoquímica y al diagnóstico del riesgo ambiental en un área minera metalífera tan importante como lo es el CVFN.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar química y mineralógicamente los sedimentos de corriente para contribuir al análisis de la dinámica biogeoquímica y a la evaluación del riesgo ambiental por metales pesados en el río Vis Vis.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para llevar a cabo el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las posibles fases portadoras de metales en los sedimentos de corriente a partir de su caracterización química y mineralógica.
- Evaluar el riesgo ecológico teniendo en cuenta el contenido elemental y los parámetros químicos (pH, conductividad, carbonatos, silicatos y materia orgánica).
- Determinar la interacción sedimento-agua comparando los resultados geoquímicos de las muestras de sedimentos de corriente con datos de calidad de agua.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.2.1. UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio se localiza en el sector centro-oeste de la provincia de Catamarca, dentro del departamento Andalgalá (Figura 1). Geográficamente, se sitúa en las coordenadas 27°18'00" de latitud sur y 66°35'10" de longitud oeste, a una altitud de 2.406 m.s.n.m.

La cuenca del río Vis Vis-Amanao es accesible desde la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca a través de la Ruta Nacional 38, atravesando las localidades de Miraflores, Capayán, Huillapima y Chumbicha, hasta empalmar con la Ruta Nacional 60. Desde allí, se cruza la Quebrada de La Cébila y se continúa por la Ruta Provincial N° 46, pasando por El Pajonal, Siján, Saujil, Colpes y Mollecito, hasta arribar al departamento Andalgalá. Desde la ciudad de Andalgalá, se sigue por la misma Ruta Provincial N° 46 y se toma un desvío hacia la derecha que conduce a la localidad de Amanao, situada en las cercanías de la cuenca en estudio.

Como alternativa, también es posible acceder al área desde la Ruta Nacional 60, continuando desde la salida de la Quebrada de La Cébila hacia el norte, pasando por Aimogasta. En las inmediaciones de Cerro Negro se empalma con la Ruta Nacional 40, que permite el ingreso al departamento Belén. Desde la ciudad de Belén, se accede a la Ruta Provincial N° 46, y tras un desvío hacia la izquierda, se toma el camino que conduce a Amanao (Figura 2).

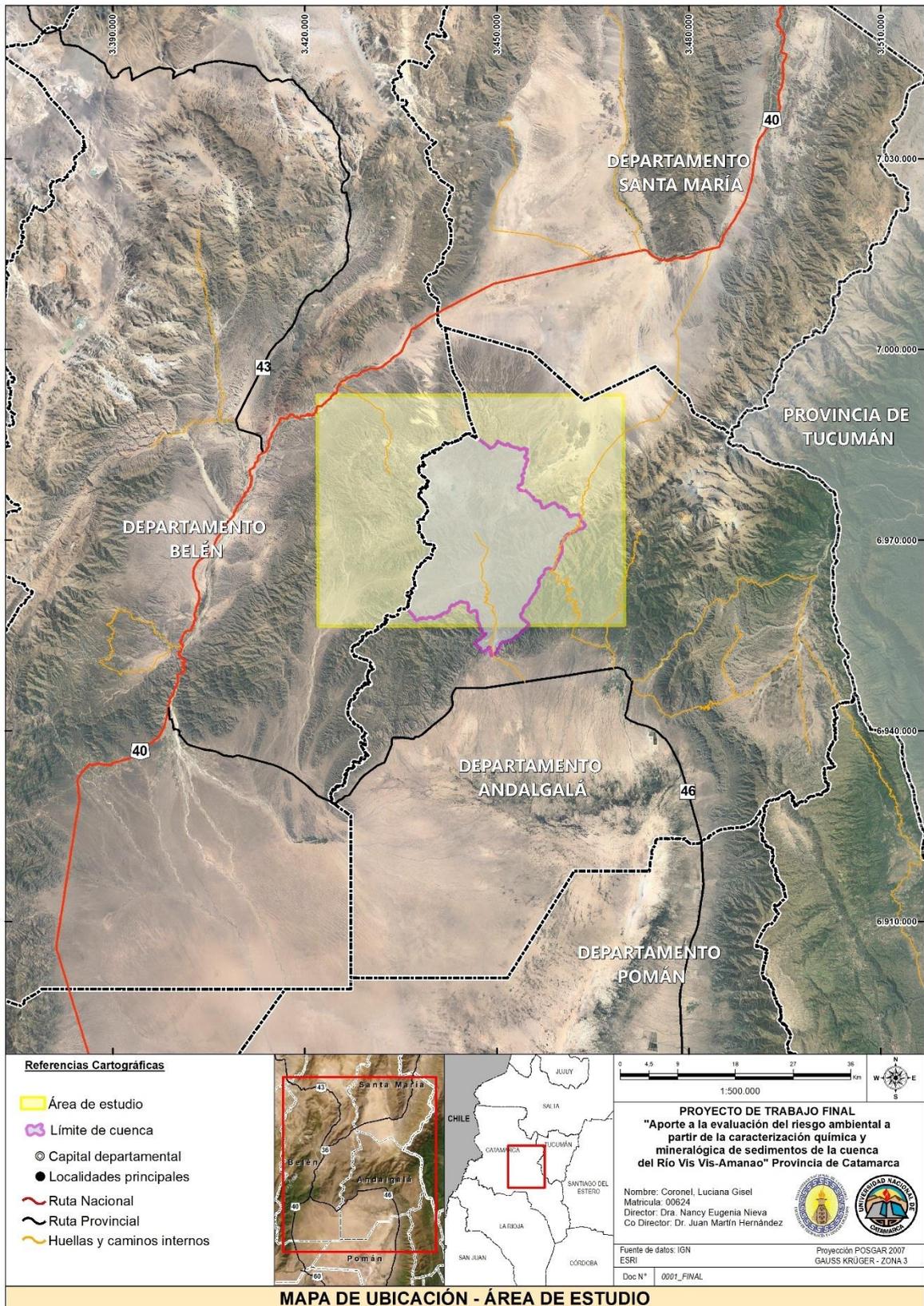


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio (indicada en color amarillo). Cuenca Vis Vis-Amanao.

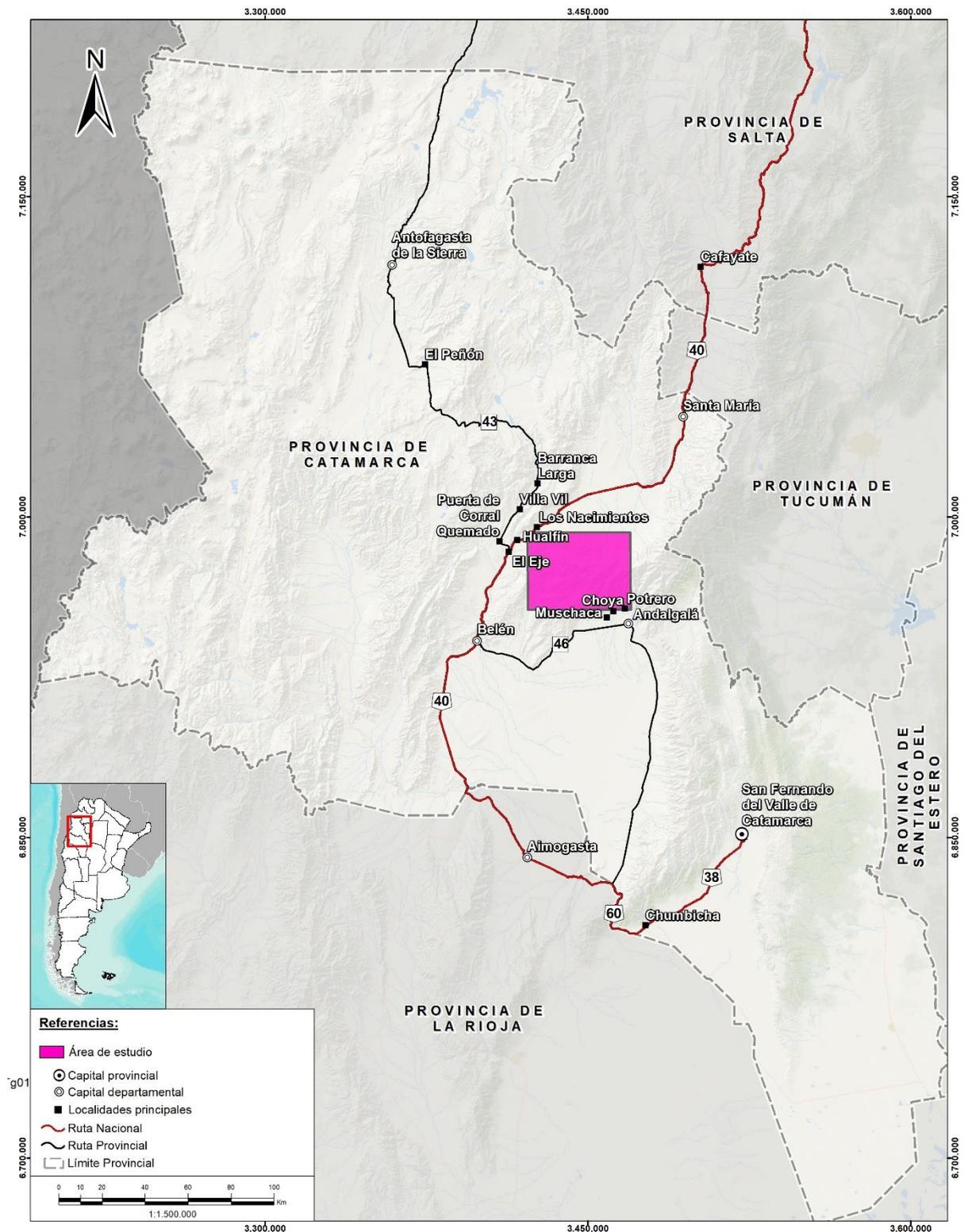


Figura 2. Vías de acceso al sector de estudio (indicado en color fucsia).

1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo de investigación se ha organizado en 7 capítulos.

- **Capítulo 1:** Introducción, incluyendo objetivo general y objetivos específicos, descripción del área de estudio, ubicación geográfica, vías de acceso y estructura del trabajo.
- **Capítulo 2:** Marco teórico.
- **Capítulo 3:** Marco geológico, incluyendo la geología regional de las Sierras Pampeanas y la geología local del área de estudio, estructuras y geomorfología.
- **Capítulo 4:** Metodología, detallando las actividades de campo y de gabinete: análisis de información previa, campaña de campo que incluye muestreo y tratamiento de la muestra, trabajo en laboratorio, análisis estadístico, elaboración de cartografía, procesamiento e interpretación de la información obtenida, y redacción del informe final.
- **Capítulo 5:** Resultados alcanzados.
- **Capítulo 6:** Discusión.
- **Capítulo 7:** Conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, bibliografía, seguido de un anexo que contiene datos adicionales (por ejemplo, resultados de análisis de laboratorio, difracción, balance iónico, diagramas de Piper y Stiff, cartografía elaborada).



CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1.1. ANTECEDENTES DEL ÁREA, ESTUDIOS PREVIOS Y LÍNEA DE BASE

2.1.1.1. HISTORIA DE EXPLOTACIÓN DE MINERA ALUMBRERA Y TIPO DE MINERALIZACIÓN

Minera Alumbreira fue uno de los proyectos mineros más importantes de Argentina, ubicado entre los departamentos de Andalgalá y Belén, en la provincia de Catamarca. La explotación comenzó oficialmente en 1997, convirtiéndose en la primera mina a gran escala de cobre y oro del país, operada mediante minería a cielo abierto. Este yacimiento fue desarrollado por la empresa Minera Alumbreira Ltd., un consorcio integrado por capitales internacionales y estatales, con participación de la empresa canadiense Xstrata Copper (luego Glencore), Yamana Gold y la estatal Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD).

El depósito mineral pertenece al tipo pórfido de cobre-oro-molibdeno, característico por presentar grandes volúmenes de mineralización diseminada en rocas intrusivas. Este tipo de yacimiento se asocia a procesos hidrotermales y está compuesto principalmente por sulfuros como calcopirita, pirita, molibdenita y, en menor medida, bornita (Sillitoe, 2003; JICA, 2002).

Durante sus años de operación, la mina fue señalada como un referente tecnológico en cuanto a extracción, procesamiento y transporte de concentrado de cobre, mediante un mineroducto de más de 300 km hacia la planta de secado en Tucumán. El yacimiento tipo pórfidos producía anualmente enormes volúmenes: alrededor de 120 millones de toneladas de roca procesada, generando unos 650.000 t de concentrados, con 180.000 t de cobre, 1.900 t de concentrado de Mo y 600.000 oz de oro (Minera Alumbreira Ltd., 2016).

Tras más de dos décadas, la fase a cielo abierto culminó y se inició una transición hacia una extracción subterránea planificada y el objetivo de un cierre responsable con remediación de impactos. Desde 2018 arrancó un plan de cierre progresivo, con inversión estimada en U\$S 400 millones solo para esta fase. Este plan incluye la revegetación de botaderos, tratamiento de relaves, monitoreo de aguas y reutilización parcial de infraestructura.

2.1.1.2. ESTUDIOS PREVIOS Y LÍNEA DE BASE

La cuenca del río Vis Vis-Amanao ha sido objeto de diversas investigaciones geológicas debido a la presencia de importantes yacimientos minerales en su sector de cabecera. Entre los más relevantes se encuentra Mina La Alumbreira, uno de los yacimientos cuprífero-auríferos más grandes del país, así como los proyectos Cerro Atajo, y los depósitos Visvil, Bajo San Lucas y Bajo Las Juntas. La mayoría de los estudios en esta región han estado enfocados en la caracterización de los eventos de mineralización, sus controles estructurales y su potencial económico.

- *Cerro Atajo:*

Este yacimiento es un sistema epitermal polimetálico con dos tipos principales de mineralización: cuprífera y otra que contiene Au y Ag. Cerro Atajo se caracteriza por una intensa alteración hidrotermal y se encuentra en una zona con potencial para depósitos de oro diseminado de baja ley. La veta María Eugenia es una de las principales estructuras mineralizadas de este proyecto, junto con las vetas Carmen y Triunfo. Las mismas, se localizan en una zona dominada por silicificación y argilización, procesos que han modificado profundamente la roca de caja.

La asociación mineral incluye principalmente sulfosales y sulfuros de cobre, plomo, zinc, estaño y hierro, como calcopirita, esfalerita, galena, pirita, bornita y tetraedrita. Minerales accesorios y complejos del grupo de la estannita (ricos en estaño, arsénico y cobre). Minerales secundarios producto de la alteración superficial, como malaquita, cuprita, covelina y óxidos/hidróxidos de hierro. Minerales de ganga como cuarzo, baritina y carbonatos (Márquez-Zavalía y Galliski, 2007).

- *Depósito Visvil:*

Corresponde a una antigua explotación de mineral de hierro, conocida históricamente como una de las principales fuentes de este metal en la región. El depósito está alojado en rocas metamórficas de bajo a medio grado, principalmente esquistos y filitas, que forman parte del basamento cristalino del área. La mineralización está compuesta predominantemente por óxidos de hierro, especialmente magnetita, hematita, en menor medida, goetita y otros óxidos hidratados (Lannefors, 1929).

- *Depósito Bajo San Lucas:*

Es un depósito tipo pórfido de Cu–Au. La mineralización está genética y espacialmente vinculada al pórfido dacítico, presentándose casi exclusivamente en éste. La metalización hipogénica consiste en pirita y calcopirita, acompañada en menor proporción por molibdenita, blenda, calcosina, covelina, neodigenita, etc. Otros minerales presentes son magnetita y especularita. La metalización supergénica está representada por malaquita, delafossita y cobres grises (Fabricaciones Militares, 1977).

- *Depósito Bajo Las Juntas:*

Este yacimiento es un depósito tipo pórfido, caracterizado por una mineralización asociada a intrusivos y eventos de alteración hidrotermal. Viruel (1973) realizó un estudio geológico detallado, centrado en las zonas de alteración hidrotermal donde determinó que la alteración propilítica es la más importante, la cual afecta a las rocas volcánicas circundantes al depósito (dacitas y tobas).

2.1.1.3. ESTUDIOS SEDIMENTOLÓGICOS Y GEOQUÍMICOS EN LA CUENCA VIS VIS-AMANAQ

Desde el punto de vista sedimentológico y geoquímico, también se han desarrollado investigaciones que aportan valiosa información sobre la dinámica fluvial, la composición de los sedimentos y la presencia de elementos metálicos asociados tanto a fuentes naturales como a actividades antrópicas. Estos estudios proporcionan el sustento necesario para definir líneas geoquímicas de referencia, esenciales en la evaluación del impacto ambiental de la actividad minera en la cuenca, y sirvieron como respaldo para la interpretación y comparación de los resultados obtenidos.

El informe técnico de Ferpozzi et al. (2002a, b) propone información geoquímica regional correspondiente a la Hoja 2766 III Belén, basada en el análisis multielemento de la fracción < malla 80 de sedimentos de corriente de archivo. Las muestras fueron originalmente recolectadas entre las décadas de 1960 y 1970, en el marco del Plan NOA I de Prospección Geológico-Minera, llevado a cabo por el Servicio Nacional Minero Geológico.

En el año 2001, una selección de 1.268 muestras fue reanalizada en laboratorios canadienses como parte del proyecto de cooperación internacional entre SEGEMAR, MMAJ (Metal Mining Agency of Japan) y JICA. Para este reanálisis se aplicaron técnicas de Activación Neutrónica Instrumental (AANI) y Espectroscopía de Emisión Atómica en Plasma Inductivamente Acoplado (EEA-ICP), permitiendo determinar la concentración de 48 elementos químicos, incluyendo metales pesados, tierras raras y otros elementos traza.

La selección de sitios de muestreo se realizó sobre imágenes satelitales Landsat TM, con una densidad promedio de una muestra cada 10 km², ajustada según el interés geológico del área. Las ubicaciones fueron digitalizadas sobre fotomosaicos geoquímicos a escala 1:50.000, y las coordenadas expresadas en el sistema Gauss-Krüger.

Los resultados se presentan en tablas geoquímicas y en 19 mapas temáticos que muestran la distribución espacial de los elementos analizados. Las escalas cartográficas utilizadas incluyen 1:120.000, 1:350.000 y 1:500.000, permitiendo visualizar la dispersión de elementos como Cu, Pb, Zn, As, U, Mo, Fe, entre otros, a lo largo de la cuenca.

Asimismo, se cuenta con el informe del Monitoreo del Proyecto PASMA - UNCa "Sedimentos de Corrientes Vis Vis – Candado" (2001), que presenta los resultados de los muestreos geoquímicos de sedimentos de corriente realizados durante el verano de 2000–2001 en las quebradas de Amanao y El Candado, situadas aguas abajo de los yacimientos mineros de Bajo de la Alumbraera y Agua Rica, en la provincia de Catamarca.

El estudio compara los datos del año 2001 con un conjunto de 14 muestras recolectadas previamente en el verano de 1970–71 por el entonces Instituto Nacional de Minería y Geología (hoy SEGEMAR), en el marco del Plan NOA I. Ambas campañas utilizaron criterios y metodologías de muestreo equivalentes, lo que permitió una comparación directa. Las muestras de 1970 fueron reanalizadas específicamente para este trabajo, ya que se encontraban archivadas en la sede de SEGEMAR (Tucumán).

La comparación temporal de las concentraciones de Cu, Pb y Zn tiene como objetivo detectar posibles cambios geoquímicos relacionados con la actividad minera desarrollada en las

últimas décadas. La hipótesis principal plantea que, en caso de existir una nueva fuente de dispersión de metales derivada de la explotación o exploración minera, esta se evidenciaría en un aumento de los valores en los sedimentos más recientes.

Cabe destacar el uso de los sedimentos de corriente como una herramienta eficaz para identificar impactos ambientales asociados a la minería, mediante el análisis de la evolución de cationes y aniones relevantes.

El muestreo desarrollado en el marco de este proyecto abarcó un tramo de aproximadamente 10 km en el río Vis Vis-Amanao (con 11 muestras) y otro de 18–20 km en el río El Candado (con 18 muestras). Aunque inicialmente se había propuesto tomar 100 muestras para asegurar una mayor confiabilidad estadística, la cantidad final se redujo por limitaciones presupuestarias.

En cuanto a los resultados del informe, se destaca que el contenido medio de Cu prácticamente se ha duplicado, mientras que el de Zn se mantiene relativamente constante. En ambos casos, los valores se encuentran dentro de rangos estadísticamente aceptables. No obstante, el informe señala que, si bien no puede atribuirse con certeza al dique de colas de Mina Alumbra, este comportamiento constituye una señal de advertencia que merece seguimiento.

2.1.2. DINÁMICA DE LOS SEDIMENTOS DE CORRIENTE COMO INDICADORES AMBIENTALES

2.1.2.1. FORMACIÓN TRANSPORTE Y DEPOSICIÓN DE LOS SEDIMENTOS

Los sedimentos de corriente se forman como resultado de la erosión y el transporte de materiales preexistentes (principalmente rocas y suelos) que, tras recorrer distintos trayectos, son finalmente depositados en ambientes fluviales. Este ciclo comprende tres etapas principales: meteorización, transporte y deposición. La meteorización física y química descompone las rocas, generando partículas que son movilizadas por agentes naturales como el agua, el viento o el hielo, para luego ser depositadas en zonas de menor energía del sistema (Peña Moné y Santpietro-Vattuone, 2018).

En los ríos de montaña, como aquellos que conforman la cuenca Vis Vis-Amanao, el material sedimentario presenta un origen mixto. Por un lado, se genera principalmente a partir de la meteorización física de las rocas expuestas, intensificada por las marcadas amplitudes térmicas diarias, y por procesos de remoción en masa (como derrumbes y deslizamientos) en pendientes pronunciadas. La escasa cobertura vegetal incrementa aún más la vulnerabilidad de los suelos y rocas a la erosión. Por otro lado, parte del sedimento proviene del propio cauce, movilizado durante episodios pluviales previos o eventos aluvionales de alta intensidad. Las principales fuentes de sedimento en la cuenca incluyen: (i) desprendimientos rocosos en áreas de fuerte pendiente, (ii) movilización de depósitos aluviales cuaternarios localizados en antiguas terrazas fluviales, y (iii) aportes desde conos aluviales recientes y activos, característicos de ambientes áridos y semiáridos (Peña Moné y Santpietro-Vattuone, 2018; Carrizo, 2013).

El funcionamiento del sistema fluvial no solo responde a condiciones locales sino también a cambios regionales y globales. Los procesos fluviales están profundamente interconectados con otros sistemas terrestres (bióticos y abióticos), y son clave para comprender las interacciones entre atmósfera, hidrósfera, biósfera y pedósfera (Schlesinger et al., 1990; Syvitski, 2003; Munson et al., 2011).

En regiones áridas como el oeste catamarqueño, las dinámicas sedimentarias son particularmente sensibles a la erosión hídrica. La escasa frecuencia pero alta intensidad de los eventos de escorrentía genera flujos altamente energéticos y densos, capaces de movilizar grandes volúmenes de sedimento. La variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, junto con factores como la cobertura vegetal, la pendiente, la litología y el grado de alteración del terreno, controlan el transporte y depósito de sedimentos en la red de drenaje (Sharma et al., 1994).

De acuerdo con Schumm (1977), en todo sistema fluvial se pueden distinguir tres dominios funcionales interrelacionados:

1. **Zona de denudación o erosión:** corresponde a áreas de relieve abrupto con alta pendiente, donde se produce la mayor generación de sedimentos.
2. **Zona de transferencia:** de morfología más suave, en la que predomina el transporte con escasa deposición o erosión neta.
3. **Zona de acumulación o depósito:** compuesta por cubetas o planicies sedimentarias donde se produce una deposición neta de sedimentos.

Estos dominios no son estáticos, sino que responden a la influencia de factores tectónicos (levantamiento o subsidencia), climáticos (variabilidad del régimen de precipitaciones, eventos extremos, glaciaciones), morfométricos (extensión de la cuenca y red de drenaje) y antrópicos (como la minería o la deforestación). Las modificaciones en estos parámetros generan respuestas detectables en el sistema fluvial, tales como cambios en la producción, transporte y almacenamiento de sedimentos, cuyas huellas se registran a lo largo del cauce (Romans et al., 2016).

Desde el punto de vista ambiental, el estudio de estos procesos aporta información clave para la gestión integral de las cuencas. La identificación de áreas de generación - acumulación de sedimentos permite evaluar la estabilidad de los ecosistemas, prever riesgos asociados a aluviones y movimientos en masa, y diseñar estrategias de conservación de suelos y aguas. Además, el conocimiento de la dinámica sedimentaria es fundamental para entender el transporte de contaminantes asociados a las partículas, que pueden afectar la calidad del agua y los hábitats acuáticos. Así, este enfoque contribuye a una planificación ambiental más sostenible y adaptada a los contextos áridos y montañosos.

2.1.2.2. PAPEL DE LOS SEDIMENTOS EN LA RETENCIÓN Y LIBERACIÓN DE METALES

Los sedimentos juegan un papel fundamental en el comportamiento geoquímico de los metales en los sistemas acuáticos, actuando tanto de reservorio como de fuente potencial de

estos elementos. Durante su transporte y deposición, los sedimentos incorporan metales a través de diversos procesos fisicoquímicos, tales como adsorción, precipitación, complejación y coprecipitación con minerales secundarios (óxidos, hidróxidos, carbonatos y materia orgánica). Este mecanismo de retención contribuye a atenuar la movilidad de los metales en la columna de agua, estabilizando temporalmente su presencia en el sistema (Smedley y Kinniburgh, 2002; Bose y Sharma, 2021).

Sin embargo, las condiciones ambientales que controlan estos procesos son dinámicas. Factores como las fluctuaciones de pH, redox, contenido de oxígeno disuelto, actividad microbiana y variaciones hidrológicas pueden inducir la liberación de metales previamente retenidos en los sedimentos. Por ejemplo, en condiciones reductoras, ciertos óxidos metálicos pueden disolverse, liberando metales al medio acuático. Asimismo, los cambios en el régimen hidrológico —como las crecidas o eventos de remoción de sedimentos— pueden reactivar estos reservorios, incrementando la biodisponibilidad de los metales (Shrivastava et al., 2015).

Desde una perspectiva ambiental, este comportamiento implica que los sedimentos no solo reflejan el historial de contaminación metálica de una cuenca, sino que también pueden constituir una fuente secundaria persistente de contaminación. Por lo tanto, el estudio de las interacciones entre sedimentos y metales resulta esencial para comprender los riesgos ecológicos asociados, diseñar estrategias de monitoreo y proponer medidas de gestión para la recuperación y protección de los ecosistemas acuáticos (Arcos Aldaz y Kuontay Jaime, 2024).

2.1.2.3. SEDIMENTOS COMO REGISTROS GEOQUÍMICOS DEL IMPACTO AMBIENTAL

Los sedimentos de corriente constituyen una fuente de información valiosa sobre la historia ambiental de una cuenca. Su capacidad para incorporar y preservar elementos químicos, tanto naturales como antropogénicos, los convierte en una herramienta valiosa para interpretar el contexto geológico. A través del análisis de su composición química y mineralógica, es posible reconstruir procesos de alteración natural, identificar fuentes de contaminación y evaluar la evolución temporal de los impactos ambientales (Förstner y Salomons, 1980; Horowitz, 1991).

La utilidad de los sedimentos como registros geoquímicos se intensifica en cuencas afectadas por actividades antrópicas, como la minería, donde pueden actuar como sumideros temporales de metales pesados y metaloides. La comparación de perfiles verticales de sedimento (testigos estratificados) o de sedimentos recientes en distintos puntos de la cuenca permite identificar zonas de mayor acumulación, patrones de dispersión y posibles mecanismos de movilización de contaminantes (Berner 1987; Chapman et al., 1996).

2.1.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE SEDIMENTOS

La caracterización química y mineralógica de los sedimentos es un componente esencial para comprender los procesos que controlan la dinámica de los materiales en los sistemas fluviales,

lacustres y marinos. A través de la identificación de la composición mineralógica y la determinación de las concentraciones de elementos químicos, es posible evaluar el origen, las rutas de transporte, los mecanismos de acumulación y la interacción de los sedimentos con el medio ambiente (Fernandes y Nayak, 2016).

La caracterización mineralógica permite identificar las fases minerales predominantes, como silicatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos metálicos, sulfatos y minerales arcillosos, que influyen directamente en las propiedades físico-químicas del sedimento, su capacidad de adsorción y su reactividad geoquímica.

Por su parte, el análisis químico cuantifica tanto los elementos mayoritarios (Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na) como los elementos traza (por ejemplo, metales pesados como As, Pb, Zn, Cu, Cd), que pueden estar asociados a fuentes naturales o antrópicas. Estos datos son fundamentales para evaluar el grado de contaminación, los riesgos potenciales para los ecosistemas acuáticos y la salud humana, y para establecer líneas base de calidad ambiental (Romero Guadarrama, 2011).

En conjunto, la integración de los datos mineralógicos y químicos proporciona una visión integral sobre el comportamiento de los sedimentos como reservorios o fuentes de metales y otros contaminantes, facilitando la toma de decisiones para la gestión y conservación de las cuencas hidrográficas.

2.1.3.1. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS RELEVANTES: PH, CONDUCTIVIDAD, MATERIA ORGÁNICA

El análisis de parámetros físico-químicos en sedimentos de corriente constituye una herramienta fundamental para comprender los procesos geoquímicos que ocurren en sistemas fluviales y su relación con la calidad ambiental del entorno. Estos parámetros permiten identificar posibles fuentes de contaminación, inferir procesos de movilización o inmovilización de metales, y evaluar condiciones que afectan la biodisponibilidad de sustancias potencialmente tóxicas (Horowitz, 1991; Förstner y Wittmann, 1981).

- pH

El pH regula la acidez o alcalinidad del medio sedimentario, condicionando la solubilidad, especiación y movilidad de diversos elementos, en particular los metales pesados. Valores bajos de pH (ambientes ácidos) favorecen la disolución de minerales metálicos, incrementando la movilidad y toxicidad de estos elementos. En cambio, valores neutros o ligeramente alcalinos promueven la precipitación o adsorción de los metales sobre fases sólidas, como óxidos de hierro y materia orgánica. Por lo tanto, el pH actúa como un parámetro clave en la interpretación de la geodinámica de contaminantes metálicos (Stumm y Morgan, 1996; Kabata-Pendias, 2011).

- Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica refleja la concentración total de especies iónicas en solución dentro de los poros del sedimento. Altos valores de CE pueden estar relacionados con aportes de

sales provenientes de la meteorización de materiales geológicos (p. ej., evaporitas o minerales sódicos), procesos naturales de evaporación o, en contextos antrópicos, con efluentes industriales y mineros. Su análisis es útil para detectar alteraciones en el equilibrio iónico del sistema y evaluar la influencia de procesos naturales o actividades humanas sobre la composición química de los sedimentos (Appelo y Postma, 2005).

- **Materia orgánica (MO)**

La materia orgánica representa una fracción activa en los sedimentos, capaz de influir en la retención o movilidad de metales pesados y otros contaminantes. Su presencia puede mejorar la capacidad de intercambio catiónico y promover la formación de complejos organometálicos, disminuyendo la biodisponibilidad de los metales. Sin embargo, en ambientes anóxicos, su degradación puede inducir condiciones reductoras que favorezcan la movilización de ciertos elementos, como hierro, manganeso y arsénico. Además, niveles elevados de MO pueden ser indicativos de aportes urbanos o industriales, especialmente en sectores con actividad antrópica relevante (Mc Laren et al., 1983).

- **Otros parámetros complementarios**

- **Contenido de carbonatos:** Infiuye en la capacidad buffer del sedimento y en la formación de fases secundarias como carbonatos metálicos (Langmuir, 1997).
- **Capacidad de intercambio catiónico (CIC):** Indica la aptitud del sedimento para retener cationes metálicos, en especial en presencia de arcillas o materia orgánica (Sposito, 1989).

2.1.4. RIESGO AMBIENTAL Y RIESGO ECOLÓGICO EN AMBIENTES AFECTADOS POR MINERÍA

2.1.4.1. CONCEPTO Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO AMBIENTAL

El riesgo ambiental se define como la probabilidad de que un contaminante, presente en un medio determinado, genere efectos adversos sobre el ambiente o la salud humana. En contextos mineros, donde la liberación de metales pesados al ambiente puede alterar significativamente los sistemas naturales, la evaluación del riesgo ambiental se torna una herramienta clave para la gestión y protección de los recursos naturales.

Entre los distintos compartimentos del ecosistema, el análisis de sedimentos y suelos ha demostrado ser una metodología efectiva para inferir la magnitud y persistencia de la contaminación por metales pesados. A diferencia del agua, que puede reflejar variaciones de corto plazo, los sedimentos integran la carga contaminante a lo largo del tiempo y registran señales geoquímicas de los procesos de alteración natural y antrópica (Chatterjee et al., 2009).

Además, los contaminantes metálicos presentes en los sedimentos, especialmente aquellos asociados a partículas finas, pueden ser re-suspendidos y reintroducidos en la columna de agua, afectando la biota bentónica y otros niveles tróficos (Bastakoti, 2019). Por ello, el análisis geoquímico de los sedimentos no solo permite identificar focos de contaminación, sino también evaluar su movilidad, biodisponibilidad y toxicidad potencial en el sistema acuático (Senten, 1989; Buajan y Pumijumnong, 2010).

La toxicidad de los metales en ambientes acuáticos depende de múltiples factores: las condiciones del medio (pH, redox, contenido de materia orgánica), las características del sedimento, y las formas químicas en las que se encuentra el metal (especies solubles, orgánicas, complejadas, etc.). Para cuantificar el nivel de riesgo, se han desarrollado diversos índices e indicadores de contaminación, que permiten comparar concentraciones medidas con niveles de fondo o preindustriales.

Entre los más utilizados se encuentran:

- **Índice de geoacumulación (Igeo)** es un parámetro ampliamente utilizado en estudios de contaminación de suelos y sedimentos, desarrollado originalmente por Müller en la década de 1960, para evaluar el grado de contaminación por metales pesados comparando las concentraciones actuales con los niveles de fondo geológicos (naturales).

El Igeo se utiliza para:

- Identificar áreas afectadas por contaminación antrópica (actividades humanas como minería, agricultura, industria).
 - Comparar niveles de contaminación en distintas zonas.
 - Evaluar cambios temporales en la calidad de los sedimentos.
 - Apoyar la toma de decisiones en gestión ambiental.
-
- **Factor de riesgo ecológico potencial (Er)** e **Índice de riesgo ecológico (RI)**: propuestos por Hakanson (1980), son herramientas cuantitativas utilizadas para evaluar el nivel de amenaza que representan los contaminantes (particularmente los metales pesados) en los sedimentos para los ecosistemas acuáticos. Este índice integra tanto la concentración de los metales en los sedimentos como su toxicidad relativa y el grado de movilidad o biodisponibilidad en el medio ambiente. El cálculo del índice de riesgo ecológico se basa en la comparación de las concentraciones medidas de cada metal con valores de referencia o de fondo, ponderadas por un factor de toxicidad específico para cada elemento. De esta manera, permite identificar de forma más precisa cuáles contaminantes representan un riesgo significativo y en qué medida podrían afectar la biota acuática. El uso de ambos es ampliamente aceptado en estudios ambientales porque proporcionan un enfoque integrado para interpretar datos geoquímicos en términos de impacto ecológico potencial. Además, facilitan la priorización de áreas para remediación, la identificación de fuentes de contaminación y el diseño de estrategias de gestión ambiental en cuencas hidrográficas.



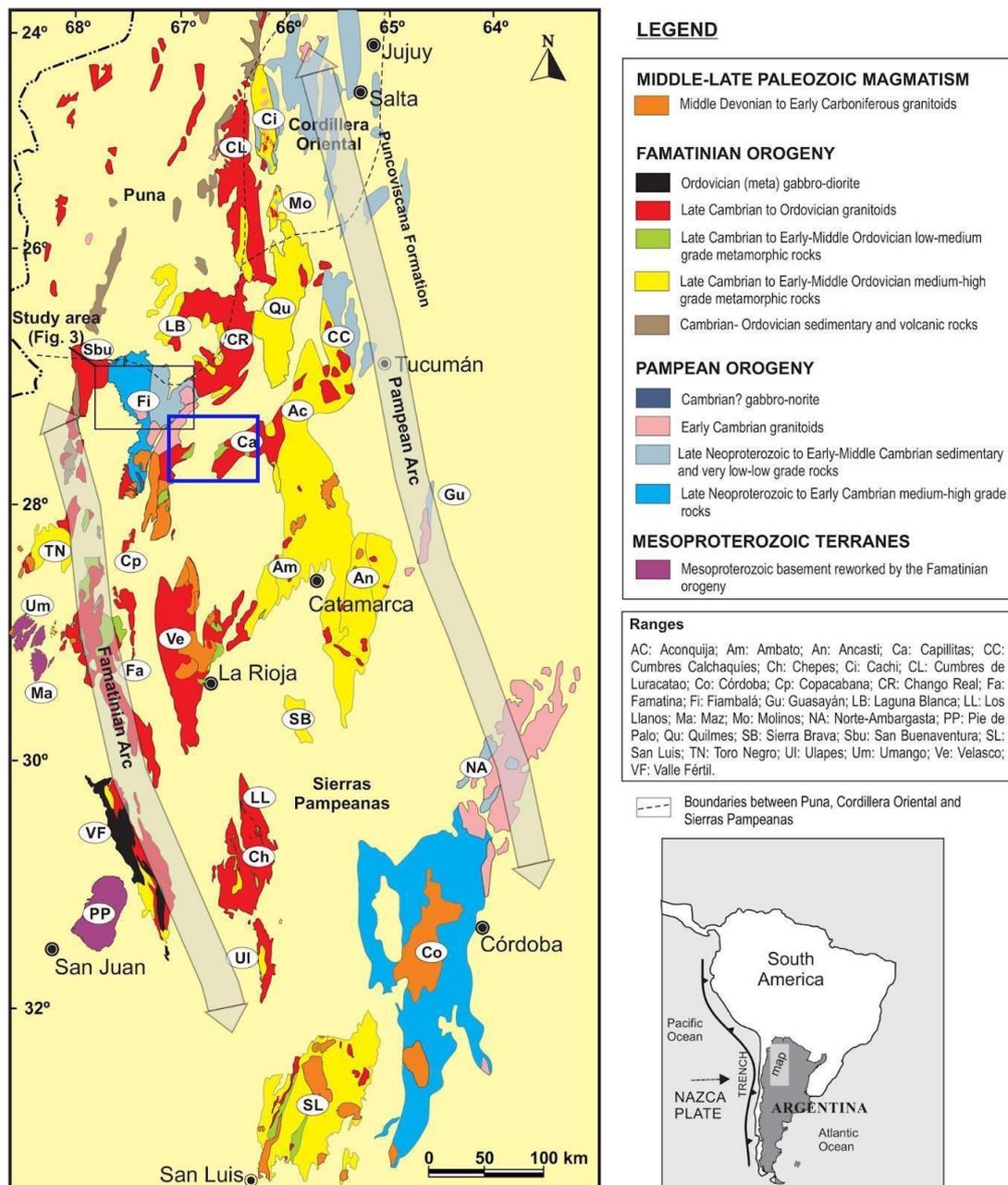
CAPÍTULO III.

MARCO GEOLÓGICO

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. GEOLOGÍA REGIONAL DE LAS SIERRAS PAMPEANAS

El área de estudio se encuentra en el sector noroccidental de la provincia geológica de Sierras Pampeanas (Caminos, 1979) (Figura 3). Esta unidad morfoestructural está constituida por una serie de sierras formadas por un basamento de edad Precámbrica posteriormente intruidas por batolitos, compuesto por metamorfitas y granitoides (Gordillo y Lencinas, 1979; Larrovere et al. 2021). La estructura de las Sierras Pampeanas ha sido caracterizada como un sistema de montañas en bloque, limitadas por fallas inversas (González Bonorino, 1950b).



Según Ramos (1999) pertenece a la provincia geológica de Sierras Pampeanas Occidentales. Se trata de una importante faja ubicada en la región oeste que presenta características litológicas, patrones estructurales y evolución tectónica propia (Caminos, 1979). El basamento cristalino, está dividido en Faja Oriental y Faja Occidental, la división se basa en las diferencias litológicas, la principal es la presencia de una faja básica y ultrabásica en la faja Occidental, mientras que en la Faja Oriental abundan las rocas de composición granítica. Dentro de la Provincia de Catamarca el sector oriental comprende de Norte a Sur las Sierras de Chango Real, Quilmes, Cumbres Calchaquíes, Aconquija, Belén, Hualfín, Capillitas, Ovejería, Zapata, Ambato y Ancasti (Galván, 2024) (Figura 4).

Las Sierras Pampeanas Occidentales están integradas por dos unidades litoestratigráficas mayores de distinta edad. La primera y más antigua está representada por afloramientos alargados de rocas metamórficas de alto grado de 1000-1100 Ma de edad, (Varela y Dalla Salda, 1993; Mc Donough et al., 1993; Ramos et al., 1993). La segunda supracortical, es un grupo de metamorfitas que comprenden dos conjuntos separables por sus protolitos: la primera deriva de sedimentos y la segunda de rocas ígneas básicas y ultrabásicas. Esta unidad está caracterizada por metamorfitas de bajo a mediano grado y metapelitas aluminosas, con asociaciones de clorita-moscovita-biotita-almandino (Dalla Salda et al., 1999).

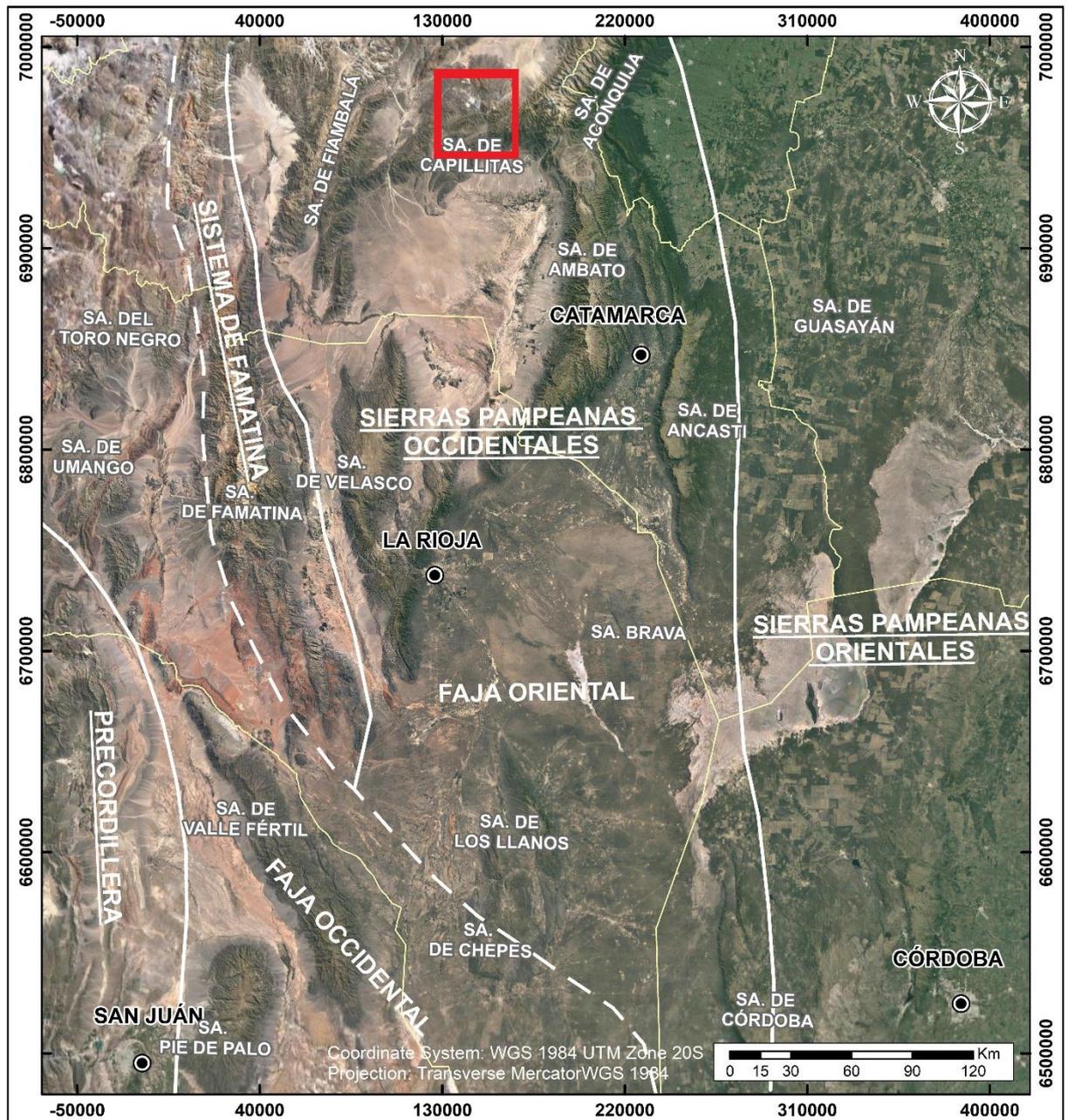


Figura 4. Mapa esquemático regional de las Sierras Pampeanas representando hacia la derecha Las Sierras Pampeanas Orientales y hacia la izquierda Las Sierras Pampeanas Occidentales, que a su vez se divide en Faja Oriental y la Faja Occidental, extraído de Galván, 2024 (Ubicación de área de estudio en recuadro de color rojo).

3.2. GEOLOGÍA LOCAL

La columna estratigráfica presente en el área de estudio está representada por un basamento cristalino compuesto de metamorfitas, correspondientes a la Formación Suncho (Mirré y Aceñolaza, 1972), que posteriormente fue instruido por el granito ordovícico Capillitas. Una zona milonítica de aproximadamente 1000 metros de ancho, pone en contacto tectónico a rocas metamórficas de bajo grado, aflorantes al este del río Amanao, con rocas graníticas. Está integrada mayoritariamente por milonitas y en parte ultramilonitas. Las milonitas se

desarrollaron sobre rocas graníticas con deformación dúctil de cuarzo y frágil de feldespatos potásicos (Aceñolaza y Toselli, 1981; Candiani et al., 2025).

Sobre el denudado basamento cristalino se depositaron areniscas de origen continental de coloraciones rojizas, conformando la Formación Hualfín (Muruaga, 1998).

Los depósitos que yacen en discordancia angular sobre la Formación Hualfín y que en algunos sectores se apoyan en inconformidad sobre el basamento, son aquí asignados al Complejo Volcánico Farallón Negro (Llambías 1970; Sasso 1997; Sasso y Clark, 1998). La secuencia del Complejo Volcánico Farallón Negro se inicia con facies fluviales de areniscas y pelitas rojas dispuestas en estratos finos continuos con cientos de metros de extensión lateral, que reflejan una superficie de depositación más o menos plana. Las diferentes facies asociadas representan eventos de flujos individuales y de decantación en barreales con largos períodos de desecación (Galli et al., 2012). En la parte media de la columna aparecen los primeros aportes de fragmentos volcánicos máficos (basálticos y andesíticos), inmersos en matriz pelítica que marcan el inicio de la actividad volcánica en la región. La secuencia basal pasa transicionalmente a facies donde predominan asociaciones volcanoclásticas gruesas, areniscas, brechas, conglomerados y, en menor proporción, intercalaciones de depósitos volcánicos primarios e intrusivos subvolcánicos de composiciones máficas e intermedias.

Galli et al. (2012) interpretan el ambiente de depositación de esta unidad como fluvial, que evoluciona de río entrelazado distal a entrelazado, asociado a flujos de gravedad y culmina con un sistema entrelazado gravoso somero. La secuencia basal del Complejo Volcánico Farallón Negro es equivalente a facies condensadas dentro de la Formación Las Arcas (Galván y Ruiz Huidobro 1965; Bossi et al., 1987) y las secuencias volcanoclásticas media y superior del Complejo Volcánico Farallón Negro se correlacionan con la Formación Chiquimil (Bossi y Palma 1982). Las Formaciones Andalhuala y Corral Quemado (Bossi et al., 1987, Bossi et al., 1993) están conformadas por potentes acumulaciones psefiticas y psamíticas granocrecientes, con escasa participación volcánica, que integran la parte superior de la secuencia cenozoica. Los depósitos conglomerádicos cuaternarios del Punaschotter (Penck, 1920) coronan la sucesión en forma discordante. Sobre las formaciones mencionadas anteriormente se asientan depósitos conglomerádicos aterrizados y fluviales de edad Cuaternaria (Isacks et al., 1982; Jordan et al., 1983) (Figura 5).

Detalle del registro estratigráfico que abarca las distintas unidades litológicas mencionadas:

Formación Suncho:

Está integrada por pizarras, filitas, meta-areniscas, metaconglomerados y esquistos. Fue descrita inicialmente por Mirré y Aceñolaza (1972) como un conjunto de pelitas y psamitas sometidas a metamorfismo regional de bajo grado y, en parte, a metamorfismo de contacto. Las metamorfitas afloran en la Sierra de la Ovejería y Ampujaco (González Bonorino, 1950b), quien también identificó rocas esquistosas en Lomas Picasas, luego denominadas Esquistos Inferiores por Ahumada (1979). La edad geológica que se asigna a esta unidad es al Cámbrico inferior en base de la evidencia fósil.

Las rocas de esta unidad presentan tonalidades gris claro, gris verdoso, verde oscuro y rojizo cerca de fallas. El metamorfismo regional de muy bajo grado permitió preservar estructuras sedimentarias relictas como laminación fina, gradación y ondulitas (Durand, 1985). En la

Sierra de la Ovejería, cerca de Vis Vis, las pizarras y filitas están plegadas, con clivaje de plano axial penetrativo y bandeamiento sedimentario original. Los metaconglomerados, de hasta 150 m de espesor, han sido interpretados como depósitos de corrientes de turbidez (Mirré y Aceñolaza, 1972; Viruel, 1973), con asociaciones minerales como cuarzo, albita, muscovita y clorita; cerca de intrusivos, aparece biotita como indicio de metamorfismo térmico (Durand, 1982).

La unidad aflora principalmente en la Sierra de la Ovejería (incluyendo la zona de Vis Vis y quebrada del Suncho), en la vertiente norte de la cumbre del Venado, en los Nevados del Aconquija y hacia el sur en áreas cercanas a Andalgalá, Choya, Villa Vil y Lomas Picasas (Mirré y Aceñolaza, 1972). Además, está intruida por granitoides ordovícicos del Complejo Magmático Capillitas.

Complejo Magmático Capillitas:

Comprende granitos porfíricos, equigranulares y foliados, reconocidos inicialmente por González Bonorino (1950c) y agrupados como *Batolito Capillitas* (González Bonorino, 1951a). Estudios posteriores identificaron granitoides peraluminosos tipo-S, característicos del magmatismo famatiniano (Toselli et al., 1996; Pankhurst et al., 2000; Rossi et al., 2002), junto con plutones menores coetáneos tipo-S y tipo-I de edad ordovícica (Knüver, 1983; Toselli, 1992; Rapela et al., 2005). Aflora en el sector suroeste de los Nevados del Aconquija, Sierra de Capillitas y Santa Bárbara, extendiéndose hacia la Sierra de la Ovejería, con afloramientos destacados en la quebrada del río Belén y la sierra homónima.

Litológicamente, se trata de granitos claros constituidos principalmente por feldespatos y cuarzo, con muscovita, cordierita y silicatos de aluminio que les confieren un carácter peraluminoso. Presentan texturas equigranulares de grano medio, seriadas a porfíricas, y texturas de reacción como mirmequitas y pertitas. La mineralogía incluye microclino con pertitas filiformes, cordierita, cuarzo, plagioclasa, biotita, muscovita y sillimanita, con accesorios como circón, minerales opacos y allanita. La cordierita es una fase siempre presente, acompañada de sillimanita y ocasionalmente andalucita.

Estructuralmente, los granitos exhiben foliación, schlieren biotíticos, enclaves de biotita-sillimanita-andalucita-cordierita y bandas de flujo. Se observan enclaves lenticulares de plagioclasa-cuarzo-biotita, así como xenolitos metamórficos. Localmente, muestran deformación dúctil-frágil, con texturas miloníticas caracterizadas por porfiroclastos de microclino pertítico en matriz recristalizada de cuarzo y feldespatos, con micas orientadas y microtexturas gráficas relictas (Rubiolo et al., 2004).

Formación Hualfín

Se trata de una sucesión arenosa de color rojo ladrillo oscuro a violácea, definida por Muruaga (1998, 2001a) en los afloramientos del río Villa Vil (entre Villa Vil y Hualfín). Anteriormente, fue denominada Formación Río Colorado por Sosic (1973) y atribuida al Calchaquense por González Bonorino (1972); otros autores como Bossi et al. (1987, 1993) la incluyeron en la Formación Las Arcas, hasta que Muruaga (1998) separó ambas por contacto discordante. Aflora en Cerro El Durazno y Capillitas. Litológicamente está compuesta por areniscas finas a medias, macizas o laminadas, con niveles pelíticos intercalados y conglomerados en la base. Presenta facies granodecrecientes y estructuras como laminación paralela, cruzada y

ondulitas. Las pelitas muestran bioturbación y grietas de desecación. En sectores yacen en discordancia angular sobre el basamento (Muruaga 2001a). También está cubierta discordantemente por depósitos volcánicos del Complejo Farallón Negro (Seggiaro et al. 2011). Inicialmente fue atribuida al Paleógeno (Bossi y Muruaga 2009), pero estudios de circones detríticos en base y techo indican edades de 15 Ma y 11 Ma, respectivamente, ubicándola en el Mioceno medio–superior (Galli et al. 2012). Correlaciona con la Formación Saladillo del valle de Santa María.

Grupo Santa María

Fue definido por Galván y Ruiz Huidobro (1965) en el valle de Santa María, ha sido correlacionado con el Grupo Volcán en la Hoja 11d Laguna Blanca (Turner, 1962), con afloramientos tipo en el faldeo occidental de la sierra de Las Cuevas. Estudios posteriores ampliaron su correlación regional a las comarcas de Hualfín–Las Cuevas (Muruaga, 1998) y al cerro Pampa (Bossi et al., 1999). El grupo, con su integración modificada por Bossi y Palma (1982), está constituido por las formaciones: San José (inferior), Las Arcas, Chiquimil, Andalhuala y Yasyamayo (superior).

Según Muruaga (2001a), las formaciones Las Arcas y Chiquimil con sus tres miembros, corresponden a la etapa de mayor subsidencia tectónica de la cuenca, caracterizada por depósitos generados por flujos de alta energía y eventos efímeros canalizados. El Miembro El Áspero marca un aporte significativo de sedimentos volcanoclásticos.

Posteriormente, una etapa de subsidencia térmica dio lugar a la acumulación de la potente sucesión clástica de la Formación Andalhualá, con progradación de facies proximales de planicies fluviales entrelazadas, representando la primera fase extensional. Finalmente, se produjo un cambio abrupto en la sedimentación neógena, asociado a una primera inversión de la cuenca y al desarrollo de abanicos aluviales de la Formación Corral Quemado (Bossi et al., 1987; Marshall y Patterson, 1981).

Grupo Santa María - Formación Las Arcas

Definida originalmente por Galván y Ruiz Huidobro (1965) como un espeso paquete de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillitas rojo ladrillo oscuro en el valle de Santa María, posteriormente fue utilizada por Bossi et al. (1987) para las capas inferiores del Calchaquense (González Bonorino, 1950a). Aflora principalmente al pie del cerro El Durazno, así como en Cerro Atajo y Minas Capillitas (Muruaga 1998). Está compuesta por areniscas finas a conglomerádicas, friables, rojo-naranja, con cuerpos granocrecientes, coronados por facies bioturbadas, calcretos y pelitas con grietas de desecación. Incluye niveles de caliza con bivalvos y ostrácodos. En la parte superior predominan areniscas medias con estratificación cruzada planar y lenticular, y conglomerados con clastos de gneises, esquistos y volcanitas. La mineralogía (DRX) indica illita de baja cristalinidad y montmorillonita bien cristalina, con abundante calcita (Muruaga, 1998). Constituye la base del Grupo Santa María, en discordancia sobre la Formación Hualfín o sobre basamento cristalino. Está cubierta en discordancia erosiva por depósitos volcánicos y brechas del Complejo Volcánico Farallón Negro, e intruida por andesitas. Se apoya en transición o discordancia neta con la Formación Chiquimil (Muruaga, 1998). Antecede al vulcanismo del Complejo Volcánico Farallón Negro por <12 Ma (Stipanovic y Linares, 1975) y subyace a la Formación Chiquimil, cuyo Miembro El Áspero fue datado en 9.14 ± 0.09 Ma (Sasso y Clark, 1998).

Complejo Volcánico Farallón Negro

Se emplaza en una depresión tectónica del basamento cristalino y está compuesto por una asociación volcánica basalto–andesita–riolita, con abundantes andesitas hornblendíferas (Llambías 1970; 1972). La erosión neógena-cuaternaria expuso las raíces del estratovolcán y numerosos cuerpos subvolcánicos y plutónicos, revelando yacimientos de manganeso-oro y pórfidos de cobre-oro diseminado.

La evolución magmática inicial estuvo controlada por una fractura anular vinculada al colapso caldérico, seguida por un sistema de fracturas NO–SE que dirigió el volcanismo posterior (Llambías 1970; 1972). El estratovolcán pudo alcanzar 3000 m sobre el actual nivel de erosión. Las unidades más antiguas son la Brecha Morada Central y los Diques de Andesitas Basálticas, intruidas por pulsos magmáticos posteriores. En el sector NW se encuentran aglomerados polimícticos con matriz piroclástica y depósitos retrabajados. Entre los cuerpos intrusivos destacan:

- Monzonita Alto de la Blenda (6,7 km²), con plagioclasa zonal, clinopiroxeno, biotita y escaso cuarzo (<6 %) (Llambías, 1970).
- Granodiorita El Durazno, en el borde NE, con texturas equigranulares y porfíricas (Llambías, 1970).
- Andesita La Chilca, formando domos ovalados controlados por fracturas anulares (Llambías, 1972).
- Dacita Macho Muerto, con fenocristales de sanidina y cuarzo, alterada deutérica e hidrotermalmente.
- Riolita Los Leones, último intrusivo reconocido, con marcada fluidalidad y textura afanítica (Llambías, 1970; Sasso y Clark, 1998).

Estratigráficamente, las vulcanitas cubren en discordancia a la Formación Las Arcas. El magmatismo ocurrió en el Mioceno (9,7–6 Ma) en tres estadios:

9,7–7,3 Ma: volcanismo predominantemente explosivo con lavas y brechas andesítico-basálticas; incluye el stock andesítico El Durazno (8,4 Ma) (Sasso, 1997; Halter et al., 2004).

7,2–6,0 Ma: magmatismo predominantemente intrusivo, con stocks andesíticos-dacíticos y diques de hasta 5 km (Buret et al., 2016; Halter et al., 2004).

Eventos locales como Cerro Atajo (8,7–8,4 Ma), stock Melcho en Agua Rica (8,5 Ma) y unidades de Vis Vis (8,4–7,3 Ma) (Sasso, 1997).

Estas vulcanitas se correlacionan con el Complejo Volcánico Vicuña Pampa y el Complejo Volcánico Portezuelo de Las Ánimas (Ruiz Huidobro, 1972; González, 1990).

Grupo Santa María - Formación Chiquimil

El término Formación Chiquimil fue introducido por Bossi y Palma (1982), luego de la revisión de los trabajos de Stahlecker (1926, en Riggs y Patterson, 1939; Marshall y Patterson, 1981). Ruiz Huidobro (1975) la denominó Formación El Morterito. Junto con la subyacente Formación Las Arcas, ambas constituyen el Calchaquense reconocido por González Bonorino (1950b). La unidad aflora principalmente en los faldeos occidentales de las sierras de Hualfín y Las Cuevas, así como en sectores más restringidos de la sierra de Hualfín, Farallón Negro y cerro Pampa. Se han registrado también afloramientos menores en Ampujaco, Las Juntas y Mina

Capillitas (Bossi et al., 1987; Muruaga, 1998). Está compuesta por areniscas finas de color amarillo, con estratificación cruzada, alternando con pelitas macizas y laminadas, y delgadas capas de conglomerados. Contiene fósiles de vertebrados y restos vegetales, además de dos niveles tobáceos y abundantes materiales volcanoclásticos (Bossi y Muruaga, 2009). Se apoya sobre la Formación Las Arcas mediante un contacto neto o transicional, y se encuentra cubierta en concordancia por la Formación Andalhualá (Bossi et al., 1987; Muruaga, 1998).

Se reconocen tres miembros: Los Baños, El Áspero y El Jarillal (Muruaga, 1998, 2001b). La sección inferior (Miembro Los Baños) representa un ambiente fluvial de llanura con canales efímeros y condiciones estacionales húmedas. La sección media (Miembro El Áspero) refleja aporte de brechas y conglomerados volcanoclásticos asociados a procesos de remoción en masa y volcanismo contemporáneo. Finalmente, la sección superior (Miembro El Jarillal) registra un sistema fluvial entrelazado gravoso con predominio de areniscas y clastos metamórfico-graníticos, asociado a la atenuación del volcanismo (Muruaga, 1998).

La unidad corresponde al Mioceno tardío (Tortoniano), con una fauna asignada al Huayqueriense (6,8–9 Ma) (Powell et al., 1998; Flynn y Swisher, 1995). Una colada andesítica intercalada en el Miembro El Áspero fue datada en $9,14 \pm 0,09$ Ma (Sasso y Clark, 1998). La formación es correlacionable con la Aloformación Playa del Zorro (Bossi et al., 1992, 1993, 1999, 2001) y con el Conglomerado Ampajango en el valle de Santa María (Bossi et al., 1987, 1993). El límite superior con la Formación Andalhualá se ubica en torno a los 7,5 Ma. sustentado por estudios radiométricos y magnetoestratigráficos (Marshall et al., 1979; Butler et al., 1984).

Grupo Santa María - Formación Andalhualá

Turner (1962) propuso originalmente el nombre de Formación El Cajón. Posteriormente Bossi et al. (1987, 1993, 1999) y Muruaga (1998) sugirieron utilizar el nombre de Formación Andalhualá. La unidad aflora extensamente y con espesores importantes en el área de Hualfín y Villa Vil-Puerta de Corral Quemado, disminuyendo sensiblemente de espesor hacia el sur por el faldeo occidental del cerro El Durazno (occidental). En el cerro Pampa, Bossi et al. (1999) separaron la unidad en dos secciones: a) conglomerádica fina con clastos subangulosos en la base y (b) una sección arenosa-limosa en la parte superior, con un espesor medido de 633 metros. La unidad se apoya en concordancia sobre el Miembro El Jarillal de la Formación Chiquimil. Por encima es cubierta en discordancia por la Formación Corral Quemado. La edad establecida en base a la fauna de mamíferos y dataciones radiométricas es miocena tardía-pleistocena (Bossi y Palma 1982). Los fósiles se asemejan en la forma y dimensiones a *Cyamo cytheridea* sp. estudiada por Echevarría (1991) para el Oligoceno de la provincia de Santa Cruz.

Formación Corral Quemado

Fue mencionada inicialmente como “Horizonte Corral Quemado” por Riggs y Patterson (1939) para describir la parte superior del Neógeno, siendo posteriormente elevada a rango de formación por Bossi et al. (1987, 1993). Se reconoce principalmente en el valle de Santa María y quebrada de Amaicha, asociada a conglomerados cuspidales de la sucesión cenozoica (Bossi et al., 1987, 1999). Sus afloramientos se extienden desde el cerro El Durazno hacia el sureste hasta el río Lajas, incluyendo sectores como el río Loconte y el área del Tesoro, donde se encuentra en contacto tectónico con el basamento cristalino por fallas inversas (Bossi et

al., 1993). Litológicamente, consiste en una secuencia granocreciente de conglomerados finos clasto-soportados, alternando con areniscas medias a finas y niveles tobáceos en la parte superior, alcanzando hasta 850 metros de espesor en el oeste de la sierra de Hualfín (Muruaga, 1998). Estratigráficamente, el contacto con la Formación Andalhualá es neto y probablemente discordante, y la unidad es cubierta en discordancia angular por los Rodados de la Puna. La edad mínima en el techo de la unidad se ubica en el Zancleano (Plioceno), con dataciones radiométricas de niveles tobáceos de $3,54 \pm 0,03$ Ma (Marshall et al., 1979). Correlaciona con el Montehermosense y con unidades como la parte superior de la Formación El Cajón y la Subsecuencia IId del valle del Cajón (González Bonorino, 1950b; Turner, 1962; Bossi et al., 1993).

Conglomerados de La Puna

También denominados *Punaschotter* (Penck, 1920). Constituyen los depósitos aterrazados más antiguos de la región, ubicados por encima de los 2200 m.s.n.m., en mesadas elevadas y fuertemente disectadas por la erosión. Están compuestos por conglomerados gruesos de procedencia local, poco consolidados y con matriz arenosa, que presentan intercalaciones de arenas y cenizas volcánicas, formando bancos tabulares y lentes de areniscas arcósicas. Los clastos, subredondeados y con pátinas negras, muestran escasa deformación (Bossi et al., 2001). Estratigráficamente, coronan lomadas y traslapan en discordancia los sedimentos neógenos y el basamento, correlacionándose con la Secuencia III del valle del Cajón (*Aloformación Totoral*) y con la Formación Yasyamayo del valle de Santa María (Bossi et al., 1993). Su edad se asigna al Pleistoceno inferior, en concordancia con Strecker (1987).

Depósitos pedemontanos antiguos

Estos depósitos se desarrollan adosados a frentes montañosos, suelen ser de extensión limitada, disectados y erosionados por arroyos, formando remanentes de erosión. Litológicamente, están compuestos por bloques, gravas y arenas muy gruesas y heterométricas, sin selección, con sedimentación caótica y estratificación ausente o muy burda, frecuentemente entrecruzada. Su composición refleja el área de aporte, predominando rocas graníticas y metamórficas del basamento, y en menor medida sedimentitas y volcanitas terciarias. El espesor no supera los 50 metros (Merea Llanos, 1980). Se interpretan como el resultado de variaciones alocíclicas relacionadas con movimientos tectónicos en bordes de cuencas cenozoicas intermontanas y cambios climáticos, que modificaron la descarga hídrica y rejuvenecieron las redes fluviales, propios de ambientes de alta energía como los piedemontes, donde dominan flujos masivos.

En cuanto a su cronología, los depósitos pedemontanos aluviales antiguos y las gravas de pedimento se asignan a la Formación Pipanaco (Lafleur, 1981), depósitos del nivel inferior (González Bonorino, 1978), segundo y tercer nivel de depósitos de acarreo (Ruiz Huidobro, 1975) y Formación El Ingenio (Merea Llanos, 1980), con una edad estimada entre el Pleistoceno superior y el Holoceno inferior.

Depósitos de abanicos aluviales

Constituyen el principal componente de los sectores pedemontanos que bordean las cuencas, formados por la coalescencia lateral de abanicos aluviales (Lafleur, 1981). Estos depósitos están conformados por materiales transportados principalmente por corrientes fluviales

tractivas entrelazadas, movilizados como carga de fondo, generando una gradación granulométrica normal: los sedimentos más gruesos se concentran en las facies proximales cercanas al frente serrano, mientras que los más finos se localizan en las facies distales hacia el pie del abanico. En las facies proximales, la alta pendiente favorece el transporte de materiales muy gruesos, en ocasiones mediante flujos densos de fango y detritos, así como avalanchas de rocas, produciendo fanglomerados y conglomerados pobremente seleccionados, con sedimentación caótica, matriz arenosa y estratificación grosera o ausente. Las facies distales, en cambio, presentan sedimentos limosos y arcillosos que transicionan hacia planicies de inundación. Estos depósitos se asocian a la Formación Pipanaco (Lafleur, 1981), a los depósitos del nivel inferior (González Bonorino, 1978), segundo y tercer nivel de depósitos de acarreo (Ruiz Huidobro, 1975) y a la Formación El Ingenio (Merea Llanos, 1980), con una edad probable del Pleistoceno superior al Holoceno inferior.

Depósitos de barreales

Constituidos por limos y arcillas no consolidadas, con capas lenticulares de mayor granulometría. Han recibido distintas denominaciones, como Depósitos de bolsón (González Bonorino, 1950b), Depósitos fluviales y evaporíticos (Merea Llanos, 1980) y Formación Colpes (Lafleur, 1981). Se forman en planicies de inundación por derramamiento y avulsión de ríos, especialmente en sectores con escasa pendiente hacia el centro de la cuenca. Se relacionan con sistemas eólicos y evaporíticos en zonas más internas, donde médanos bloquean cauces temporarios, generando estancamientos que, tras la evaporación, originan láminas arcillosas con grietas de desecación.

Depósitos aluviales actuales

Ubicados en quebradas y planicies aluviales, representan sedimentos recientes de ríos y terrazas adyacentes a los valles fluviales. Están compuestos principalmente por gravas y arenas en los cauces, y por limos y arcillas en remansos y planicies de inundación. La granulometría disminuye desde las zonas montañosas hacia las depresiones (Candiani et al., 2025).

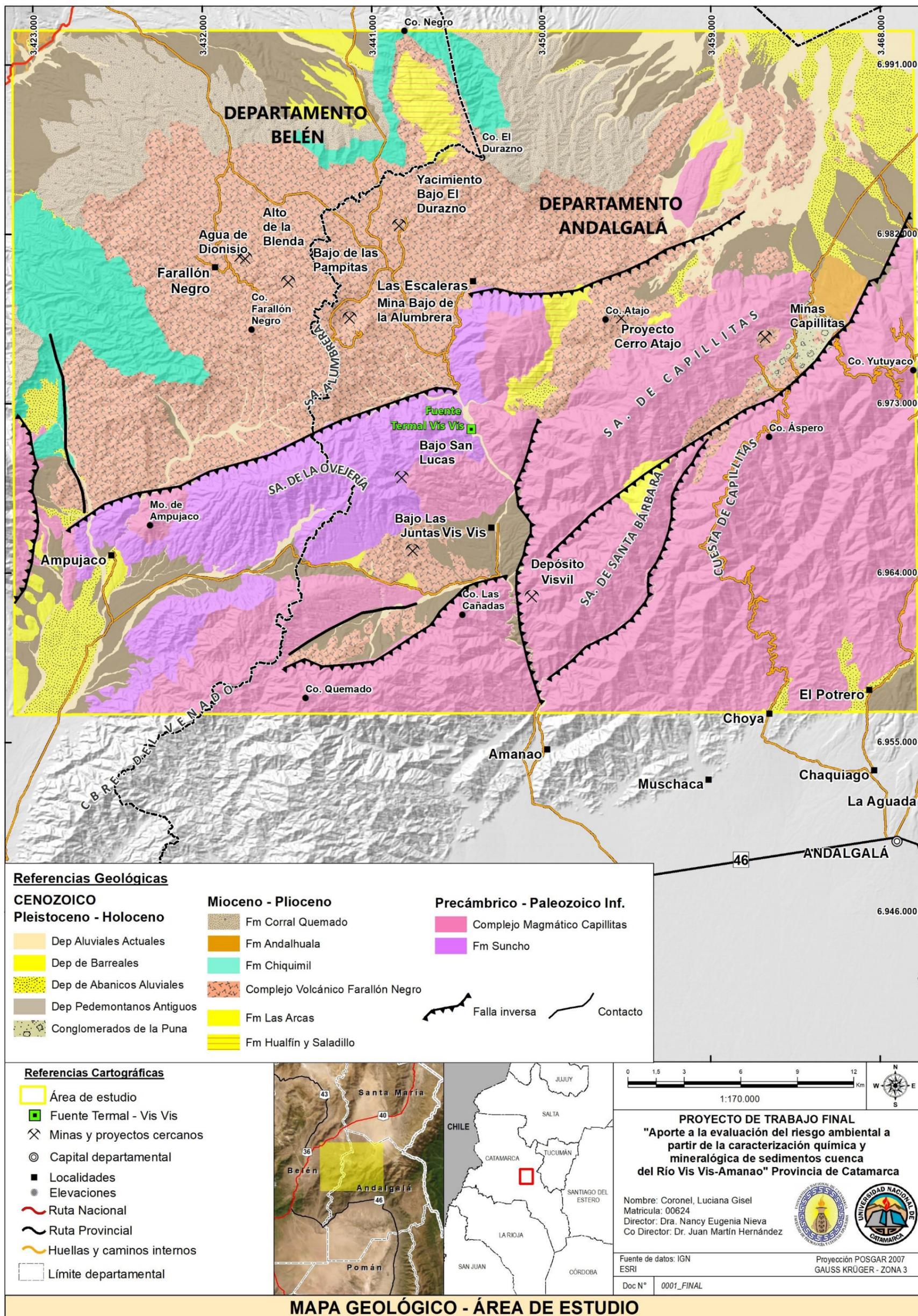


Figura 5. Mapa geológico-estructural de la zona de estudio.

3.3. GEOMORFOLOGÍA

La zona de estudio presenta una fisonomía distintiva, caracterizada por bloques montañosos que exponen secuencias de rocas del basamento metamórfico-granítico, elevados tectónicamente y separados por cuencas elongadas de orientación submeridiana, rellenas por espesos depósitos sedimentarios. La mayoría de estos grandes bloques están delimitados por fallas inversas de alto ángulo (González Bonorino, 1950b).

También pueden observarse diversas geoformas, como conos aluviales, glacis de erosión y depósitos fluviales, originadas por la acumulación de sedimentos en los piedemontes. Estas forman extensos depósitos sobre la ladera occidental de la Sierra de Aconquija, la ladera oriental del cerro El Durazno y hacia el suroeste de la Sierra de la Ovejería, donde es posible identificar hasta dos niveles. El drenaje, por su parte, está controlado por la estructura de las rocas o sedimentos sobre los que se desarrolla (Gutiérrez, et al. 2023).

- Sierras y cerros: El área de estudio está conformada por un conjunto de morros y cerros, con predominios de formas cónicas típicos de zonas volcánicas de clima semidesértico, en cambio hacia el sudeste de Vis Vis, predominan algunos filos más elevados y abruptos (Luraghi y Truco, 2007).

La falla de Atajo es una estructura regional que reposa sobre unidades morfoestructurales que sufrieron deformación durante el tectonismo andino. El Cerro El Durazno es un remanente del cono del volcán Farallón Negro, que fue cortado por la falla de Atajo. La Sierra de la Ovejería y el Complejo Volcánico Farallón Negro se encuentran al oeste de la falla de Atajo.

La Sierra de La Ovejería tiene 24,5 km de largo, 7 km de ancho y 3.100 metros sobre el nivel del mar. Está formada principalmente por rocas metamórficas. La sierra de Venado tiene 45,4 km de largo, 23,6 km de ancho y se eleva 2.700 m s. n. m. Está compuesta casi en su totalidad por rocas graníticas. La cordillera de Belén-Cerro Pampa tiene una longitud de 57,4 km y un ancho de 16,6 km, y su extremo norte alcanza los 3.200 m.s.n.m.

- Valles y campos: El valle de Ampujaco se extiende con rumbo NNE entre la Sierra de Venado al este y el Cerro Pampa al oeste; en su punto más ancho alcanza los 8 km de longitud. Este valle se conecta con el valle más angosto de Suncho al norte, que tiene rumbo E-O y separa las sierras de Ovejería y Venado, por donde fluye el río Suncho hacia el valle de Ampujaco.

Los campos Tampa-Tampa (al norte) y Vis-Vis (al sur) se ubican en el borde occidental de la falla de Atajo y ocupan áreas de 8,6 km² y 6 km², respectivamente. Estos campos fueron identificados como estructuras de caldera asociadas a zonas mineralizadas (Llambías, 1970; Proffet, 2003; Palacio et al., 2005).

- Conos aluviales del Valle de Ampujaco: En el flanco oriental del cerro Pampa y hacia el noreste de la Sierra de Capillitas, los conos aluviales presentan características morfológicas distintivas que los diferencian de otros cercanos. Estas particularidades se deben al relieve estructural, evidenciado por la prominencia de las sierras, que da lugar incluso a un segundo nivel en la zona. Los depósitos están compuestos principalmente por areniscas desde la base hasta la cima, con intercalaciones de conglomerados lenticulares con soporte de matriz. Hacia la parte superior, la

secuencia transiciona a conglomerados finamente estratificados, con clastos predominantemente metamórficos, graníticos y volcánicos (Gutiérrez et al., 2023).

3.4. TECTÓNICA

En la región se determinaron cuatro eventos deformacionales andinos sucesivos (Seggiaro, et al., 2014). El primero de ellos, de carácter extensional, se produjo desde los inicios de la depositación de la Formación Hualfín. La composición de sus sedimentos, producto de la erosión de rocas del basamento —principalmente de origen granítico— en facies distales (Galli et al., 2012), es compatible con aportes provenientes de un cratón o de un frente orogénico distante. Esto permite interpretar el depósito como parte de una cuenca extensional intracratónica o de trasarco.

Durante el segundo evento tectónico la cuenca de la Formación Hualfín, inicialmente fracturada por extensión, fue plegada y erosionada por esfuerzos compresivos previos a la depositación del Complejo Volcánico Farallón Negro. La disposición de las fallas habría condicionado la formación de pliegues con orientación oblicua respecto al rumbo andino, limitados a la Formación Hualfín, sobre los cuales el Complejo Volcánico Farallón Negro se apoya en discordancia.

A la etapa compresiva, responsable de la deformación y el cierre de la cuenca de la Formación Hualfín, le siguió la depositación del Complejo Volcánico Farallón Negro en una cuenca expansiva caracterizada por Bossi y Muruaga (2009) como extensional.

La incorporación de la región al frente orogénico andino durante el Mioceno, habría reactivado parte de las fallas generadas en la etapa anterior y provocado la rotación diferencial de bloques de basamento, originando una zona de transferencia dominada por movimientos transcurrentes. La cinemática transcurrente generó la sucesión de esfuerzos transtensivos, seguidos de esfuerzos transpresivos, que dieron origen al tercer y cuarto evento tectónico respectivamente, en un proceso de deformación continua desde el Mioceno medio hasta el presente (Seggiaro et al., 2014).

Durante la etapa transtensiva, se desarrolló la cuenca del Complejo Volcánico Farallón Negro, sintectónica y con intensa actividad magmática. A la etapa transtensiva le sucedieron movimientos transpresivos que iniciaron la elevación del sistema serrano regional con la exhumación de al menos 5 km de corteza en los últimos 6 Ma, (Sobel y Strecker 2003) a 7,5 km desde el Mioceno tardío (<8 Ma, Dávila et al. 2012).

En su fase final, el magmatismo de la región estuvo signado por los emplazamientos de cuerpos intrusivos, en su mayoría mineralizados, entre los que se destacan los de Bajo de la Alumbraera, Farallón Negro, cerro Atajo, Capillitas, Agua Rica y Filo Colorado.

El tiempo de alzamiento de las sierras es coincidente con la finalización de la actividad magmática del Complejo Volcánico Farallón Negro, acotada por Sasso et al. (1995) entre los 12,5 y 5 Ma y con mayor precisión entre los 9,5 a 6,8 Ma por Harris et al. (2004) y Halter et al. (2004).



CAPÍTULO IV.

METODOLOGÍA

4. METODOLOGÍA

4.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PREVIA

Dentro de esta actividad, se actualizó y completó la información obtenida hasta el momento en relación a los antecedentes geológicos, geomorfológicos y geoquímicos del sistema estudiado. Para ello se recurrió a información publicada en revistas científicas nacionales e internacionales. Asimismo, se realizó un análisis crítico de toda la información que se recopiló en torno a la caracterización geoquímica del entorno acuático.

4.2. MUESTREO Y TRATAMIENTO DE LA MUESTRA

Las muestras con las que se trabajó fueron recolectadas previamente por el grupo de investigación en Biogeoquímica Ambiental (GIBiGea) (Figuras 6 y 7). Las mismas consistieron en tres muestras compuestas de sedimentos de corriente (cada una constituida por siete réplicas) recolectadas en cada uno de los ocho sitios donde el Ministerio de Minería de la Provincia de Catamarca realiza los monitoreos periódicos de agua sobre el río Vis Vis (cinco sitios sobre el curso principal, y tres sobre aportes laterales; $n = 3$ para cada sitio). Como control, se tomaron muestras en un arroyo alejado del área de estudio y fuera del CVFN. Los sedimentos se colectaron con pala de teflón, embolsando y sellando doblemente en bolsas plásticas para minimizar la difusión de O_2 y se transportaron al laboratorio, manteniéndose refrigeradas a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente (Figura 8).



Figura 6. Fotografías tomadas durante el muestreo de sedimentos de corriente. A), B) Muestreo en sitio DS5. C), D) muestreo en sitio DS6.



Figura 7. Fotografías tomadas durante el muestreo de sedimentos de corriente. A), B) Muestreo en sitio DS7D. C) muestreo en sitio DS8.

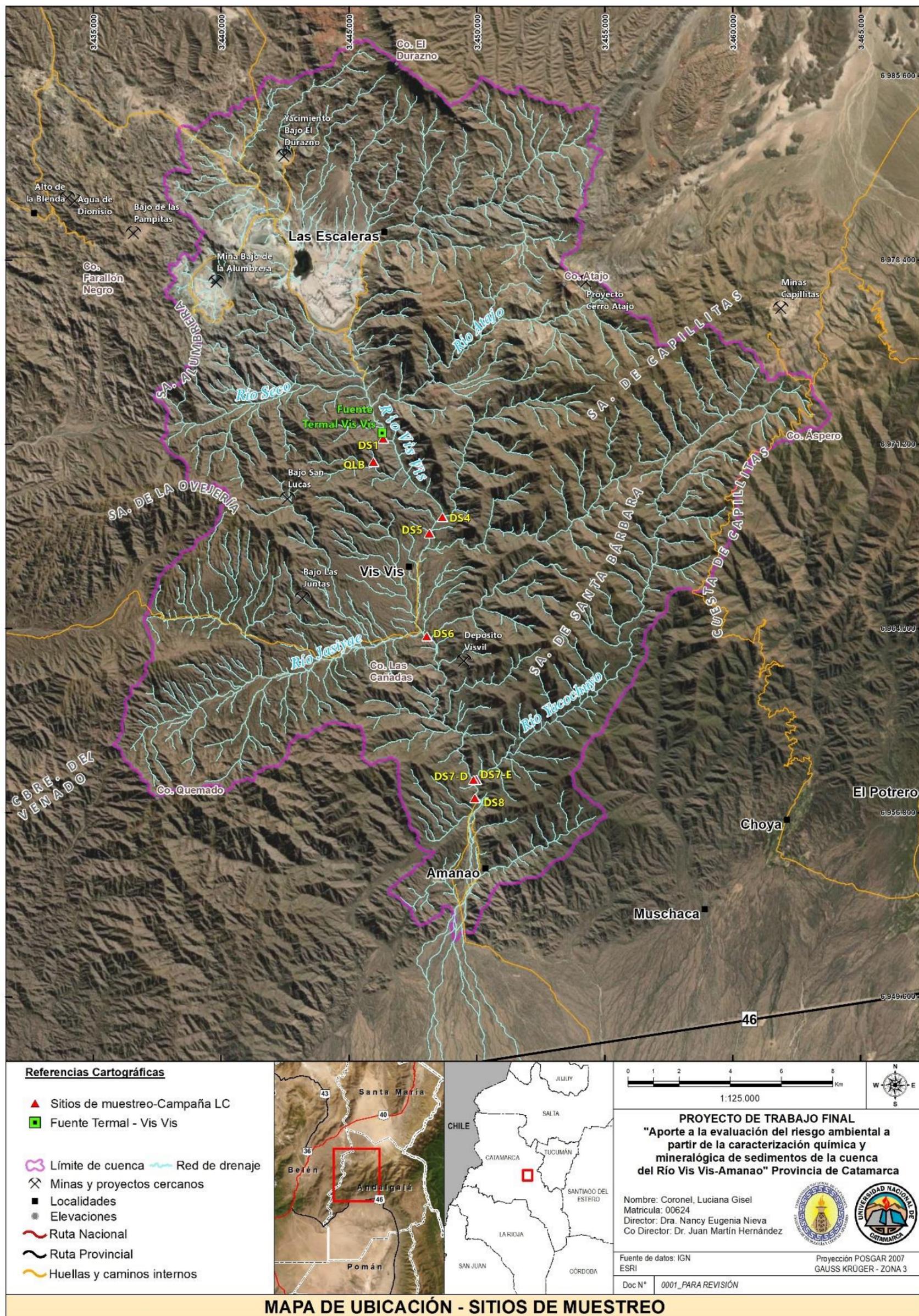


Figura 8. Mapa de ubicación de los sitios de muestreo, y su relación con depósitos minerales.

En el laboratorio, las muestras fueron secadas a 100 °C en estufa. Posteriormente, se hicieron pasar por un tamiz de 200 mesh de malla (< 75 µm) y se almacenaron en bolsas plásticas para su conservación y posteriores determinaciones analíticas.

El empleo de la fracción de sedimento que pasa por un tamiz de 75 micras (µm) es una práctica ampliamente aceptada en estudios geoquímicos, debido a varias ventajas técnicas y analíticas. En primer lugar, las partículas finas presentan una mayor superficie específica, lo que favorece la adsorción de metales, nutrientes y contaminantes, permitiendo detectar concentraciones más representativas de los elementos de interés. Además, esta fracción tiende a ser más homogénea, reduciendo la influencia de componentes gruesos o heterogéneos que podrían distorsionar los resultados. Desde el punto de vista ambiental, los elementos asociados a partículas finas son más móviles y biodisponibles, lo que resulta particularmente relevante en estudios de transporte de contaminantes y evaluación de riesgos ecológicos. Asimismo, el uso de esta fracción permite minimizar la variabilidad introducida por minerales primarios gruesos (como cuarzo o feldspatos), que suelen ser poco reactivos y diluyen la señal geoquímica. Finalmente, adoptar el tamiz de 75 µm facilita la comparación con estudios previos a nivel internacional, ya que constituye un estándar metodológico ampliamente utilizado en geoquímica ambiental (Horowitz, 1991; IAEA, 2003; Chen et al., 2007).

4.3. ANÁLISIS DE PARÁMETROS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS

4.3.1. DETERMINACIÓN DE PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Estos parámetros se realizaron según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Eaton et al., 2005). La prueba efectuada consistió en utilizar la suspensión de muestras de sedimento en una relación sólido-agua 1:5, 5 gramos de sedimentos en 25 ml de agua bidestilada (Figura 9 A, B, C, D). Dichas muestras fueron colocadas en un agitador DLAB SK-0180-S, durante 80 minutos a 200 rpm (Figura 9 E, F), y se las dejó reposar durante 30 minutos. Luego se procedió con la toma de parámetros de pH y Conductividad eléctrica (CE), con el Multi-Analizador de laboratorio marca Lutron modelo WA-2015 (Figura 10 A, B, C). Los resultados obtenidos de conductividad eléctrica se expresaron en microsiemens por centímetro (µS/cm).



Figura 9. Fotografías tomadas durante la determinación de pH y CE. A), B), C) Pesaje de muestras con balanza DENVER INSTRUMENT modelo TB-124A. D) Suspensión de muestras. E), F) Muestras en agitador DLAB SK-0180-S.

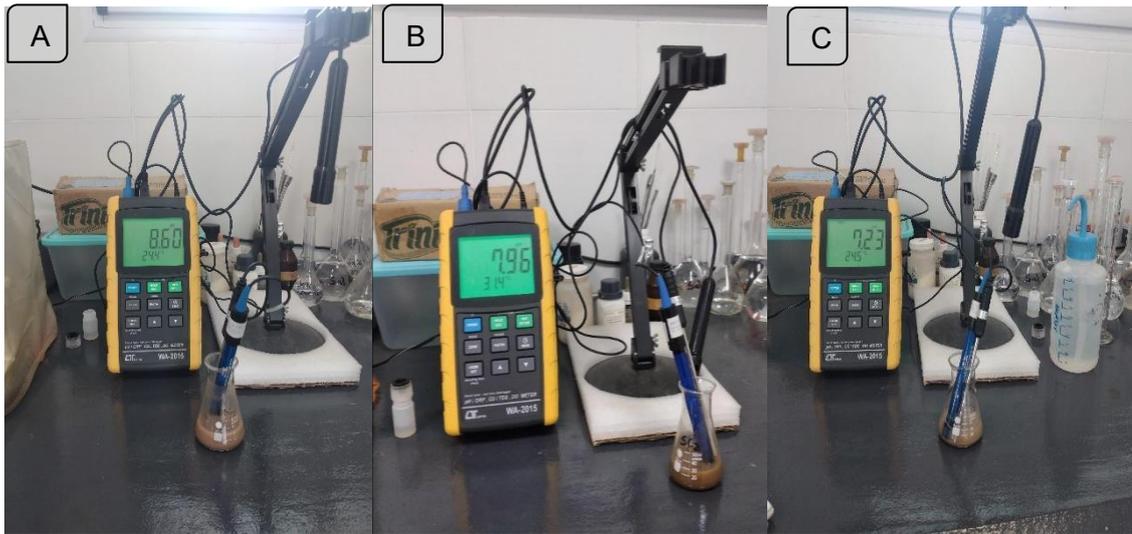


Figura 10. Fotografías tomadas durante la determinación de pH y CE. A), B), C) Medición de parámetros con Multi-Analizador de laboratorio Lutron modelo WA-2015.

4.3.2. ANÁLISIS DE SILICATOS

El análisis de silicatos se efectuó mediante el procedimiento descrito por Kolthoff et al., (1979), a partir de una doble insolubilización con HCl y evaporación a sequedad, precipitando de esta manera el SiO₂ hidratado.

Para ello, se pesó un gramo de sedimento (Figura 11, A) en un erlenmeyer y se agregó 20 ml de ácido clorhídrico (6 M) (Figura 11, B) en baño de arena a una temperatura de 110°C por 24 horas (Figura 11, C). Posteriormente, se humedeció nuevamente la muestra con 20 ml más del ácido y se dejó en el baño de arena por 10 minutos (Figura 11, D).

Para eliminar el exceso de ácido, se añadió 20 ml de agua destilada. Posteriormente se filtró. Este procedimiento se realizó varias veces (Figura 11 E, F). Finalmente, la muestra con el papel de filtro se colocó en un crisol previamente pesado, y se calentó en mufla a 1050°C, durante 30 minutos (Figura 12 A, B, C). En un desecador se dejó enfriar el crisol por dos horas aproximadamente (Figura 12 D, E) y se pesó, repitiendo esta operación hasta peso constante.



Figura 11. Fotografías tomadas durante el análisis de silicatos. A) Pesaje de muestras con balanza DENVER INSTRUMENT modelo TB-124A. B) Muestras durante la primera insolubilización con HCL. C) Muestras en baño de arena, se utilizó una placa calefactora digital, modelo DB-IV. E), F) Lavado y centrifugado de muestras con bomba de vacío.

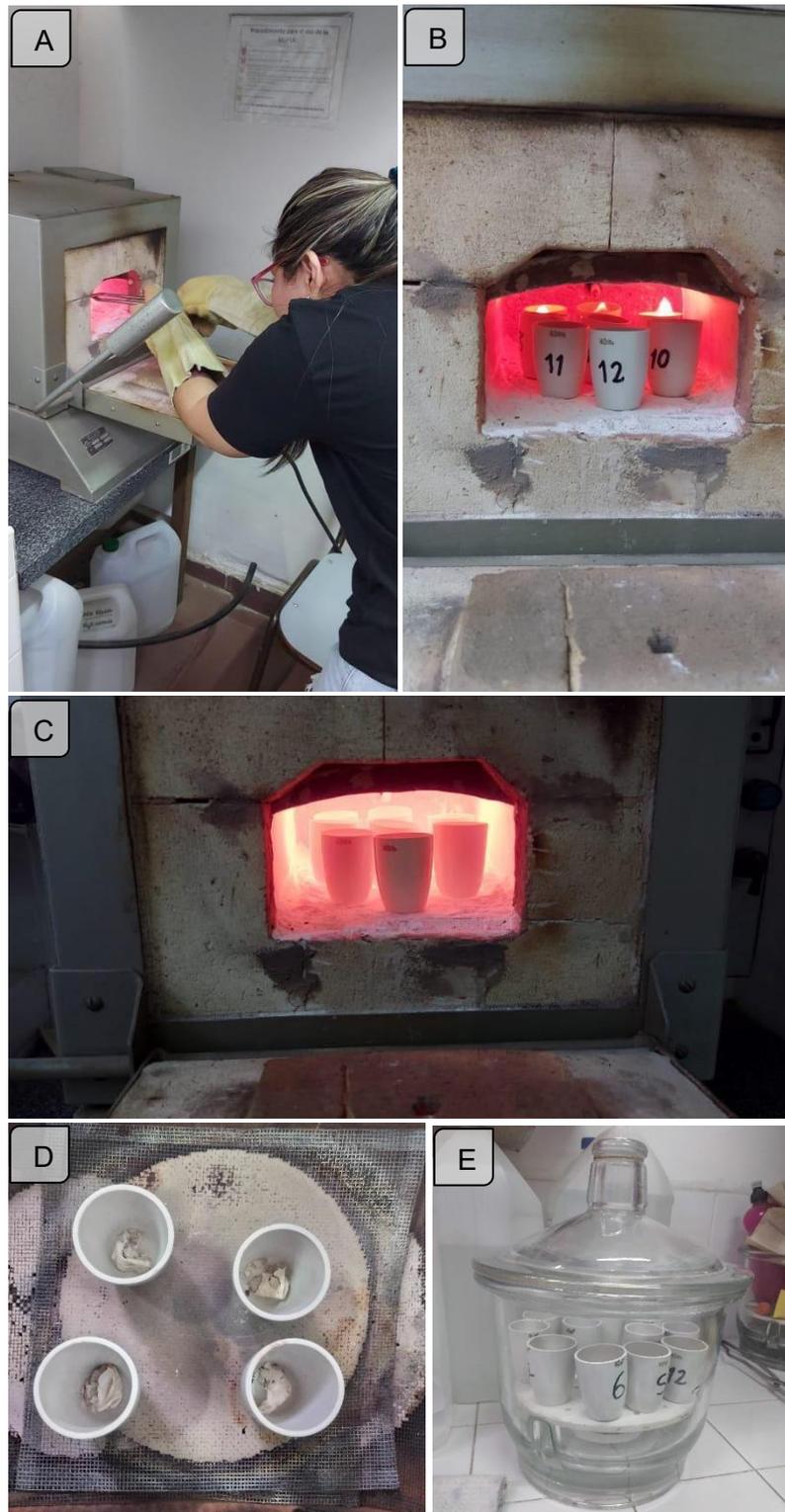


Figura 12. Fotografías tomadas durante el análisis de silicatos. A), B), C) Muestras colocadas en mufla, durante 30 minutos a una temperatura de 1050 °C. D) Muestras posteriores a su calcinación. E) Muestras en desecador para evitar la hidratación de las mismas.

4.3.3. ANÁLISIS DE MATERIA ORGÁNICA

La técnica llevada a cabo fue la de Loss On Ignition (LOI) de Barrezueta-Unda et al., (2020). La prueba consistió en pesar un gramo de sedimento en un crisol de porcelana previamente tarado (Figura 13 A). Luego se calcinó a una temperatura de 550°C en un horno de calcinación, durante 30 minutos (Figura 13 B, C). En un desecador se enfrió, se pesó y se repitió la incineración hasta alcanzar peso constante (Figura 13 D, E, F). Los resultados se expresan en porcentaje de materia orgánica (%MO). La fórmula utilizada para obtener los resultados finales es la siguiente:

$$LOI = \left(\frac{\text{Peso seco al aire del suelo} - \text{peso de la muestra despues de la ignición}}{\text{Peso seco al aire del suelo}} \right) \times 100$$



Figura 13. Fotografías tomadas durante el análisis de materia orgánica. A) Pesaje de muestras, con balanza DENVER INSTRUMENT modelo TB-124A. B), C) Muestras en horno mufla para su calcinación, a 550°C. D), E) Muestras posteriores a la calcinación y enfriamiento en desecador. F) Pesaje final de muestras.

4.3.4. ANÁLISIS DE CARBONATOS

La técnica empleada se llevó a cabo de acuerdo con las directrices de la FAO (2021).

Para la misma, se pesó entre 1 y 5 gramos de muestra -dependiendo de la cantidad de carbonatos- y se colocó en un erlenmeyer de 100 mL (Figura 14 A). A continuación, se acidificó la misma con 20 mL de HCl estandarizado, usando una pipeta aforada (Figura 14 B). Posteriormente, se cubrió el erlenmeyer con un vidrio reloj y se calentó la mezcla de sedimento y ácido hasta ebullición durante 3 minutos (Figura 15 A). Luego, se añadieron 50 mL de agua destilada utilizando una probeta, y se dejó enfriar la mezcla (Figura 15 B). Los sedimentos se trasvasaron a un Erlenmeyer de 150 mL, se agregó 3 gotas de indicador fenolftaleína y, agitando la muestra, se procedió a titular con una solución de NaOH 1 N. Finalmente, ante el cambio de coloración de la solución -rosa suave- se registró el volumen de NaOH utilizado (Figura 15 C, D, E). Con los resultados obtenidos se calculó el contenido de carbonatos como % CaCO₃ utilizando la siguiente fórmula:

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

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 corresponde al equivalente en gramos de CaCO₃ que reacciona con 1 mL de HCl 1N.

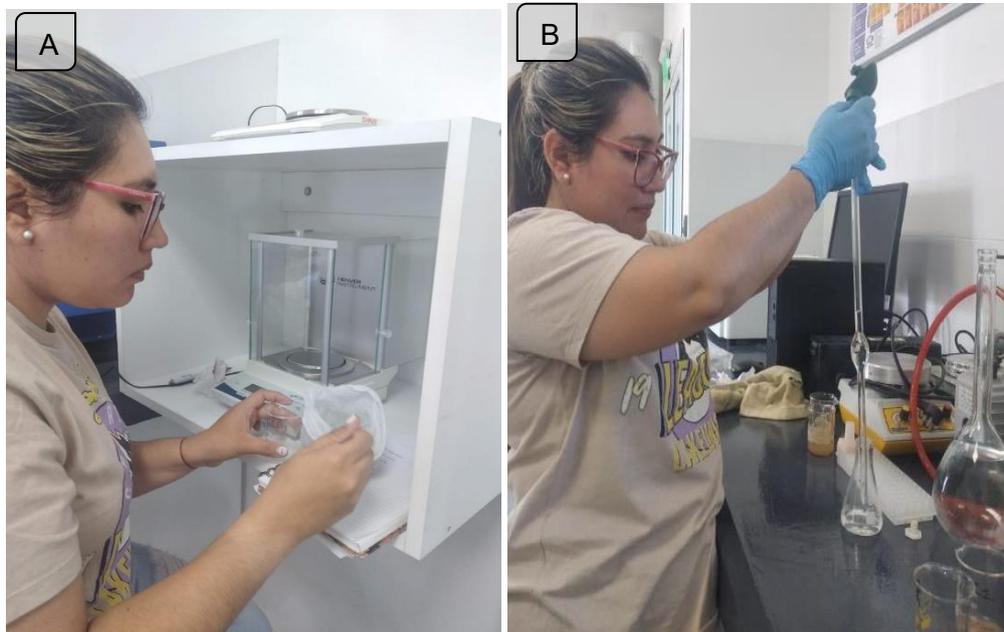


Figura 14. Fotografías tomadas durante el análisis de carbonatos. A) Pesaje de muestras, con balanza DENVER INSTRUMENT modelo TB-124A. B) Incorporación de HCl a las muestras.

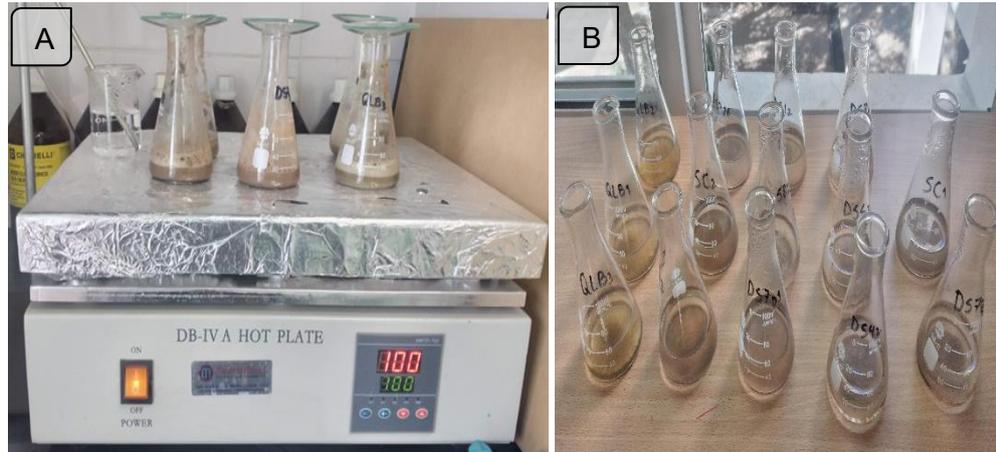


Figura 15. Fotografías tomadas durante el análisis de carbonatos. A) Ebullición en estufa durante 3 minutos. B) Muestras para titular. C), D) E) Valoración de exceso de ácido con solución de NaOH.

4.3.5. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)

La técnica empleada para determinar la capacidad de intercambio catiónico fue la descrita por Summer y Miller (1996).

Para iniciar este procedimiento, se colocó 5 gramos de muestra en un matraz de Erlenmeyer de 100 ml, y se añadió 25 ml de una solución de acetato de amonio (NH_4Ac) 1N ajustada a pH 7 (Figura 16 A). La mezcla se agitó durante 30 minutos en un agitador magnético para asegurar una adecuada disolución e interacción del acetato de amonio con el sedimento (Figura 16 B). Luego, se procedió a filtrar la mezcla de sedimento utilizando un embudo buchner conectado a una bomba de vacío para separar el líquido del sólido. El matraz se lavó con dos porciones de 5 ml de solución de acetato de amonio para asegurar la recuperación de cualquier residuo de la muestra.

A continuación, se eliminó el exceso de acetato de amonio lavando el filtro con 50 ml de alcohol etílico (99,9%) distribuido en 5 porciones de 10 ml cada una (Figura 16 C). Luego el líquido filtrado se descartó y se colocó nuevamente la muestra en el matraz. Finalmente, la misma se lavó con 50 ml de NaCl al 10%, añadidos en 5 porciones de 10 ml cada una. El contenido se vertió en otro matraz limpio y se añadió 10 ml de formol al 40% al filtrado para neutralizar la muestra. La solución se llevó al agitador magnético para asegurar la homogeneización. Para la titulación se preparó una bureta con NaOH al 0,1 N y se añadieron 5 gotas de fenolftaleína a la solución en el matraz de Erlenmeyer. Luego, se tituló la solución filtrada manteniendo el agitador magnético encendido, hasta que viró a color rosa violáceo (Figura 16 D, E), inmediatamente se registró el volumen de NaOH gastado. Se preparó un blanco con 50 ml de NaCl al 10% y 10 ml de formol al 40%. Se lo llevó al agitador magnético donde se añadieron 5 gotas de fenolftaleína tituló con NaOH 0,1N hasta la aparición del color rosa violáceo, anotando el volumen gastado. Con los resultados obtenidos se calculó la CIC en meq /100 g a partir de la siguiente fórmula:

$$CIC \left(\frac{meq}{100 g} \right) = \frac{Vol. gastado de NaOH - Vol. gastado de NaOH en el blanco}{Peso de la muestra de suelo (5 g)}$$



Figura 16. Fotografías tomadas durante el análisis de CIC. A) Pesaje de muestras, con balanza DENVER INSTRUMENT modelo TB-124A. B) Lavado y centrifugado de muestras. D) Muestras para titular. E) Muestras tituladas.

4.3.6. DETERMINACIÓN MINERALÓGICA MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El análisis se realizó en el laboratorio Minerales de Arcilla en el Centro de Investigaciones 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 difractor PANalyticalX'Pert Pro operando 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 de fases se efectuó utilizando el software libre Profex 5.4 (Ver anexo figuras 26 y 27).

4.3.7. ANÁLISIS DEL CONTENIDO METAL/OID/ES

La composición química de los sedimentos de corriente se determinó mediante INAA y AAS. Este análisis fue realizado previamente por el grupo de investigación en Biogeoquímica Ambiental (GIBiGea).

- **Análisis por Activación Neutrónica Instrumental (INAA):** Se pesó un 1 g de cada muestra y se envió al Laboratorio Técnicas Analíticas Nucleares, Centro Atómico Ezeiza, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) para determinación de As, Ba, Br, Ca, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, K, La, Lu, Na, Nd, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Ta, Tb, Th, U, Yb y Zn.
- **Análisis elemental por espectrofotometría de absorción atómica (AAS):** La digestión de las muestras se efectuó en medio ácido. Brevemente, se pesó una fracción de 0,5g de muestra tamizada que se disolvió en una mezcla de HNO₃ al 65% y HCl al 37 % a temperatura de 95°C, con reflujo para evitar la pérdida de elementos volátiles. El residuo sólido fue posteriormente eliminado por filtraciones en calientes y la solución resultante fue diluida con agua tri-destilada y desionizada hasta un volumen final de 100 ml.

Las soluciones resultantes de la digestión ácida se enviaron para el análisis del contenido de algunos metales (Cd, Cu, Mn, Mo, Pb), no incluido en los análisis del contenido multielemental por AAS, al Laboratorio de Control Químico de Procesos de la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas.

Con los datos de concentración elemental, para cada muestra, se calculó el índice de geoacumulación (Igeo), siguiendo el método de Müller (1969). También se determinó el índice de riesgo ecológico (RI), que se obtiene a partir de la suma de los riesgos ecológicos potenciales (Er) de ciertos metales, según el enfoque propuesto por Hakanson (1980). Ambos índices se calcularon comparándolos con los datos de referencia establecidos por Ferpozzi et al. (2002a, b) (Tabla 1).

Tabla 1. Puntos de muestreo para el cálculo de Igeo, RI y Er y su contenido elemental. *Los puntos de muestreo del SEGEMAR fueron extraídos de Ferpozzi et al. (2002a, b)

Cuenca	Sitios	*Sitios SEGEMAR	Contenido elemental (ppm)							
			As	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	
Vis Vis – Amanao	C. Superior	DS1	4542	8,4	<0,5	19,1	2,93	687	19	71,9
	C. Media	DS5	4702	4,7	<0,5	13,2	2,95	679	21	68,4
		DS6	4702							
	C. Baja	DS7D	27853	8,2	<0,5	16,3	4,49	899	20	95,7
		DS8	12938	7,8	<0,5	16,8	3,04	694	20	74,3
	Afluentes	QLB	4786	10,7	<0,5	14,9	2,81	685	20	67,3
		DS4	27881	6,4	<0,5	13,3	2,79	614	17	65,2
		DS7E	12935	9,8	<0,5	22	3,49	779	18	82,1

Índice de geoacumulación (Igeo), propuesto por Müller (1969):

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1,5 B_n)$$

Donde C_n es la concentración del metal (n), B_n la concentración geoquímica basal del metal (n) y 1.5 un factor de corrección de los valores basales debido a efectos litogénicos.

Riesgo ecológico potencial (Er) e índice de riesgo ecológico potencial (RI), según Hakanson (1980):

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i = \sum T_r^i \times C_s^i / C_n^i$$

Donde C_f^i es el factor contaminante del elemento (i). C_s^i es el elemento cuantificado en las muestras, C_n^i es el contenido del elemento en la muestra basal. E_r^i es el **riesgo ecológico potencial** del elemento (i). T_r^i es el parámetro de toxicidad del elemento (As, 10; Cu, 5; Cr, 2; Zn, 1), y **RI** es el **índice de riesgo ecológico potencial** del total de los elementos traza peligrosos.

4.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Para el estudio estadístico se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) mediante el software Infostat, considerando las variables pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), carbonatos, silicatos y capacidad de intercambio catiónico (CIC), con el objetivo de evaluar diferencias significativas entre los sitios de muestreo. Asimismo, para la comparación múltiple de medias se empleó el test LSD de Fisher como test a posteriori.

4.5. ELABORACIÓN CARTOGRÁFICA

La cartografía temática preliminar se elaboró empleando el software ArcGIS y técnicas de teledetección. Para ello, se recopiló e interpretó cartografía preexistente del área de estudio, incluyendo los trabajos de Palacio et al. (2005), Seggiaro et al. (2014), Gutiérrez et al. (2023) y Candiani et al. (2025).

Con el apoyo visual de la plataforma Google Earth y el análisis del modelo digital de elevación (DEM) en ArcGIS, se llevó a cabo el mapeo del drenaje superficial. Esta etapa permitió delimitar los límites de la cuenca Vis Vis–Amanao, identificar los cursos principales de agua y establecer las divisorias entre las subcuencas asociadas. Posteriormente, se integraron archivos en formato shapefile junto con información geoespacial relativa a los puntos de muestreo, depósitos minerales, fuentes hidrotermales y las distintas unidades geológicas presentes en el área de estudio.

4.5.1. CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA

Para la descripción y caracterización de la geología local, se elaboró un mapa geológico propio a escala 1:170.000, basado en la cartografía preexistente previamente citada. La identificación de las unidades geológicas se llevó a cabo mediante técnicas de teledetección, utilizando imágenes satelitales de la plataforma Sentinel-2 e imágenes de alta resolución disponibles en Google Earth, ambas de acceso libre.

La cartografía fue generada mediante el software ArcGIS versión 10.8, empleando el sistema de proyección POSGAR 2007 / Gauss-Krüger – Zona 3.

4.5.2. CARTOGRAFÍA HIDROQUÍMICA

La cartografía hidroquímica se elaboró sobre una imagen satelital de la zona de estudio, considerando la clasificación composicional del agua determinada a partir de los resultados de los análisis hidroquímicos realizados en distintos años por la empresa Minera Alumbra y el Ministerio de Minería. Para ello, se emplearon diagramas de Stiff, que permiten visualizar gráficamente los contenidos de iones mayoritarios presentes en las aguas superficiales.

La superposición de estos diagramas sobre el mapa hidrológico permitió generar un mapa hidroquímico, el cual refleja tanto la distribución espacial como la composición química del agua superficial en toda la cuenca del río Vis Vis–Amanao. Además, este mapa incorpora información hidrológica como los cuerpos de agua, los ríos principales, la ubicación de los puntos de muestreo y las divisorias de aguas principales.

4.6. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA

A partir de los datos hidroquímicos provistos por el Ministerio de Minería de la provincia de Catamarca, fue posible elaborar los diagramas de Piper y Stiff correspondientes. Los registros más antiguos provienen del Programa de Monitoreo de Agua del río Vis Vis, implementado trimestralmente por la empresa Minera Alumbra y presentados ante dicho organismo provincial. Por su parte, el monitoreo más reciente se enmarca en el Programa del Proyecto Bajo de la Alumbra, específicamente en el Subprograma Cuenca Vis Vis-Amanao, y fueron realizados por la Dirección Provincial de Gestión Ambiental Minera (DiPGAM).

Posteriormente se agrupó la información por fechas de muestreo y parámetros, para realizar la validación y el procesamiento de estos datos (Tabla 2).

Tabla 2. Fechas de los muestreos utilizados para la confección de diagramas hidroquímicos.

N° de Muestreo	Fecha de muestreo	Ejecutado por
1° muestreo	7/2/2001	Empresa Minera Alumbra
2° muestreo	5/8/2001	Empresa Minera Alumbra
3° muestreo	21/2/2007	Empresa Minera Alumbra
4° muestreo	20/2/2022	Ministerio de Minería

4.6.1. VALIDACIÓN DE INFORMACIÓN

La información proporcionada por el Ministerio de Minería fue validada mediante la aplicación del método de balance iónico. Los análisis de laboratorio fueron verificados a través del balance entre aniones y cationes, utilizando la fórmula del % error de balance iónico propuesta por Appelo y Postma (2005). Esta metodología permite evaluar la coherencia interna de los análisis químicos, considerando que, en una solución eléctricamente neutra, la suma de las cargas positivas (cationes) debe ser equivalente a la de las cargas negativas (aniones). Para este estudio el error admisible del balance iónico fue menor al 8%.

Aunque la fórmula puede aplicarse a todos los iones analizados, comúnmente se consideran los iones mayoritarios y aquellos minoritarios que presenten concentraciones significativas. La interpretación del porcentaje de error se basa en el principio de que el análisis debe ser más preciso cuanto mayor sea la concentración total de sales disueltas en la muestra.

Fórmula de balance iónico utilizada:

$$Error (\%) = \frac{(\Sigma cationes - \Sigma aniones)}{(\Sigma cationes + \Sigma aniones)} \times 100$$

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 (Ver Tablas 16 y 17 en anexo).

4.6.2. PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Los datos de las muestras que superaron la prueba de % error por el método del balance iónico fueron registrados en una planilla de cálculo de Microsoft Excel y expresados en mg/L.

Posteriormente, se procesaron mediante el software *Diagrammes*, el cual convierte las concentraciones de los analitos (sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos y alcalinidad) a unidades de meq/L.

La caracterización hidroquímica del agua se realizó agrupando las muestras según su estación de monitoreo, con el fin de analizar la variación temporal de su composición a lo largo de los distintos años de muestreo.

Para la representación e interpretación de los datos, se seleccionaron los siguientes diagramas hidroquímicos:

- **Diagrama de Stiff:** Este gráfico permite representar la composición iónica de una muestra de agua mediante un polígono simétrico dividido por un eje central. En el lado izquierdo se grafican los cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y en el derecho los aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$). El tamaño del polígono está relacionado con el contenido total de sólidos disueltos, y los vértices más sobresalientes indican los iones dominantes (Árcega Santillán, 2010) (Figura 17). Este diagrama fue utilizado para identificar similitudes y diferencias entre muestras.

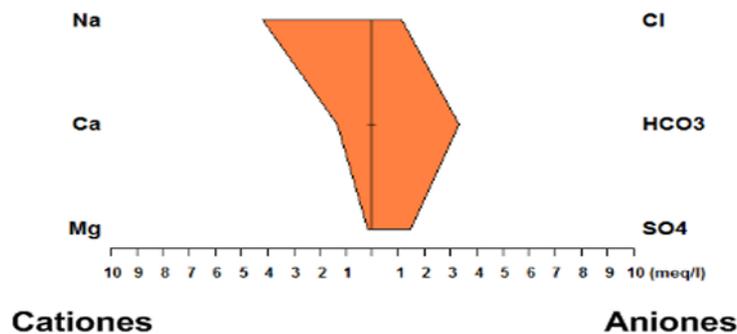


Figura 17. Diagrama de Stiff, extraído de Árcega Santillán, 2010.

- **Diagrama de Piper:** Este gráfico combina dos triángulos —uno para cationes y otro para aniones— y un rombo central que integra ambos para determinar el tipo hidroquímico del agua. Cada vértice del triángulo representa un ion, y los valores se expresan en porcentajes equivalentes. El rombo permite clasificar las aguas según su facies hidroquímica, facilitando una interpretación integral de la composición iónica (Árcega Santillán, 2010) (Figura 18). Este diagrama fue empleado para comparar composiciones entre distintos sitios de muestreo y establecer posibles tendencias hidroquímicas en la cuenca.

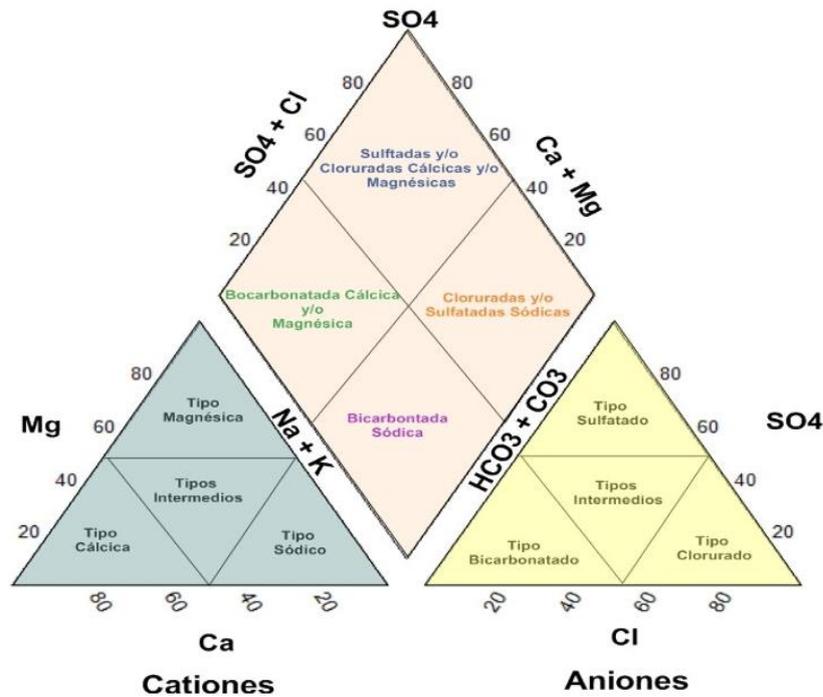


Figura 18. Diagrama de Piper, extraído de Árcega Santillán, 2010.

4.7. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

El análisis de la información obtenida se llevó a cabo mediante un enfoque integrador que articuló la interpretación de los resultados analíticos con el empleo de herramientas estadísticas, complementado con datos de contenido elemental provenientes de monitoreos previos. Para ello, se aplicaron criterios geoquímicos reconocidos y se realizó una comparación sistemática con antecedentes de monitoreo ambiental de aguas superficiales en la región. Esta metodología permitió interpretar la dinámica geoquímica de los sedimentos de corriente y evaluar su implicancia en el riesgo ambiental, considerando el contexto geológico donde se desarrolla el área de estudio.

4.8. REDACCIÓN DEL INFORME FINAL

La redacción del informe final se realizó sobre la base de la integración de todos los componentes desarrollados a lo largo del trabajo. Para ello, se organizaron los contenidos en capítulos temáticos. En el informe se incorporaron los antecedentes geológicos y ambientales relevantes, la caracterización detallada del área de estudio, la descripción de las metodologías empleadas en gabinete, campo y laboratorio, y la sistematización de los resultados obtenidos. Estos fueron presentados mediante gráficos, tablas y cartografía temática elaborada con herramientas SIG, lo cual facilitó su interpretación visual y espacial. Asimismo, se discutieron los resultados en función de criterios geológicos, geoquímicos y ecotoxicológicos reconocidos, y se los comparó con valores de referencia establecidos en la literatura científica y en normativas ambientales.



CAPÍTULO V.

RESULTADOS

5. RESULTADOS

5.1. PARÁMETROS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS EN SEDIMENTOS DE CORRIENTE

5.1.1. PH

Los valores de pH obtenidos en los sedimentos de corriente de los sitios de monitoreo se presentan en la Figura 19. Mientras que aquellos ubicados sobre el cauce principal de la cuenca Vis Vis-Amanao (representados con barras rojas) oscilaron entre 8,21 y 8,28, indicando condiciones ligeramente alcalinas. Por otro lado, los afluentes (representados con barras azules) también mostraron valores de pH levemente alcalinos, entre 8,24 en QLB, 8,27 en DS7E y 8,61 en DS4, siendo este último el más alto registrado en toda la cuenca. Sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. A diferencia de lo observado en Vis Vis- Amanao, el sitio de control, ubicado en otra cuenca, presentó valores de pH casi neutro (7,88).

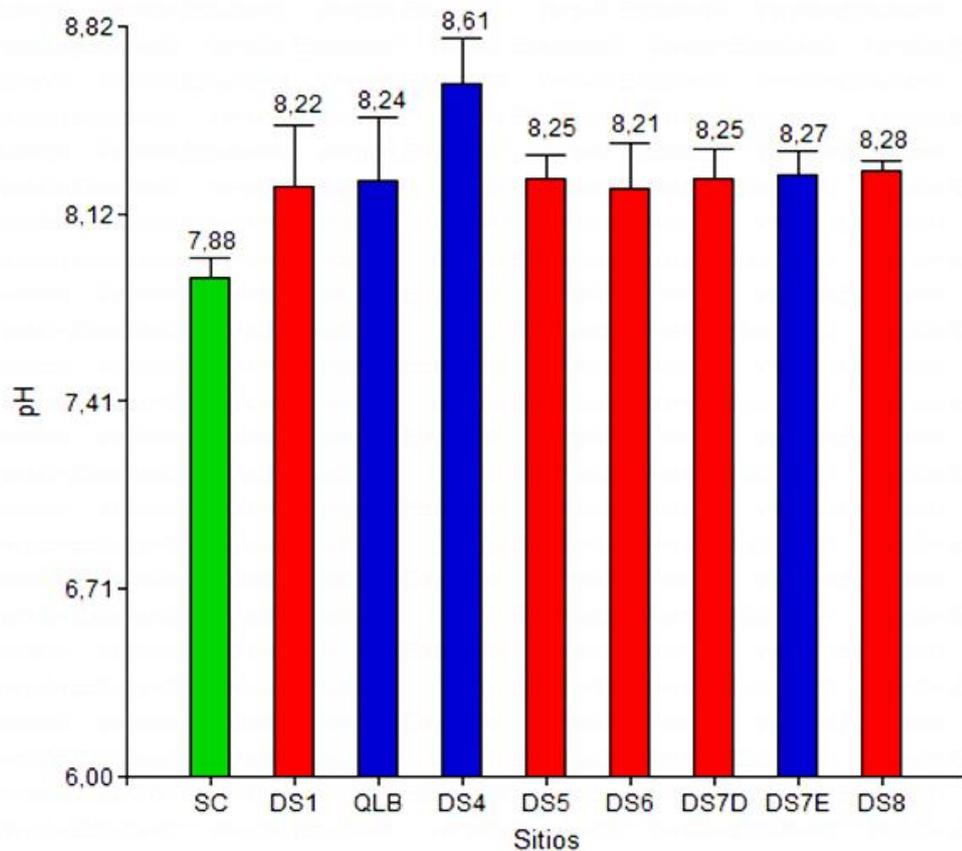


Figura 19. Valores de pH en sedimentos de corriente de los sitios de muestreo, representados mediante un gráfico de barras con barras de error. La barra verde corresponde al sitio control; las barras rojas, a puntos ubicados sobre el cauce principal de la cuenca Vis Vis-Amanao; y las barras azules, a sitios situados en afluentes.

5.1.2. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) (mS/cm)

Los datos de conductividad eléctrica (CE) registrados en los sitios de muestreo oscilaron entre 0,41 y 0,86 mS/cm, tal como se muestra en la Figura 20. En el cauce principal, dentro de la cuenca media, DS5 presentó la cifra más alta (0,86 mS/cm) acompañada de una elevada desviación estándar. El resto de los puntos exhibieron mediciones de CE relativamente homogéneas. En la cuenca superior (DS1), la CE fue de 0,50 mS/cm, mientras que, en la cuenca media, DS6 alcanzó 0,51 mS/cm. En la cuenca baja, se registraron 0,51 mS/cm en DS7D y 0,58 mS/cm en DS8.

Por otro lado, los afluentes mostraron los niveles más bajos, con 0,41 mS/cm en QLB, 0,42 mS/cm en DS7E y un valor ligeramente mayor en DS4 (0,55 mS/cm). Estos resultados reflejan una tendencia general a mayor conductividad en el cauce principal, especialmente en el sector medio.

En el sitio control (SC), representado con barra verde, también se detectaron niveles reducidos de CE (0,43 mS/cm).

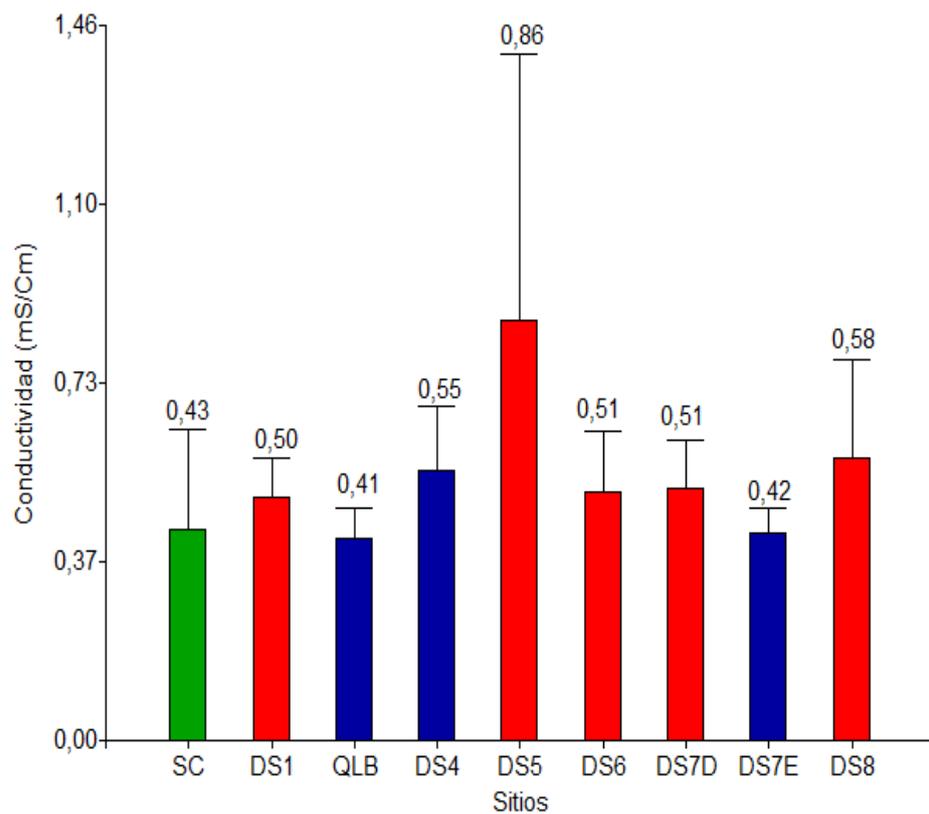


Figura 20. Valores de conductividad en los sedimentos de corriente expresados en mS/cm, representados mediante un gráfico de barras con barras de error. Barra de color verde corresponde al sitio control. Barras de color rojo a puntos ubicados sobre el cauce principal de la cuenca Vis Vis-Amanao y barras de color azul a sitios situados en afluentes.

5.1.3. CONTENIDO DE SILICATOS

La composición de los sedimentos muestra un predominio de material silicatado en la mayoría de los sitios analizados, con porcentajes que varían entre 23,9% y 79,2%, como se observa en la Figura 21. En el cauce principal de la cuenca Vis Vis-Amanao (barras rojas), se observó una disminución progresiva en el contenido de silicatos aguas abajo. En la parte alta de la cuenca (DS1) se registró un 79,2%, mientras que en el sector medio (DS5 y DS6) los valores fueron 72,5% y 71,8%, respectivamente. En la cuenca baja, los porcentajes fueron de 68,4% en DS7D y 61,4% en DS8. Por otro lado, los afluentes (barras azules) reflejaron una mayor variabilidad. DS4 (67,0%) y DS7E (72,6%) exhibieron porcentajes altos de silicatos. Mientras que QLB presentó el valor más bajo de todos los puntos analizados (23,9%), lo que indica una menor contribución de material silicatado en este afluente lateral. En el sitio control (SC), representado con barra verde, se determinó un contenido elevado de silicatos (76,5%).

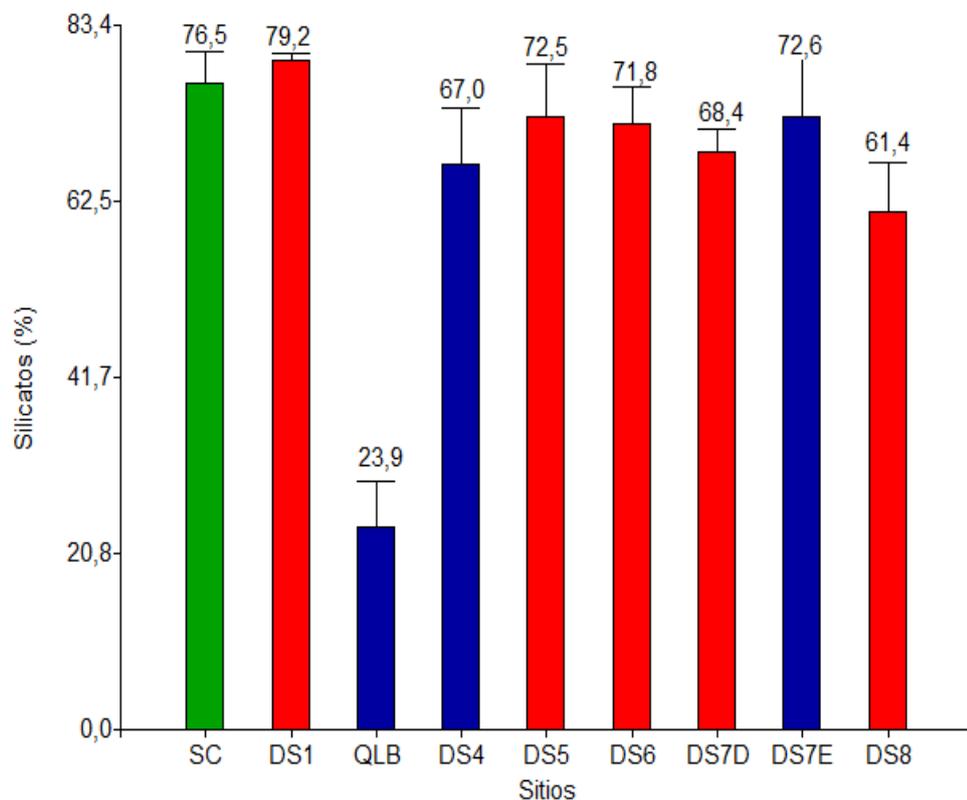


Figura 21. Valores de silicatos analizados en los sedimentos de corriente de los sitios de muestreo, representados mediante un gráfico de barras con barras de error. Barra de color verde corresponde al sitio control. Barras de color rojo a puntos ubicados sobre el cauce central de la cuenca Vis Vis-Amanao y barras de color azul a sitios situados sobre afluentes.

5.1.4. CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA

El contenido de materia orgánica (MO) en los sedimentos varió entre 3,4% y 6,1% (Figura 22). En el cauce principal de la cuenca Vis Vis-Amanao (barras rojas), los resultados fueron moderados y relativamente homogéneos a lo largo del gradiente altitudinal. En la cuenca alta (DS1) se observó el valor más bajo (3,4%), mientras que en la cuenca media (DS5 y DS6) y en cuenca baja (DS7D y DS8) los contenidos registraron un leve aumento de MO oscilando entre 3,8% y 4,3%. En los afluentes (barras azules), se registraron los porcentajes más elevados, especialmente en QLB (6,1%). En el sitio control (SC), representado con barra verde, registró 5,8%.

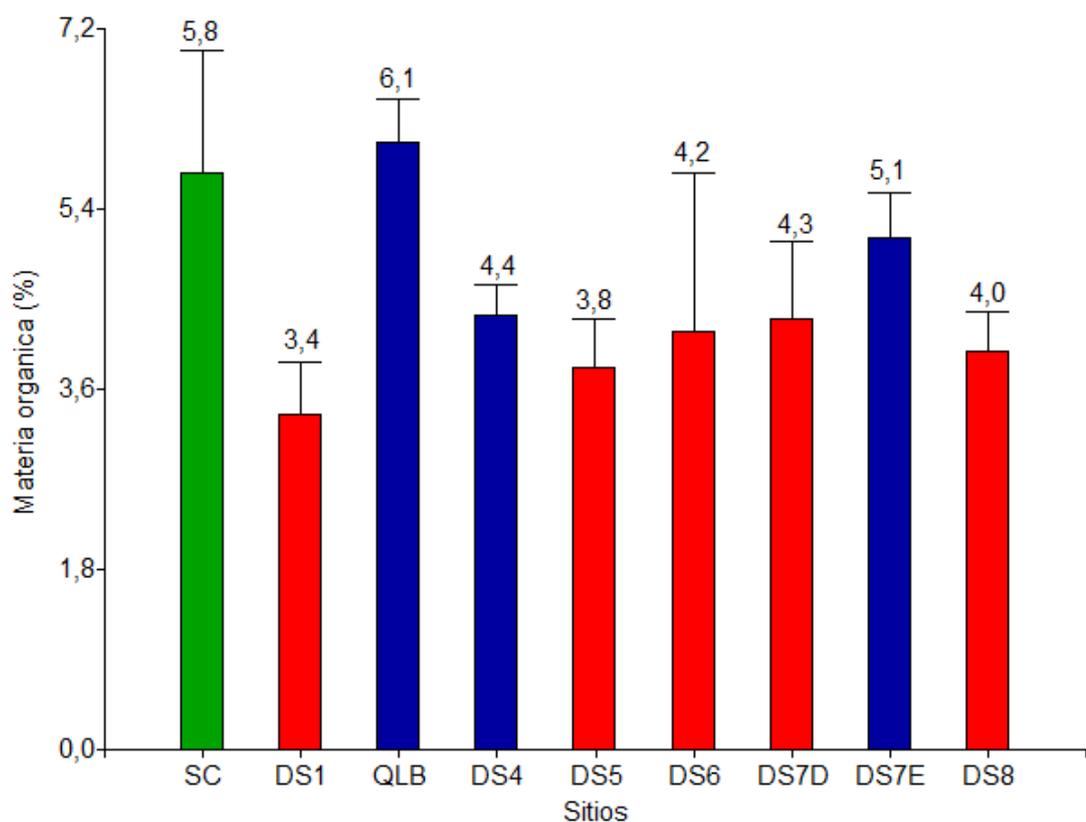


Figura 22. Valores de materia orgánica analizados en los sedimentos de corriente de los sitios de muestreo, representados mediante un gráfico de barras con barras de error. Barra de color verde corresponde al sitio control. Barras de color rojo a puntos ubicados sobre el cauce central de la cuenca Vis Vis-Amanao y barras de color azul a sitios situados sobre afluentes.

5.1.5. CONTENIDO DE CARBONATOS

Los carbonatos mostraron un comportamiento opuesto a los silicatos, con valores que oscilan entre 4,7% y 73,1% (Figura 23). En los sitios del cauce principal se observó un incremento progresivo aguas abajo. Los contenidos más bajos de carbonatos se evidenciaron en la parte alta y media de la cuenca (DS1: 5,7%; DS5: 12,7%; DS6: 15,0%), y los más elevados en la cuenca baja (DS7D: 19,6%; DS8: 27,4%). Por el contrario, en los afluentes (barras azules), hubo una mayor heterogeneidad. El afluente QLB se destacó por tener el contenido más elevado (73,1%), contrastando fuertemente con los valores observados en el cauce principal. Mientras que, los tributarios DS4 (15,4%) y DS7E (9,9%) mostraron valores más bajos. En el sitio control (SC), representado con barra verde, se registró un porcentaje de 4,7%.

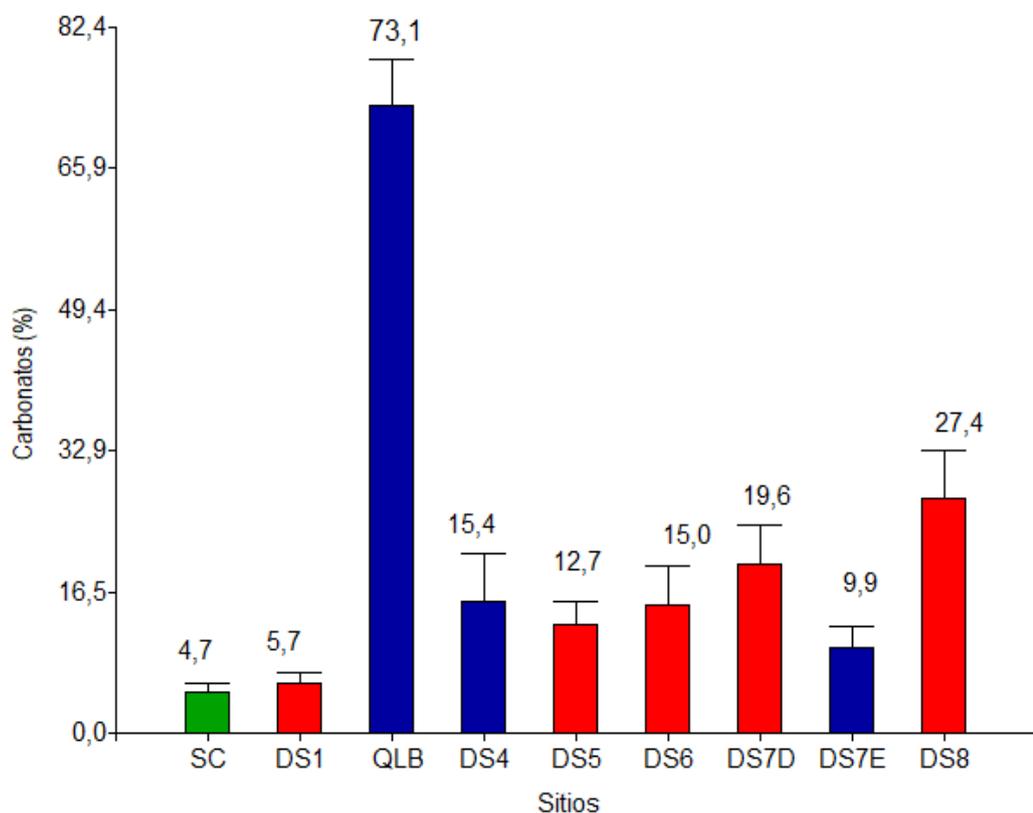


Figura 23. Porcentajes de carbonatos determinados en los sedimentos de corriente de los diferentes sitios de monitoreo, representados mediante un gráfico de barras con barras de error. Barra de color verde corresponde al sitio control. Barras de color rojo a puntos ubicados sobre el cauce central de la cuenca Vis Vis-Amanao y barras de color azul a sitios situados sobre afluentes.

5.1.6. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)

Los resultados de capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los sedimentos mostraron una distribución heterogénea entre los sitios de muestreo, con rangos entre 3,28 y 7,61 (Figura 24). En el cauce principal de la cuenca Vis Vis-Amanao, las mediciones de CIC presentaron una leve variación. En la cuenca alta (DS1), se registró 4,61; en el sector medio (DS5 y DS6), 4,85 y 4,98 respectivamente. En la cuenca baja (DS8), se observó un ligero incremento hasta 5,68.

Las concentraciones más elevadas se detectaron en los tributarios DS7E (7,35) y DS4 (6,21), mientras que QLB presentó la cifra más baja (3,28). En el sitio control se obtuvo el registro máximo (7,61).

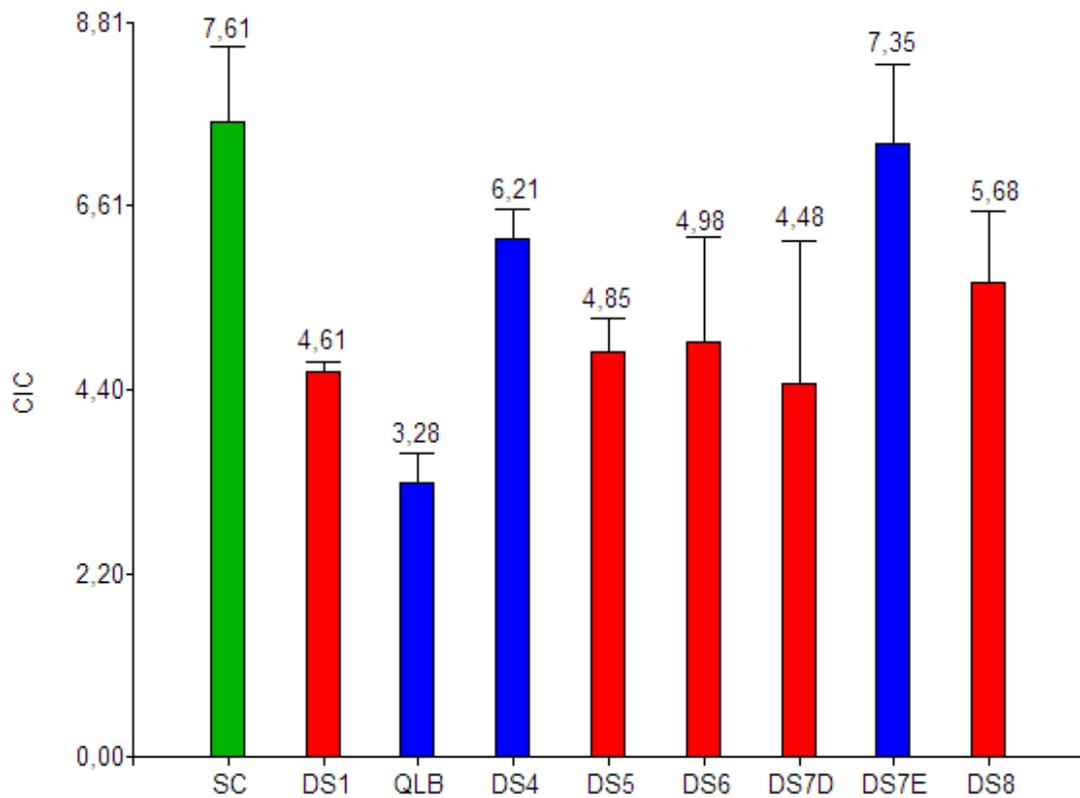


Figura 24. Valores de capacidad de intercambio catiónico en meq/100 g, analizados en los sedimentos de corriente de los sitios de muestreo, representados mediante un gráfico de barras con barras de error. Barra de color verde corresponde al sitio control. Barras de color rojo a puntos ubicados sobre el cauce central de la cuenca Vis Vis-Amanao y barras de color azul a sitios situados sobre afluentes.

5.1.7. CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALOGÍA

La mineralogía de los sedimentos de corriente reportados en la Tabla 3 corresponde a las fases cristalinas identificadas por DRX (Ver anexo Figuras 26 y 27). Los silicatos como el cuarzo, las micas (moscovita y flogopita), las plagioclasas, el feldespato y el clinocloro, son los principales minerales primarios determinados a lo largo de la cuenca del Río Vis Vis-Amanao. El cuarzo es el mineral más abundante (> 24% del contenido mineral total), seguido de micas tales como moscovita y flogopita (8-39%) y las plagioclasas (9-22%). El feldespato y el clinocloro son escasos y solo se cuantifican en la cuenca media y en el afluente DS7E. Mientras que, como accesorio se describe la bornita con un 13% en el sector alto del cauce (DS1). El contenido de cuarzo es más alto en la cuenca media y disminuye progresivamente hacia aguas abajo.

En el sitio de control (SC) solo se describieron minerales primarios tales como cuarzo (29%), moscovita (31%) y plagioclasas (22%).

Los minerales secundarios identificados son diversos e incluyen calcita, talco, zeolita y una amplia gama de minerales arcillosos, tales como caolinita, illita, montmorillonita y vermiculita. En los sectores iniciales de la cuenca, la mineralogía está dominada por vermiculita, la cual desaparece hacia el sur, dando lugar a la aparición de nuevos minerales como talco e illita en la zona media de la cuenca. En la parte baja, en cambio, predominan calcita y zeolita.

Por otro lado, el afluente ubicado en la Quebrada de las Burras presenta una proporción significativa de calcita, que representa el 63 % del contenido mineral total, y una baja concentración de zeolita (2 %). En contraste, los afluentes DS4 y DS7E muestran una disminución relativa en el contenido de calcita, con valores de 15 % y 5 % respectivamente, aunque se observa un aumento en la presencia de caolinita (5% en DS4), clinocloro (7% en DS7E) y montmorillonita (1 al 4% respectivamente). Finalmente, en la muestra SC, ubicada en la cuesta La Chilca, se identificó como único mineral secundario la clorita, con una proporción del 9 %.

Tabla 3. Composición mineralógica de los sedimentos de corriente.

Minerales	Cuenca Vis Vis-Amanao								Sitio Control
	C. Superior	C. Media		C. Baja		Afluentes			
Fases (%)	DS1	DS5	DS6	DS7D	DS8	QLB	DS4	DS7E	SC
Albita (NaAlSi ₃ O ₁₀)	-	20	21	28	-	9	19	16	22
Anortita (CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	47	-	19	-	20	-	-	19	-
Bornita (Cu ₅ FeS ₄)	13	-	-	-	-	-	-	-	-
Calcita (CaCO ₃)	-	-	-	20	13	63	15	5	-
Caolinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	-	-	-	-	-	-	5	-	-
Clinocloro (Mg ₅ Al(AlSi ₃ O ₁₀ (OH)))	-	1	-	-	-	-	-	7	-
Clorita ((Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆)	-	-	-	-	-	-	-	-	9
Cuarzo (SiO ₂)	16	33	31	30	24	25	40	24	29
Flogopita KMg ₃ (AlSi ₃ O ₁₀ (F,OH) ₂)	-	-	-	-	-	-	20	-	-
Illita (KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂))	-	29	23	-	-	-	-	-	-
Montmorillonita (K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ (H ₂ O)]	-	-	-	-	-	1	1	4	-
Moscovita (KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂))	21	9	-	22	39	-	-	14	31
Ortoclasa (KAlSi ₃ O ₁₀)	-	-	6	-	-	-	-	11	9
Talco (Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂)	-	3	-	-	-	-	-	-	-
Vermiculita ((Mg,Fe ₂ ,Al) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ 4H ₂ O)	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Zeolita (K ₆ Na ₅ (Al ₉ Si ₂₇ O ₇₂) ₂₁ H ₂ O)	-	5	-	-	4	2	-	-	-

5.1.8. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE CORRIENTE

La composición química de los sedimentos de corriente del Río Vis Vis-Amanao se informan en la Tabla 4. Los contenidos elementales son variables a lo largo de la cuenca, estas diferencias están relacionadas con las mineralizaciones de la zona de estudio y la composición de los materiales que conforman el río.

Tabla 4. Composición química de los sedimentos de corriente, los metales identificados se expresan en $\mu\text{g/g}$ (microgramos por gramo, ppm).

Cuenca	Sitio	Cu	Fe	Mn	Cd	Zn	Pb	As	
Vis Vis - Amanao	C. Superior	DS1	194,2	48.153,3	1.656,6	<20	372	106,73	17,61
	C. Media	DS5	132,53	43.093,3	1.146,1	<20	181,83	<20	18,11
		DS6	127,07	32.043,3	1.305,8	<20	144,3	<20	11,34
	C. Baja	DS7D	146,6	40.850	1.145,1	<20	104,4	<20	14,22
		DS8	113,13	40.666,7	1.188,5	<20	110,5	<20	12,56
	Afluentes	QLB	104,67	33.086,6	371,7	<20	219,93	<20	7,28
		DS4	85,67	35.373,3	1.128	<20	182,77	<20	14,07
DS7E		70,47	31.400	1.251	<20	330,57	<20	13,81	
Sitio Control	SC	67,73	12.763,3	968,1	<20	26,19	<20	5,74	

Las concentraciones de cobre (Cu) e hierro (Fe) tienden a disminuir aguas abajo. Los valores más altos, 194,2 ppm para Cu y 48.153,3 ppm para Fe, se registran en la parte alta de la cuenca. En la zona baja, estas concentraciones descienden a 113,13 ppm y 40.666,7 ppm, respectivamente. Sin embargo, se observa un comportamiento inusual antes del tramo final del cauce, justo antes del último punto de muestreo (DS7D), donde ambas concentraciones aumentan a 146,6 ppm para Cu y 40.850 ppm para Fe. Este incremento podría estar relacionado con variaciones en la mineralización en el sector. En comparación con los afluentes QLB, DS4 y DS7E, las concentraciones son relativamente bajas y varían entre 104,7, 85,7 y 70,5 ppm para Cu, respectivamente y 33.086,6, 35.373,3 y 31.400 ppm para Fe. El valor más bajo se observa en el sitio de control (SC), con 67,7 ppm para Cu y 12.763,3 ppm para Fe. La distribución espacial de los datos indica que los aportes de los afluentes no representan una fuente significativa de enriquecimiento metálico en el cauce principal, lo que refuerza la hipótesis de que las variaciones observadas en las concentraciones de Cu y Fe están principalmente asociadas a procesos geológicos locales en el tramo medio y alto de la cuenca.

Un comportamiento similar se da con el arsénico (As) a lo largo del río principal. Los valores más elevados se describen en la zona alta de la cuenca (DS1) y en el primer sitio de muestreo de la zona media, con contenidos de 17,6 ppm y 18,1 ppm respectivamente. Luego las concentraciones disminuyen progresivamente a 11,34 ppm en DS6, para incrementar nuevamente en DS7D a 14,22 y terminar en el sector bajo del cauce principal con 12,56 ppm. Con respecto a los tributarios los valores en QLB son bajos de 7,28 ppm e incrementan en DS4 y DS7E a 14,1 y 13,8 ppm respectivamente. El valor más bajo detectado corresponde a 5,7 ppm en el sitio SC.

En cuanto al manganeso (Mn), las concentraciones más elevadas se registran en la parte alta del río principal (DS1), con un valor de 1656,6 ppm. A partir de este punto, los niveles se mantienen relativamente constantes aguas abajo, con 1.146,1 ppm en DS5, 1.305,8 ppm en DS6, 1.145,1 ppm en DS7D y 1.188,5 ppm en DS8. En los aportes al cauce, el contenido más bajo se da en QLB, con 371,7 ppm, mientras que en DS4 y DS7E las concentraciones son

similares, con valores de 1.128 y 1.251 ppm, respectivamente. Por otro lado, en el sitio de control el valor registrado es de 968,1 ppm.

En cuanto al comportamiento del zinc (Zn), se observa una disminución progresiva de su concentración a lo largo del río Vis Vis-Amanao. El valor más alto, de 372 ppm, se registra en la parte alta del cauce. A partir de allí, los niveles decrecen de forma continua. En la zona media, las concentraciones alcanzan 181,83 ppm en DS5 y 144,30 ppm en DS6, mientras que en la parte baja descienden a 104,40 ppm en DS7D y 110,50 ppm en DS8. No obstante, algunos afluentes presentan concentraciones elevadas de Zn, como QLB con 219,9 ppm y DS7E con 330,6 ppm. En DS4 también se registra un valor considerable de 182,8 ppm. Estos resultados sugieren que ciertos tributarios podrían estar aportando zinc al sistema, posiblemente por influencia de mineralización local. En comparación general con el sitio de control (SC), los contenidos de la cuenca Vis Vis-Amanao son significativamente más elevados, ya que en SC se registra un valor relativamente bajo de 26,2 ppm.

Finalmente, en el cadmio (Cd) y plomo (Pb) las concentraciones están por debajo del límite de detección (<20 ppm) en todos los sitios, excepto en el caso del Pb en la muestra DS1 ubicada en la parte alta del cauce principal (106,73 ppm).

5.1.9. ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN (IGEO)

El índice de geoacumulación (Igeo) se calculó para arsénico (As), cromo (Cr), cobre (Cu) y zinc (Zn) en la cuenca Vis Vis-Amanao (ver Tabla 5). En comparación con los otros elementos, el Cu mostró los valores más altos del Igeo con un promedio de 2,30. Los sitios ubicados sobre el cauce principal y los tributarios QLB y DS4 serían los más afectados, que según el Igeo calculado estarían moderadamente a fuertemente contaminados con Cu. El Igeo de Zn presentó valores elevados en la cuenca alta (DS1: 2,05) y en el afluente DS7E (2,88), lo que los ubica en la categoría de 'moderadamente a fuertemente contaminados'. Los resultados del Igeo para As mostraron una variabilidad moderada a lo largo de la cuenca. En la zona alta, el sitio DS1 presentó 0,48. En la parte media del río principal, los sitios DS5 y DS6 registraron un Igeo de 1,36 y 0,68, respectivamente, siendo DS5 el más elevado entre todos los sitios analizados. El tramo final de la cuenca refleja los Igeo más bajos, con 0,56 en DS7D y 0,11 en DS8. En cuanto a los afluentes, se detectaron valores negativos en QLB (-1,14) y DS7E (-0,09), mientras que DS4 presentó un incremento positivo de 0,55. Estos resultados sugieren que la mayoría de los sitios evaluados se encuentran en condiciones de no contaminación o contaminación moderada por As. Por su parte, el Cr presenta índices de geoacumulación bajos en todos los puntos analizados, lo que indica ausencia o niveles muy bajos de contaminación.

Tabla 5. Índice de geoacumulación de elementos (Igeo) en muestras de sedimentos de corriente de la cuenca Vis Vis-Amanao.

Índice de geoacumulación de elementos (Igeo)						
Cuenca		Sitio	As	Cr	Cu	Zn
Vis Vis - Amanao	C. Superior	DS1	0,48	0,06	2,76	2,05
	C. Media	DS5	1,36	0,23	2,74	1,01
		DS6	0,68	-0,06	2,68	0,68
	C. Baja	DS7D	0,56	-0,31	2,58	0,8
		DS8	0,11	0,31	2,17	0,88
	Afluentes	QLB	-1,14	-0,38	2,23	1,87
		DS4	0,55	-0,37	2,1	1,94
DS7E		-0,09	-0,59	1,1	2,88	
Promedio			0,32	-0,14	2,3	1,51

Clase	Valor	Clasificación
0	<0	No contaminado
1	0-1	No contaminado a moderadamente contaminado
2	1-2	Moderadamente contaminado
3	2-3	Moderadamente a fuertemente contaminado
4	3-4	Fuertemente contaminado
5	4-5	Fuertemente a extremadamente contaminado
6	>5	Extremadamente contaminado

5.1.10. **RIESGO ECOLÓGICO POTENCIAL DE ELEMENTOS PELIGROSOS (ER) E ÍNDICE DE RIESGO ECOLÓGICO (RI)**

Los cálculos del riesgo ecológico potencial, expresado mediante el valor Er para cada metal y el índice de riesgo ecológico total (RI) se indican en la Tabla 6. As, Cr, y Zn mostraron resultados de Er bajos en todos los sitios ($Er < 40$), indicando un riesgo bajo. Por otra parte, el Cu presentó valores que se mantuvieron dentro del rango de riesgo moderado en los sitios ubicados sobre el cauce principal de la cuenca y un riesgo bajo en los afluentes. El índice de riesgo ecológico global (RI), que considera la suma del impacto potencial de todos los metales analizados, fue bajo en todos los sitios de la cuenca ($RI < 150$).

Tabla 6. Riesgo ecológico potencial de elementos peligrosos (Er) e índice de riesgo ecológico (RI) en sedimentos de corriente de la cuenca Vis Vis-Amanao.

Riesgo ecológico potencial del elemento (Er)							Índice de riesgo ecológico (RI)
Cuenca	Sitio	As	Cr	Cu	Zn		
Vis Vis - Amanao	C. Superior	DS1	20,9 5	3,1 3	50,8 4	6,2	81,12
	C. Media	DS5	38,5 1	3,5 1	50,1 9	3,03	95,24
		DS6	24,0 4	2,8 8	48,1 4	2,41	77,47
	C. Baja	DS7 D	22,1 9	2,4 2	44,9 7	2,61	72,19
		DS8	16,1 5	3,7 1	33,6 6	2,76	56,29
	Afluentes	QLB	6,82	2,3 1	35,1 3	5,5	49,76
		DS4	22,0 3	2,3 2	32,2 2	5,76	62,33
		DS7 E	14,0 8	2	16,0 2	11,0 2	43,12

Er	Grado	RI	Grado
Er < 40	Bajo	RI < 150	Bajo
40 ≤ Er < 80	Moderado	150 ≤ RI < 300	Moderado
80 ≤ Er < 160	Alto	300 ≤ RI < 600	Alto
160 ≤ Er < 320	Muy alto	RI ≥ 600	Muy alto
Er ≥ 320	Extremadamente alto		

5.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL AGUA DEL RÍO VIS VIS-AMANA O

5.2.1. PARÁMETROS QUÍMICOS ANALIZADOS

La composición química de los metales disueltos (Fe, Cu, Zn, Pb, Mn, Cd, As) en las aguas se detallan en la Tabla 7 para los períodos húmedos y secos de los años 2001 y 2022.

Durante el período húmedo del año 2001, los valores de pH a lo largo de la cuenca se mantuvieron relativamente constantes. En el tramo alto del cauce se registró un valor de 8,26, el mismo promedio que se observó en el tramo medio. No se cuenta con datos disponibles para la parte baja del río en este periodo. La conductividad en el sector alto del río es de 2.330 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en la parte media el promedio es de 2.210 $\mu\text{S}/\text{cm}$. No se presentan datos de este parámetro en la parte baja. A pesar de ser época de lluvias, donde normalmente se esperarí a una baja en conductividad debido al efecto diluyente del aumento de caudal, los valores son elevados. Durante la serie temporal analizada, se observa una disminución en las

concentraciones de los metales disueltos Cu, Pb y As a lo largo del cauce principal, en dirección aguas abajo. En la cuenca alta (DS1), el cobre (Cu) presenta una concentración de 33 µg/L, que desciende a 11 µg/L en la zona media. El plomo (Pb) muestra una disminución de 90 µg/L en el sector alto a 40 µg/L en la zona media del cauce. De manera similar, el arsénico (As) reduce su concentración de 29 µg/L a 16 µg/L en los mismos tramos. En contraste, el manganeso (Mn) exhibe una tendencia opuesta: en la parte alta del cauce alcanza los 30 µg/L, mientras que en la zona media su concentración aumenta hasta un promedio de 50 µg/L. Para el hierro (Fe) y el zinc (Zn), no se observa una tendencia definida. El Fe varía desde 2.620 µg/L en la cabecera del río, aumentando en DS5 a 4.310 µg/L y luego disminuyendo a 1.830 µg/L en DS6. En cuanto al Zn, presenta una concentración elevada en DS1 (490 µg/L), disminuye a 300 µg/L en DS5 y vuelve a incrementarse en DS6 a 450 µg/L. Cabe señalar que no se dispone de datos correspondientes al sector bajo de la cuenca.

En cambio, durante el periodo seco de ese mismo año, en el pH se evidenció una ligera disminución en los niveles. En el tramo superior, el valor registrado fue de 7,8; en el tramo medio, de 8,0; mientras que en la parte baja se observó un leve aumento, alcanzando un pH de 8,3. El muestreo correspondiente a este período hidrológico evidenció una notable disminución en las concentraciones de metales disueltos. El Cu se encontró por debajo del límite de detección en la cuenca alta, mientras que en el sector medio (DS6) y bajo presenta concentraciones de 2 µg/L y 1 µg/L, respectivamente. El Fe mostró una concentración homogénea de 20 µg/L en los tres sectores del cauce principal. Por su parte, el Cd, Mn y Zn están por debajo del límite de detección. En cuanto al Pb, sus concentraciones se mantuvieron por debajo del límite de detección en los tramos alto y medio del río, registrándose un valor de 30 µg/L únicamente en el sector bajo (DS8). El As muestra una tendencia decreciente a lo largo del cauce principal, con concentraciones que disminuyen progresivamente desde 20 µg/L en DS1, a 17 µg/L en DS5, 15 µg/L en DS6 y alcanzan un valor mínimo de 8 µg/L en DS8.

Por otro lado, durante el período húmedo de 2022 se observó una ligera variación del pH a lo largo del río Vis Vis-Amanao. En la parte alta, el pH fue de 7,6, aumentando a un promedio de 8,4 en el sector medio del cauce y estabilizándose en 8,1 en la parte baja. En los tributarios DS4 y DS7E se registraron valores de pH de 8,8 y 8,3, respectivamente. En cuanto a la CE, se evidenció una disminución progresiva aguas abajo: desde 2.530 µS/cm en el sector superior, se mantuvo constante en DS5, descendió a 1.915 µS/cm en DS6 (zona media del cauce) y alcanzó un valor de 906 µS/cm en el tramo final. En la estación seca, no se registran los parámetros antes analizados.

Durante el año 2022, en ambos períodos hidrológicos, la mayoría de las concentraciones de metales se encontraron por debajo del límite de detección de la metodología empleada. En el período húmedo, todos los elementos analizados estuvieron por debajo del límite de cuantificación, con la excepción del arsénico (As), que mostró una tendencia decreciente en dirección aguas abajo: comenzó con 34 µg/L en la parte alta del cauce principal, descendió a un promedio de 17 µg/L en el sector medio y alcanzó 13 µg/L en la zona baja del río. En el período seco, solo se cuantificó el hierro (Fe), con un valor de 39 µg/L en la parte baja de la cuenca, y el manganeso (Mn), que alcanzó 4 µg/L en el tributario DS7E.

Tabla 7. Parámetros químicos del agua en los años 2001 y 2022 en periodos húmedos y secos.

Sitio	Cu	Fe	Mn	Cd	Zn	Pb	As	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Periodo de muestreo
	(μg/L)									
DS1	33	2620	30	<1	490	90	29	8,26	2330	Húmedo 7/2/2001
DS5	13	4310	40	<1	300	90	22	8,32	2370	
DS6	11	1830	60	<1	450	40	16	8,2	2050	
QLB	9	170	20	<1	80	70	7	8,16	1962	
DS1	<1	20	<10	<1	<10	<10	20	7,8	2280	Seco 5/8/2001
DS5	<1	20	<10	<1	<10	<10	17	8	2270	
DS6	2	20	<10	<1	<10	<10	15	7,9	2020	
DS8	1	20	<10	<1	<10	30	8	8,3	1666	
QLB	<1	20	<10	<1	<10	10	3	7,8	1965	
DS1	<50	<100	<30	<0,5	<50	<10	34	7,6	2530	Húmedo 20/2/2022
DS4	<50	<100	<30	<0,5	<50	<10	<10	8,78	2650	
DS5	<50	<100	<30	<0,5	<50	<10	15	8	2530	
DS6	<50	<100	<30	<0,5	<50	<10	19	8,1	1915	
DS7D	<50	<100	<30	<0,5	<50	<10	13	8,1	1956	
DS7E	<50	<100	<30	<0,5	<50	<10	13	8,3	906	
DS8	<50	<100	<30	<0,5	<50	<10	13	7,9	1230	
DS1	<9	<12	16	<3	<6	<84	<105	-	-	Seco 25/11/2022
DS4	<9	<12	<3	<3	<6	<84	<105	-	-	
DS5	<9	<12	<3	<3	<6	<84	<105	-	-	
DS6	<9	<12	<3	<3	<6	<84	<105	-	-	
DS7D	<9	39	<3	<3	<6	<84	<105	-	-	
DS7E	<9	<12	4	<3	<6	<84	<105	-	-	
DS8	<9	<12	<3	<3	<6	<84	<105	-	-	

5.2.2. CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA

La clasificación hidroquímica es una herramienta fundamental en hidrogeoquímica que permite identificar y caracterizar los tipos de aguas según su composición química predominante. Esta clasificación ayuda a interpretar el origen, la evolución geoquímica, y los posibles procesos de contaminación que afectan al agua subterránea o superficial.

El análisis integral de la información preexistente (correspondiente a los muestreos de aguas realizados en 2001 y 2022 por el Ministerio de Minería de la provincia de Catamarca) determinaron que las aguas pasaron el control de balance iónico (con un valor promedio de 2,22) (Ver anexo, Tablas 16 y 17).

En la zona de estudio se identificaron tres grupos principales de aguas: sulfatadas sódicas, presentes a lo largo del cauce principal y en el afluente DS7E; sulfatadas cálcicas, en el tributario QLB; y sulfatadas magnésicas, en DS4 (Figura 25).

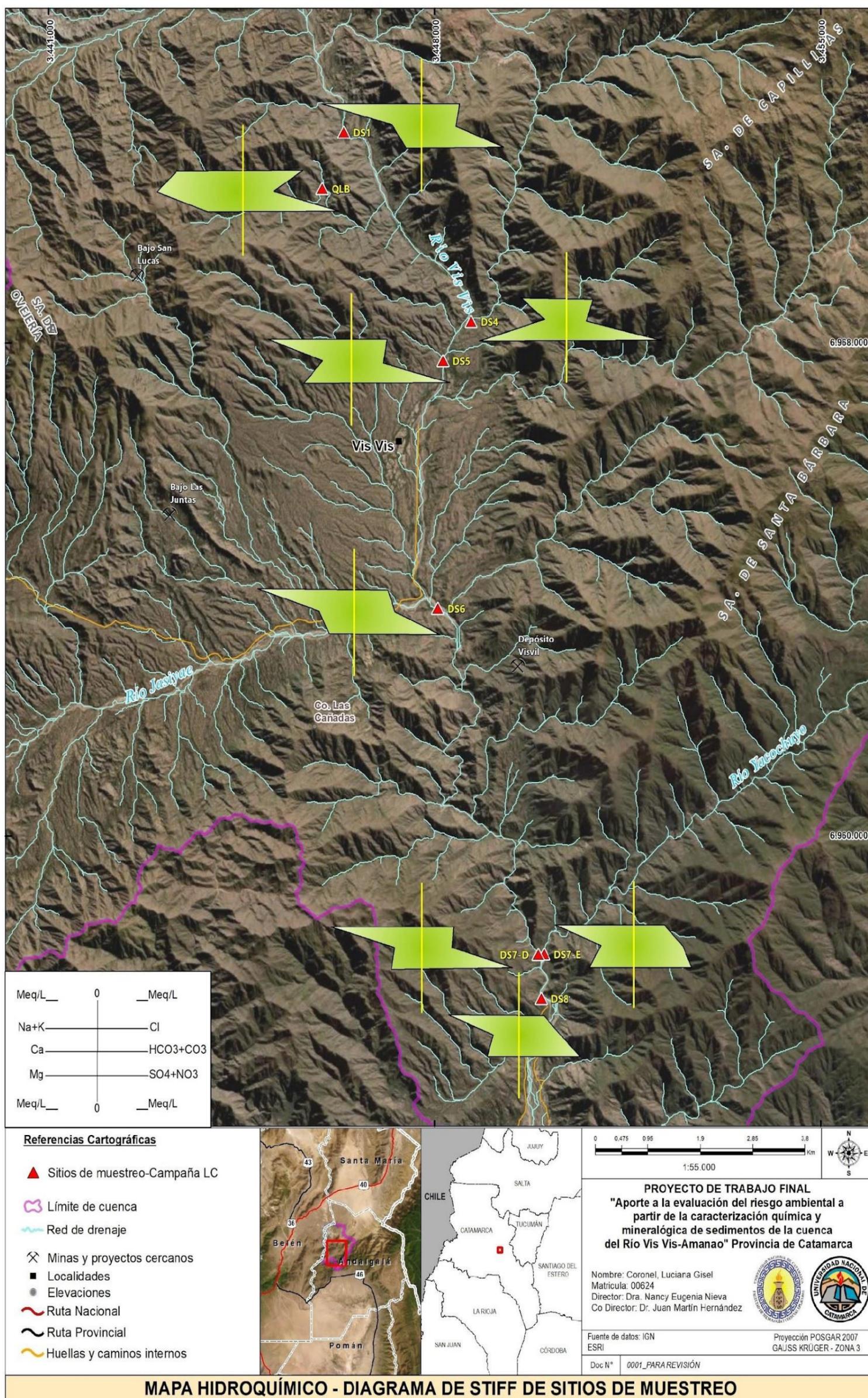


Figura 25. Mapa hidroquímico de la cuenca Vis Vis-Amanao.



CAPÍTULO VI.

DISCUSIÓN

6. DISCUSIÓN

La siguiente discusión integra los resultados mineralógicos, geoquímicos y fisicoquímicos de los sedimentos de corriente del río Vis Vis–Amanao y los datos hidroquímicos del agua con el fin de abordar los objetivos planteados en este estudio: identificar las posibles fases portadoras de metales, evaluar el riesgo ecológico potencial y analizar los procesos de interacción sedimento-agua. Se analizan las variaciones espaciales en las concentraciones de elementos traza (Cu, Zn, As, Mn), en función de la geología aflorante, los aportes naturales y la posible influencia de actividades mineras. Asimismo, se interpretan los parámetros químicos (pH, conductividad, MO, CIC) y la mineralogía para comprender los mecanismos de retención o liberación de elementos. Finalmente, se discute el riesgo ecológico en base a los índices propuestos por Hakanson (1980) y se contextualizan los resultados en relación con antecedentes regionales.

6.1. MINERALOGÍA, GEOQUÍMICA Y POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN SEDIMENTOS DE LA CUENCA ALTA

Los minerales primarios identificados tales como cuarzo, plagioclasas, feldespatos, clinocloro y micas a lo largo de la cuenca del río Vis Vis-Amanao, son coherentes con la geología aflorante del área de estudio. La misma, se caracteriza por la presencia de rocas metamórficas de bajo grado pertenecientes principalmente a la Formación Suncho, en la parte alta de la cuenca, y del Granito de Capillitas en los sectores medio e inferior del cauce principal.

Por otro lado, los minerales secundarios descritos por DRX (calcita, talco, zeolita y una variedad de arcillas) reflejan una marcada influencia de procesos de alteración hidrotermal y meteorización supergénica sobre la geología local.

En la cuenca alta del río se registran las concentraciones más elevadas de cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), arsénico (As) y manganeso (Mn). Estas anomalías podrían estar relacionadas con la proximidad de los depósitos tipo pórfido de La Alumbra y Cerro Atajo, así como a la fuente termal Baños de Vis Vis. Mediante análisis de DRX, se identificó la presencia de bornita (Cu_5FeS_4), un mineral que ha sido descrito como parte de la mineralogía característica del yacimiento La Alumbra. Allí, la bornita se encuentra principalmente asociada con calcopirita, pirita y, en menor proporción, calcosina, en una zona de enriquecimiento secundario desarrollada en la parte superior del depósito (Sasso y Clark, 1998; Minera Alumbra, 2016). De manera similar, en Cerro Atajo, la bornita ha sido reportada en zonas de alteración hidrotermal, lo que sugiere la existencia de un sistema mineralizado de importancia (Enns y Findlay, 2005). En cuanto al Zn y al Pb, su existencia podría estar vinculada con la geología del yacimiento La Alumbra y en la Veta Carmen (Cerro Atajo), principalmente en forma de esfalerita (ZnS) y galena (PbS) (Proffett, 2003 y Peralta, 1999). Aunque estos minerales no fueron identificados en la mineralogía de los sedimentos analizados, han sido reportados en La Alumbra en zonas de falla, donde aparecen en venillas y vetas tardías compuestas por carbonatos y cuarzo (Harris et al., 2005). Estas estructuras indican una mineralización asociada a eventos tectónicos y a la circulación de fluidos hidrotermales posteriores a la etapa principal de formación del depósito (Proffett, 2003). Además, la galena se encuentra típicamente asociada a la alteración argílica o sericítica (Sasso y Clark, 1998). Por su parte, el Mn también es un componente común en este tipo de depósitos, vinculado a zonas de

alteración filica y argílica (Guilbert, 1995). Además, en la veta Carmen, ubicada en Cerro Atajo, se ha descrito la manifestación de minerales de Mn como rodocrosita ($MnCO_3$) y manganocalcita ($(Ca,Mn)CO_3$), asociados a la mineralización principal (Peralta, 1999). La detección de As en los sedimentos podría atribuirse a dos posibles fuentes. En primer lugar, estaría relacionada con el sistema termal de los Baños de Vis Vis, el cual ha sido estudiado por Vázquez et al. (2006). Estos autores señalan que, desde los nacimientos, el río Vis Vis presenta una composición química muy similar a la de las aguas termales, donde las concentraciones de As oscilan entre 31 y 64 $\mu g/L$. En segundo lugar, una fuente adicional de arsénico podría estar vinculada a la presencia de minerales accesorios como enargita (Cu_3AsS_3) y arsenopirita ($FeAsS$), identificados en vetas del Cerro Atajo, incluyendo las vetas María Eugenia y Carmen (Márquez-Zavalía y Galliski, 2007). La alteración o disolución de estos minerales en el entorno geológico local podría contribuir significativamente al contenido de As observado en los sedimentos.

Entre los minerales secundarios identificados en esta zona se describe la vermiculita, siendo un producto típico de la alteración de micas, resultado de la pérdida progresiva de potasio en la moscovita, lo que indica un ambiente de intensa meteorización química (Hernando Massanet, et al., 2001; Norrish, 1972).

El Índice de Geoacumulación (Igeo) permite evaluar el grado de contaminación de los sedimentos mediante la comparación entre las concentraciones actuales de los elementos y sus valores naturales de fondo. En el presente estudio, sin embargo, el Igeo se calculó a partir de la comparación entre las concentraciones actuales y los valores obtenidos en un muestreo realizado en los años 1970 (Ferpozzi et al., 2002a, b). Es importante señalar que los valores de Igeo podrían estar sobreestimados debido a posibles diferencias metodológicas entre ambos muestreos, tales como el tamaño de partícula de las muestras y las técnicas analíticas utilizadas para la determinación de los elementos.

En el sector superior del cauce principal, el Igeo evidencia un nivel de contaminación moderado a fuerte por Cu y Zn, moderado por As, y bajo o no significativo por Cr. Estos resultados sugieren que el incremento en las concentraciones de Cu y Zn podría estar asociado tanto a la influencia de actividades mineras como a los procesos naturales de meteorización en la cuenca.

6.2. MINERALOGÍA, GEOQUÍMICA Y POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN SEDIMENTOS DEL SECTOR CENTRAL DE LA CUENCA

En la parte media de la cuenca, las concentraciones de As, Cu, Zn, Mn y Fe disminuyen progresivamente en los sedimentos del cauce principal. Este comportamiento podría explicarse, por un proceso de dilución, debido al aporte de sedimentos provenientes de áreas no mineralizadas o con baja concentración de estos elementos, lo que reduce la proporción relativa de fases minerales portadoras de metales en la carga total del material arrastrado por el río (Salminen et al., 2005). Sin embargo, en DS5 el As muestra niveles similares a la cuenca alta. Este incremento podría estar asociado a distintos procesos geoquímicos y fuentes naturales. Entre ellos, se destacan los aportes antes mencionados como el de aguas hidrotermales ricas en As, la liberación de minerales arsenicales como enargita y arsenopirita

presentes en zonas mineralizadas. Otro factor sería la desorción de óxidos de hierro y manganeso bajo condiciones alcalinas (Smedley y Kinniburgh, 2002). Asimismo, el As puede ser retenido en fases coloidales como illita o asociándose a materia orgánica retenida en los sedimentos (Bose y Sharma, 2021). Los minerales secundarios identificados en este sector del río incluyen talco, clinocloro e illita. El talco probablemente se origina por la transformación de minerales ferromagnesianos (por ejemplo, micas), como resultado de la intensa deformación asociada a la falla sobre la que se asienta la quebrada del río Vis Vis-Amanao (Friedman, 1965). El clinocloro, aunque poco abundante en la muestra, se asocia probablemente al metamorfismo regional dominante en el área de estudio, formándose como producto de la transformación de arcillas y micas (Brodtkorb, 2015). Por último, la illita presente se forma por alteración química de rocas ígneas y metamórficas, como granitos y filitas, las cuales constituyen una fuente natural de feldespato potásico y micas (moscovita y biotita) (Brodtkorb, 2015). Su formación se ve favorecida por las condiciones ligeramente alcalinas características de este ambiente fluvial.

Al igual que en el sector superior, el Igeo indica una moderada a fuerte contaminación por Cu, lo que reafirma la influencia de la dinámica de meteorización natural de la cuenca. Sin embargo, a diferencia de lo observado en dicho sector, los valores de Igeo en este caso reflejan una contaminación moderada por As y Zn y sin contaminación por Cr. Cabe señalar que los Igeo más bajos en este sector podrían estar relacionados a procesos de dilución que afectan las concentraciones de los elementos.

6.3. MINERALOGÍA, GEOQUÍMICA Y POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN SEDIMENTOS DEL SECTOR INFERIOR DE LA CUENCA

En el sector inferior del río Vis Vis-Amanao, los contenidos elementales se mantienen relativamente constantes, aunque se observa un leve aumento en las concentraciones de Fe, Cu y As en comparación con la muestra DS6, ubicada en la cuenca media. El incremento de Fe podría estar relacionado con la mineralización asociada a las minas de hierro de Visvil, donde se han identificado vetas de hematita con cuarzo, pero sin presencia de magnetita ni sulfuros (Angelelli, 1984; Lannefors, 1929). La existencia de As y Cu en los sedimentos fluviales se atribuye principalmente a los aportes desde la cuenca alta y media. Sin embargo, la concentración de As en el sector inferior podría estar relacionada con la incorporación de este elemento en el mineral de calcita, una de las fases más abundantes identificadas en la muestra. La manifestación de calcita podría provenir tanto por la roca de caja que rodea las vetas de hierro del yacimiento Visvil (Lannefors, 1929), como por los aportes de los afluentes QLB y DS4. Considerando que las aguas presentan condiciones alcalinas y que se ha detectado una posible saturación de calcita, es razonable suponer que podría estar ocurriendo un proceso de coprecipitación de As con este mineral carbonatado. Este proceso de coprecipitación puede ir acompañado de mecanismos de adsorción superficial, como lo sugieren estudios previos realizados en ambientes similares (Romero et al., 2004; Bravo-Covarrubias et al., 2017; 2020). Ambos mecanismos contribuirían a la inmovilización del As en las fases sólidas del sistema, reduciendo así su movilidad y potencial biodisponibilidad. La concentración de Cu observada en estos sedimentos se atribuye, probablemente, a procesos

de retención asociados a la materia orgánica, cuyo contenido en la muestra resulta particularmente elevado. La materia orgánica juega un papel clave en la inmovilización de metales pesados como el Cu, actuando como un agente adsorbente altamente eficiente debido a la presencia de grupos funcionales reactivos. Estudios sobre isoterms de adsorción en soluciones diluidas han demostrado que los principales responsables de la adsorción de Cu son la materia orgánica y los óxidos de Fe y Mn. Además, gran parte del Cu adsorbido se mantiene en formas intercambiables o extraíbles (Mc Laren et al., 1983). Desde un punto de vista geoquímico, el Cu puede encontrarse en los sedimentos principalmente en forma de cationes Cu^{2+} y Cu^+ , siendo la forma cúprica (Cu^{2+}) la más fuertemente adsorbida por minerales arcillosos, mientras que la forma cuprosa (Cu^+) suele permanecer en posiciones de intercambio más débiles. Sin embargo, la capacidad de retención de la materia orgánica supera ampliamente a la de las arcillas (Barros y Blasco, 1971), lo que explicaría por qué, a pesar de los menores aportes absolutos de Cu en la cuenca baja, este permanece fijo en los sedimentos con alto contenido de MO, funcionando como un sumidero natural. En consecuencia, la mayor proporción de materia orgánica en los sedimentos de la cuenca baja podría estar compensando la menor carga de Cu total, al favorecer su adsorción y limitar su movilidad. Desde una perspectiva ambiental, el contenido de MO en los sedimentos constituye un indicador importante de la calidad del ambiente fluvial, ya que incide en la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de adsorción de contaminantes y la dinámica biogeoquímica del sistema (Campbell y Tessier, 1989; Lee et al., 1997; Gonsior et al., 1997).

La mineralogía secundaria de la zona es caolinita, montmorillonita y zeolita. La presencia de estos dos primeros sugiere procesos de meteorización hidroquímica activos, especialmente en feldspatos y micas. Estas fases secundarias son típicas de ambientes con circulación de agua superficial o subsuperficial, que promueven la degradación mineral y la formación de fases arcillosas como parte de la evolución supergénica del sistema (Méndez, 2003). Mientras que, la zeolita podría estar asociada con el metamorfismo local, formado en condiciones de baja temperatura y presión.

El Igeo clasifica este sector del cauce como moderadamente a fuertemente contaminado con Cu, no contaminado o moderadamente contaminado con As y Zn, y no contaminado con Cr. Al igual que en la cuenca media, se observa aquí una disminución de los índices en comparación con los sectores superiores, lo que refuerza la evidencia del efecto de los procesos de dilución sobre el cauce principal.

6.4. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN SEDIMENTOS DE LA CUENCA

Los valores de pH obtenidos revelan una tendencia general hacia condiciones levemente alcalinas en los sedimentos analizados, lo cual es coherente debido a que la interacción con rocas que contienen minerales calcáreos suele inducir un aumento del pH (Peralta Moreno, 2019; Marín Galván, 2010; Hernández, et al., 2003). A su vez sobre el cauce principal, presentan una marcada uniformidad entre sitios. Estos resultados reflejan un sistema relativamente estable desde el punto de vista geoquímico y se pueden explicar debido a los porcentajes de carbonatos y la presencia de minerales como calcita, feldspatos alcalinos o

filosilicatos determinados en los sedimentos. Esto sugiere un sistema acuático con alta capacidad de neutralizar ácidos y regular el pH. Por otro lado, los bajos valores de carbonatos en la cuenca superior (DS1) y la tendencia al aumento desde la zona alta hacia la parte baja podría estar indicando una meteorización química provocada por la presencia de sulfuros, tales como bornita, que fué identificada en este sector. La interacción agua-roca puede favorecer la disolución de carbonatos y la movilización de otros iones (como Ca^{2+}), reduciendo así su presencia en forma sólida en los sedimentos (Rivera Uria, et al., 2020; Imperial Pérez, 2010). Este proceso puede intensificarse en ambientes donde ocurre la oxidación de minerales sulfurados, que generan ácido sulfúrico y libera protones (H^+) al medio. La acidificación resultante aumenta la solubilidad de los carbonatos presentes en los sedimentos, acelerando su disolución y contribuyendo a la liberación de cationes asociados. Además, su abundancia puede influir en la movilidad de metales pesados, favoreciendo procesos de coprecipitación o adsorción (U.S. EPA, 1998; Romero et al., 2011; Corrales-Pérez y Romero, 2013).

Los altos porcentajes de silicatos a lo largo del cauce principal se debe a la presencia de minerales silicatados identificados en el análisis mineralógico. Mientras que, su disminución aguas abajo puede estar relacionada con la tendencia observada en el aumento de la proporción de carbonatos.

Los valores de conductividad eléctrica (CE) en los sedimentos de corriente de la cuenca Vis Vis-Amanao muestran una notable uniformidad entre los distintos sitios muestreados. No obstante, la muestra DS5, ubicada en la parte media del cauce, presenta el valor más elevado, acompañado de una alta dispersión, evidenciada por su desviación estándar. Este comportamiento podría indicar una mayor variabilidad temporal o espacial en las condiciones geoquímicas del sitio. El incremento en la CE podría estar vinculado a procesos de alteración de la roca de caja, que liberan cationes (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+}) y aniones (SO_4^{2-} , HCO_3^-) al sistema acuático, o bien al arrastre de productos de meteorización. Este patrón es coherente con la mineralogía identificada, en la que la presencia de minerales como calcita, zeolitas y feldspatos sugiere procesos de disolución que contribuyen al aumento de la carga iónica total (Marín Galvín, 2010; Hernández et al., 2003).

Los bajos porcentajes de MO determinados en el cauce principal con respecto a los afluentes, refleja la influencia de factores naturales en la dinámica de acumulación y degradación. El río Vis Vis-Amano presenta una dinámica de flujo activa y mayor transporte de sedimentos, que dificultan la acumulación de fracciones orgánicas. La leve tendencia al incremento aguas abajo del cauce principal puede estar relacionado a los aportes de afluentes, que presentan mayores valores de MO. A su vez, en los tramos bajos del río, la disminución de la pendiente y la velocidad de flujo, favorecen la sedimentación de materia orgánica por la mayor acumulación y descomposición parcial de la misma, debido a procesos biogeoquímicos naturales (Allan y Castillo, 2007; Wetzel, 2001). Este incremento se correlaciona con la tendencia al aumento de la CIC hacia la cuenca baja, y la presencia de arcillas identificadas en este sector del cauce.

6.5. MINERALOGÍA, GEOQUÍMICA, PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN SEDIMENTOS QUE CONFORMAN LOS TRIBUTARIOS DE LA CUENCA Y EL SITIO CONTROL

El afluente QLB presenta concentraciones de metales relativamente menores que las registradas en los sedimentos del río principal, con la excepción del contenido de Zn, que muestra un valor elevado respecto de la parte baja y media del cauce principal. El enriquecimiento mencionado coincide con lo reportado por Ferpozzi et al. (2002) para la zona, y podría estar relacionado con pequeños afloramientos de zonas de alteración.

Los registros más bajos de silicatos y los altos porcentajes de carbonatos en los sedimentos de este tributario indican una fuerte presencia de minerales carbonatados como calcita (CaCO_3), lo cual es respaldado por el análisis mineralógico. El elevado contenido de calcita podría estar relacionado con la presencia de bancos de conglomerados interpretados como depósitos de canales submarinos carbonáticos. Esta secuencia es equivalente a las rocas de la Formación Puncoviscana (Durand y Spalletti, 1986). Según Mirré y Aceñolaza (1972), en la Sierra de la Ovejería aflora una sucesión rítmica de cuarcitas y pelitas interestratificadas, de tonalidades gris verdoso, intensamente deformadas y metamorfoseadas, conocida como Formación Suncho. Esta unidad contiene el icnogénero *Oldhamia*, lo que refuerza la correlación propuesta. La calcita podría haberse originado como cemento carbonático durante la diagénesis temprana de los sedimentos marinos, particularmente en ambientes de plataforma o talud con aporte significativo de carbonatos (Murra et al., 2016). Asimismo, puede encontrarse como granos detríticos carbonáticos provenientes de áreas fuente compuestas por rocas carbonatadas (Aceñolaza y Aceñolaza, 2005). Por otro lado, parte de la calcita presente pudo haberse generado o recristalizado durante los procesos metamórficos que afectaron a la formación. En este contexto, las reacciones de descarbonatación entre minerales aluminosilicatos y carbonatos podrían haber dado lugar a calcita remanente (Toselli et al., 2012).

Otra hipótesis con respecto a la presencia de calcita en este sector está relacionada con procesos de alteración hidrotermal. Según Palacio et al. (2005), en el sector oeste del río Vis Vis afloran brechas volcánicas andesíticas asociadas al grupo volcánico Farallón Negro, con dos tipos de alteración hidrotermal, propilítica incompleta y arcilloso-sericítica. Entre estas alteraciones se destaca que la alteración propilítica afecta las andesitas con una intensidad leve a moderada, generando asociaciones mineralógicas características como clorita y calcita. Los fenocristales de anfíbol y biotita pueden alterarse casi totalmente a calcita o a una mezcla de clorita+calcita. Incluso se han observado agregados de calcita en la pasta de la roca. Estas características mineralógicas son coherentes con el pH alcalino de QLB. La CE presenta un valor que está dentro del rango típico de ambientes de agua dulce con baja mineralización. Esta característica puede deberse a la poca renovación de agua, dado su escaso caudal, lo que permite cierta acumulación de iones sin que llegue a ser un valor elevado (Wetzel, 2001; Rodríguez y Bechara, 2005). Además, la relación observada entre el pH y la conductividad eléctrica indica una predominancia de sales bicarbonatadas y carbonatadas, las cuales presentan una menor carga iónica y menor solubilidad en comparación con otras especies

disueltas (cloruros y sulfatos). Esta composición química está directamente influenciada por las características geológicas del entorno, especialmente la presencia de formaciones ricas en carbonatos y materiales arcillosos (Allan y Castillo, 2007).

Los sedimentos de corriente del tributario DS4 presentan un contenido de Mn similar al reportado para la cuenca baja. Las menores concentraciones de Cu y Fe con respecto al cauce principal podrían indicar un menor aporte de material mineralizado desde este sector. En contraste con el resto de los elementos, los contenidos de Zn y As son similares al de la cuenca media. La presencia de As en los sedimentos podría estar relacionada con los extensos bancos de cenizas volcánicas que afloran en la zona (Carrizo, 2013). En estas cenizas, el As puede encontrarse como impurezas incorporadas en la estructura del vidrio volcánico, donde los átomos de As están químicamente enlazados a la red Al-Si, constituyendo la fase mayoritaria y más estable en condiciones exógenas (Nicolli et al., 2012; Bia et al., 2017; 2022). Además, el As puede coprecipitar sobre la superficie del vidrio y formar parte de fases minerales discretas, como la arsenopirita (Bia et al., 2017).

Por otro lado, en la muestra DS7E se registra un alto contenido de Zn, comparable con los valores observados en la cuenca superior. Esta anomalía podría atribuirse al contacto del agua con afloramientos de vulcanitas del Complejo Volcánico Farallón Negro (ver Figura 5, mapa geológico). En un tramo significativo del arroyo Yacochuyo, donde se recolectó la muestra DS7E, las aguas interactúan con zonas aparentemente mineralizadas, cuya geología aflorante se asemeja a la de Minas Capillitas (Yaciuk et al., 2021).

Los elevados valores del Igeo para Cu y Zn en los tributarios podrían estar asociados a procesos de meteorización en zonas de alteración vinculadas a pequeños afloramientos mineralizados (Palacio et al., 2005). No obstante, las diferencias metodológicas previamente mencionadas podrían estar influyendo en los altos valores registrados para estos elementos.

La paragénesis mineral identificada en ambos tributarios (compuesta por cuarzo, flogopita, moscovita, albita, anortita, calcita, caolinita y montmorillonita) puede interpretarse como resultado de un proceso de metasomatismo de contacto, posiblemente asociado a intrusiones ígneas cercanas que habrían favorecido la oxidación de minerales portadores de hierro. Este proceso también es capaz de inducir la alteración de feldespatos y otros silicatos aluminicos, promoviendo la formación de minerales arcillosos como caolinita y montmorillonita, característicos de condiciones de alteración supergénica (Winter, 2014). Asimismo, la meteorización química asociada podría haber contribuido al aumento del pH en DS4 mediante la liberación de iones con efecto alcalinizante. En particular, la disolución de silicatos y la presencia de carbonatos primarios en estos materiales pueden liberar especies como CO_3^{2-} y HCO_3^- , las cuales incrementan la alcalinidad del medio y, en consecuencia, el pH del agua intersticial en los sedimentos (Morales Santos, 2020; Drever, 1997). El pH del afluente DS7E presenta valores similares al resto de la cuenca.

Los elevados contenidos de materia orgánica observados en los afluentes podrían estar relacionados con los bajos caudales registrados en estos cuerpos de agua. Estas condiciones favorecen la acumulación y retención de MO, ya que una menor dinámica hidráulica limita el arrastre de compuestos orgánicos. Esta interpretación es coherente con los registros del Ministerio de Minería (Programa del Proyecto Bajo de la Alumbra – Subprograma Cuenca

Vis Vis-Amanao), que reportan bajos caudales o incluso la ausencia de mediciones en los sitios QLB y DS4 debido al escaso flujo. Tales condiciones refuerzan la hipótesis de que la baja dinámica del sistema facilita la acumulación de materia orgánica. Particularmente en el sitio QLB, se informó la presencia de algas, lo que sugiere un aporte significativo de MO autóctona, proveniente de la producción primaria dentro de la cuenca (Jácome de Solorzano y Llanos de Bonilla, 1990). Además, los análisis mineralógicos realizados en este estudio evidencian una mayor proporción de sedimentos finos en DS4 y DS7E. Esta característica favorece la retención de materia orgánica al ofrecer una mayor superficie específica para la adsorción, y al facilitar la deposición de compuestos orgánicos en condiciones de flujo reducido (Goldberg et al., 1990).

Estos niveles de MO son concordantes con los registros elevados de capacidad de intercambio catiónico (CIC), registrados en DS7E y DS4 lo que sugiere una alta capacidad de retención de iones. Este comportamiento se ve reforzado por la presencia de minerales arcillosos en estas muestras, los cuales, al igual que la MO, poseen una elevada superficie específica y grupos funcionales capaces de absorber cationes (Rovira, 1993; Domenech, 1995). En este contexto, los sedimentos de los sitios podrían actuar como “filtros” naturales, contribuyendo a la inmovilización de nutrientes y contaminantes en el sistema acuático (Hongve et al., 1980; Babich y Stotzky, 1983). La distribución espacial de la MO respalda la hipótesis de que las condiciones hidrodinámicas locales y geoquímicas de los sedimentos, juegan un rol clave en la retención de metales (Milessi et al., 2005; Pérez Rojas, et al., 2000).

Sin embargo, el tributario QLB presentó un valor bajo de CIC. Este resultado podría estar relacionado con una mineralogía dominada por carbonatos, los cuales, a diferencia de materiales coloidales como las arcillas o la materia orgánica, exhiben una reactividad superficial limitada. Esta característica reduce la capacidad de los sedimentos para actuar como barreras efectivas frente a la movilidad de metales y otros cationes dentro del sistema fluvial.

El sitio control presenta concentraciones de metales entre dos y tres veces más bajas que las observadas en la cuenca de estudio, lo que evidencia un contexto geológico distinto. La mineralogía del lugar es predominantemente primaria, lo que sugiere una escasa meteorización. Esto indica que los sedimentos provienen de fuentes geológicas cercanas, con distancias cortas o tiempo de transporte, lo que ha restringido las transformaciones mineralógicas significativas.

En este sitio, los valores de pH son cercanos a la neutralidad, lo que lo distingue del resto de los puntos analizados, ya que no está directamente vinculado al área principal de estudio. Esta neutralidad podría estar asociada a los bajos contenidos de carbonatos detectados en los sedimentos. Por otro lado, los elevados niveles de MO se explican por la presencia de minerales arcillosos, que favorecen la adsorción de compuestos orgánicos. Además, la localización del sitio en una zona baja de la cuenca, donde la pendiente y la velocidad del flujo disminuyen, facilita la acumulación de estos materiales finos y orgánicos. Como resultado de estas condiciones, esta muestra exhibe un elevado contenido de CIC, lo que refuerza su papel como un entorno geoquímicamente amortiguado, con bajo potencial de liberación de metales al medio ambiente. Esto lo convierte en un punto de referencia valioso para comparar con áreas más impactadas por procesos geológicos.

6.6. EVALUACIÓN DEL RIESGO ECOLÓGICO E ÍNDICE DE RIESGO ECOLÓGICO GLOBAL

La evaluación del riesgo ecológico potencial (E_r) en sedimentos de la cuenca Vis Vis–Amanao indica que la región presenta en general un bajo nivel de amenaza ecológica asociada a los elementos analizados. De acuerdo con los criterios de Hakanson (1980), los valores de E_r para As, Cr y Zn señalan una baja contribución individual al riesgo ecológico. En el caso del cobre (Cu), los valores de E_r oscilaron entre bajo y moderado, con los niveles más altos registrados sobre el cauce principal, donde alcanzaron valores cercanos a 50. Esto sugiere una mayor disponibilidad de este elemento debido al aporte de zonas mineralizadas, aunque aún dentro de niveles no alarmantes.

El índice de riesgo ecológico global (RI), que sintetiza el impacto conjunto de todos los elementos analizados, fue consistentemente inferior a 150 en todos los sitios, lo que clasifica el estado ecológico general de la cuenca como de riesgo bajo. Este hallazgo es de particular relevancia, ya que indica una ausencia de efectos potenciales severos sobre la biota acuática y los ecosistemas sedimentarios, a pesar de la presencia de metales trazas. Sin embargo, los resultados deben interpretarse con cautela, considerando ciertas limitaciones metodológicas. Por un lado, los valores de E_r para cada elemento podrían estar sobreestimados debido a que, el tamaño de malla empleado en este ensayo fue diferente al de los sitios basales en el estudio de Ferpozzi et al. (2002a, b), lo cual podría haber influido en la captura y representación de partículas clave para evaluar el riesgo ecológico. Por otro lado, los valores del RI podrían estar subestimados, debido a que faltan algunos elementos por analizar, los cuales posiblemente modifiquen la percepción actual del riesgo en estos sitios y limitar la interpretación completa del riesgo ecológico en la región.

Es destacable que los afluentes de la cuenca presentaron valores aún más bajos de E_r y RI, lo que podría estar relacionado con un menor aporte de materiales provenientes de áreas con mineralización y sin intervención antrópica. Esta tendencia sugiere que el mayor impacto se concentra en el cauce principal, probablemente debido al arrastre de elementos desde zonas enriquecidas en minerales metálicos.

Estudios en zonas mineras de cobre en China y Colombia muestran un alto riesgo ecológico en sedimentos fluviales. En China, se evaluaron siete minas activas con un impacto que alcanza hasta el 99 % de especies potencialmente afectadas, siendo Dabaoshan y Dahongshan las más críticas (Liu et al., 2020). En Colombia, en el río San Jorge, se registró un índice de riesgo ecológico (RI) > 600, con altos niveles de Cu (hasta 66 $\mu\text{g/g}$), indicando un riesgo muy alto asociado a la actividad minera (Sánchez-Díaz et al., 2020).

6.7. INTERACCIÓN SEDIMENTOS-AGUA Y SU INFLUENCIA EN LA CALIDAD GEOQUÍMICA DEL SISTEMA FLUVIAL

Comparar los resultados geoquímicos de los sedimentos de corriente con los datos de calidad de agua es fundamental para identificar los procesos de adsorción y desorción que controlan la movilidad y biodisponibilidad de los metales pesados en ambientes fluviales. Estos

procesos están influenciados por factores como la composición mineralógica, el contenido de materia orgánica y las condiciones fisicoquímicas del entorno. Mientras los sedimentos funcionan como reservorios a largo plazo, el agua representa un medio más dinámico, por lo que su análisis conjunto brinda una perspectiva integral sobre el origen y el riesgo asociado a la contaminación (Miranda et al., 2021).

Los valores de pH más alcalinos y estables del agua a lo largo de la cuenca durante la estación húmeda pueden atribuirse al aumento del caudal generado por las lluvias, lo que favorece una mayor disolución de los carbonatos presentes en los sedimentos y, en consecuencia, eleva su concentración en el agua. Mientras que, el pH es neutro a levemente alcalino en el periodo seco, la escorrentía superficial es menor, lo que significa que hay menos aporte de nutrientes e iones disueltos al río. Sin embargo, en campo se aprecia frecuentemente durante este periodo la presencia de algas y en consecuencia una acumulación de materia orgánica. La descomposición de materia orgánica puede liberar ácidos, lo que podría contribuir a la disminución del pH (Yana Neira, 2014).

Los elevados valores de conductividad eléctrica (CE) del agua en el sector superior y medio de la cuenca, durante ambos períodos hidrológicos, se atribuyen al aporte de iones disueltos provenientes de zonas mineralizadas. Esto ocurre a través de procesos naturales de meteorización y lixiviación de rocas ricas en minerales, lo que incrementa significativamente la conductividad.

Teniendo en cuenta el contenido elemental en agua, solo fue posible analizar las concentraciones de elementos disueltos correspondientes al período 2001, ya que en 2022 los valores se encontraron por debajo del límite de cuantificación del método utilizado. Esta limitación impidió llevar a cabo un análisis riguroso de las tendencias a lo largo de la cuenca e identificar posibles aportes vinculados a la actividad minera. Para el período 2001, al igual que en los sedimentos de corriente, se observa una disminución progresiva de las concentraciones de metales disueltos en el cauce principal en dirección aguas abajo. Estos resultados evidencian un aporte geoquímico asociado a las zonas mineralizadas ubicadas en los sectores superior y medio del cauce. La disminución de metales en el agua durante el período seco sugiere una menor movilización desde fuentes externas, así como una mayor retención en los sedimentos fluviales, probablemente vinculada a la reducción del caudal y a condiciones fisicoquímicas más estables. Estas condiciones, a su vez, favorecen la precipitación y los procesos de adsorción de metales sobre minerales secundarios, como arcillas y materia orgánica, identificados en los sedimentos (Rahi et al., 2024; Miranda et al., 2021). Adicionalmente, en sectores donde el flujo es más lento y las temperaturas son más elevadas, puede incrementarse la actividad de biofilms y microorganismos, que contribuyen a la retención o transformación de metales, reduciendo así sus concentraciones disueltas en el agua (Wen et al., 2024).

La naturaleza sulfatada de las aguas en las distintas zonas de muestreo puede atribuirse principalmente al contexto geológico del área, caracterizado por la oxidación de sulfuros, como la pirita (FeS_2), un proceso común en ambientes ricos en minerales sulfurados. La oxidación natural de estos minerales, favorecida por la exposición a condiciones meteóricas y la interacción con aguas superficiales y subterráneas, genera sulfatos disueltos que son transportados hacia los sistemas hídricos (Younger, 2001; Nordstrom, 2011). Asimismo, es

habitual en estos ambientes un aporte adicional proveniente de la disolución de minerales sulfatados presentes en la cuenca, como yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4) (Appelo y Postma, 2005). Sin embargo, un estudio realizado en la cuenca del río Vis Vis-Amanao por Vázquez et al. (2006) señala que el sulfato presenta una composición isotópica similar a la observada en la fuente termal Los Baños de Visvis y en algunas aguas subterráneas, lo que sugiere un origen regional asociado a un flujo profundo.

En el caso del agua de composición sulfatada magnésica, identificada en el punto DS4, la presencia de magnesio podría explicarse por la interacción del agua con un afloramiento de andesitas que contienen abundantes minerales ferromagnesianos. Estas rocas forman parte del Complejo Volcánico Farallón Negro (Llambías, 1970), reconocido por su diversidad de facies y su alto contenido en minerales máficos como olivino, piroxeno y anfíboles. La alteración y disolución de estos minerales liberan cationes de Mg^{2+} al sistema acuoso, los cuales, en combinación con el aporte de sulfatos provenientes de procesos de oxidación de sulfuros o de la disolución de fases secundarias, favorecen la conformación de un tipo hidroquímico sulfatado magnésico. Este comportamiento hidrogeoquímico sugiere una estrecha relación entre la litología volcánica de la zona y la composición iónica del agua superficial.

Los diagramas hidroquímicos informan una relativa estabilidad en la composición iónica del agua en el tiempo. Las variaciones observadas entre muestreos son mínimas, especialmente en cuanto a la concentración de cationes y aniones mayoritarios, lo que sugiere condiciones geoquímicas estables en el sistema hidrogeológico evaluado.

Considerando los elevados niveles de salinidad registrados, cabe destacar que la composición química del agua está fuertemente influenciada por la geología de la zona, lo que condiciona su aptitud para diversos usos, como el agrícola o el consumo humano. Además, las concentraciones de arsénico (As) superan los valores máximos permitidos para agua de consumo humano establecidos por la Organización Mundial de la Salud y el Código Alimentario Argentino ($10 \mu\text{g/L}$).



CAPÍTULO VII.

CONCLUSION

7. CONCLUSIONES

El estudio permitió alcanzar satisfactoriamente los objetivos propuestos, brindando una caracterización detallada de los sedimentos de corriente del río Vis Vis-Amanao y aportando elementos clave para el análisis de la dinámica geoquímica y la evaluación del riesgo ambiental por metales pesados en la cuenca.

Desde el punto de vista **mineralógico**, se identificaron tanto fases primarias (cuarzo, plagioclasas, feldespatos, clinocloro, micas), coherentes con la geología regional, como fases secundarias (calcita, talco, zeolita, vermiculita, caolinita, montmorillonita), asociadas a procesos de alteración hidrotermal, meteorización supergénica y procesos diagenéticos, que reflejan una evolución mineralógica activa en los sedimentos.

En cuanto a la **interacción sedimento-agua**, los resultados evidencian una dinámica controlada por la composición mineralógica, la presencia de materia orgánica y las condiciones fisicoquímicas (pH, conductividad, contenido de carbonatos y silicatos). Los procesos de adsorción, coprecipitación y retención de metales en fases sólidas (arcillas, carbonatos, MO) juegan un rol fundamental en la movilidad y biodisponibilidad de los elementos metálicos en el sistema.

El análisis geoquímico mostró que las concentraciones más elevadas de Cu, Zn, Pb, Mn y As se registran en la cuenca alta, en asociación con fuentes naturales como depósitos mineralizados (La Alumbraera, Cerro Atajo) y aportes hidrotermales (Baños de Vis Vis). La progresiva disminución de estos elementos aguas abajo sugiere procesos de dilución y retención en los sedimentos.

El **índice de geoacumulación (Igeo)** y la **evaluación del riesgo ecológico (Er, RI)** evidencian que, en general, el sistema presenta un bajo riesgo ecológico. Sin embargo, se detectan niveles moderados a altos de contaminación por Cu y Zn en sectores puntuales, y contaminación moderada por As en determinadas áreas. Asimismo, se identificaron zonas con mayor potencial de riesgo, principalmente en la cuenca alta y media, en correspondencia con sectores mineralizados.

En conjunto, los resultados sugieren que el enriquecimiento de metales como Cu, Zn y As en los sedimentos del río Vis Vis–Amanao, particularmente en los sectores alto y medio de la cuenca, podría estar influenciado por la actividad minera en la región, en combinación con fuentes naturales vinculadas a la geología local, como zonas mineralizadas y sistemas hidrotermales.

El **comparativo entre sedimentos y agua** evidenció la importancia de los sedimentos como reservorios de metales, con una retención importante en fases sólidas que limita la movilidad de los elementos en la columna de agua. Sin embargo, las altas concentraciones de As en el agua, que superan los límites establecidos para consumo humano, y los elevados niveles de salinidad, representan limitaciones importantes para el uso de estos recursos hídricos.

Finalmente, la estabilidad observada en la composición iónica y en los parámetros fisicoquímicos del agua a lo largo del tiempo sugiere un sistema relativamente estable desde el punto de vista geoquímico. Sin embargo, la influencia de fuentes naturales de metales y la dinámica propia del sistema demandan un monitoreo continuo, a fin de evaluar posibles cambios en el riesgo ambiental asociado.

7.1. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Los resultados obtenidos en este estudio permiten proponer una serie de recomendaciones y líneas de trabajo futuro para consolidar el conocimiento sobre la dinámica ambiental de la cuenca del río Vis Vis-Amanao y mejorar la gestión de sus recursos.

Estudios complementarios sobre biota:

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se considera valioso incorporar evaluaciones de bioacumulación de metales en organismos acuáticos, como macroinvertebrados, con el objetivo de integrar la dimensión ecológica a la caracterización del riesgo. Este enfoque permitiría avanzar hacia una evaluación más integral del impacto potencial de la contaminación por metales en las redes tróficas del sistema fluvial.

Evaluación de la aptitud de uso del recurso hídrico:

Dada la elevada salinidad y la presencia de As en el agua, es recomendable realizar estudios específicos orientados a definir estrategias de tratamiento o uso alternativo, considerando los posibles impactos en la salud humana y en la actividad agropecuaria.

Profundización en la caracterización hidrogeológica:

Dado el importante rol que juegan los aportes hidrotermales y las aguas subterráneas en la geoquímica del río, se sugiere complementar este trabajo con estudios hidrogeológicos e isotópicos para entender mejor las fuentes de agua, los flujos subterráneos y su interacción con el sistema superficial.

Evaluación de escenarios de cambio climático:

Considerando la sensibilidad del sistema a variaciones en el caudal y en las condiciones fisicoquímicas, sería importante explorar cómo los cambios en el régimen hídrico (por ejemplo, eventos extremos o disminución de caudales) podrían afectar la movilidad y el riesgo de los metales en el futuro.

Recomendaciones metodológicas:

Una recomendación para futuras investigaciones en esta cuenca, orientada a evaluar con mayor precisión el impacto de la actividad minera sobre los sedimentos del río Vis Vis-Amanao, es la estandarización rigurosa de los métodos de muestreo y análisis, en concordancia con los procedimientos aplicados en campañas previas a la explotación minera. Esto permitiría reducir la incertidumbre asociada a las diferencias metodológicas detectadas, que dificultan la comparación espacial y temporal de los resultados.

Además, se recomienda que los monitoreos periódicos realizados por las empresas mineras y el Ministerio de Minería incorporen técnicas analíticas con límites de cuantificación más bajos, como la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). En este estudio, se observó que muchas concentraciones reportadas en los datos oficiales se encontraban por debajo del límite de cuantificación, no debido a la ausencia real de los elementos en el agua, sino a la limitada sensibilidad de los métodos utilizados. Esta situación impidió evaluar adecuadamente las tendencias espaciales y temporales de varios elementos, restringiendo así el análisis del comportamiento geoquímico de la cuenca.

En síntesis, el conocimiento generado en este trabajo constituye una base sólida sobre la cual profundizar futuras investigaciones y diseñar estrategias de monitoreo y gestión ambiental que aseguren la protección de los recursos hídricos y de los ecosistemas asociados en la cuenca del río Vis Vis-Amanao.

7.2. BIBLIOGRAFÍA

- Aceñolaza, F., y Aceñolaza, G. (2005). La Formación Puncoviscana y unidades estratigráficas vinculadas en el Neoproterozoico - Cámbrico temprano del noroeste argentino. *Revista Latinoamericana de Sedimentología y Análisis de Cuencas*, 12 (2), 65-87.
- Aceñolaza, F., y Toselli, A. (1981). Geología del Noroeste Argentino: San Miguel de Tucumán. *Universidad Nacional de Tucumán*.
- Ahumada, A. (1979). Geología de la Cuesta de La Chilca. Tesis Profesional de Licenciatura. Universidad Nacional de Tucumán, 60 pp.
- Allan, J., y Castillo, M. (2007). *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters* (2nd ed.). Springer.
- Angelelli, V. (1984). Yacimientos Metalíferos de la República Argentina, Volumen 1. *Comisión de Investigaciones Científicas, Universidad Nacional de la Plata. Instituto de Geología Aplicada*, Buenos Aires.
- Appelo, C., y Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. (2nd ed.). CRC Press/Balkema.
- Árcega Santillán, I. (2010). *Caracterización hidrogeoquímica del acuífero del valle de Villa de Hidalgo, San Luis Potosí, México*. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales.
- Arcos Aldaz, F., y Kuontay Jaime, P. (2024). *Evaluación integral de la calidad ambiental y tolerancias fúngicas a diferentes concentraciones de metales pesados (CD, PB Y CR) en el sedimento marino del puerto El Morro*. Tesis de grado
- Artículo N° 982. (2007), Código Alimentario Argentino. Ley N° 18. 284. Buenos Aires.
- Babich, H., y Stotzky, G. (1983). Los factores fisicoquímicos de los reservorios naturales afectan la transformación y el intercambio de metales pesados tóxicos para los microbios. *Boletines Ecológicos*, 315-323.
- Barrezueta-Unda, S., Cervantes-Alava, A., Ullauri-Espinoza, M., Barrera Leon, J., y Condoy-Gorotiza, A. (2020). Evaluación del método de ignición para determinar materia orgánica en suelos de la provincia el Oro-Ecuador. *Fave. Sección ciencias agrarias*, 19(2), 25-26.
- Barros, P., y Blasco, M. (1971). Cobalto, Cobre, Molibdeno totales en los suelos volcánicos del Altiplano de pasto, Nariño. Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*.
- Bastakoti, U. (2019). *Trace metal dynamics in mangrove sediments within temperate estuaries* (Doctoral dissertation, School of Science, Faculty of Health and Environmental Sciences, Auckland University of Technology, Auckland, New Zealand).
- Berner, R. A. (1987). *The Global Water Cycle: Geochemistry and Environment*. Prentice Hall.
- Bia, G., Garcia, M., y Borgnino, L. (2017). Cambios en la especiación de sólidos de arsénico durante la meteorización de cenizas volcánicas: Un estudio XAS en

cenizas patagónicas y loess chacopampeño. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2212,119-132.

- Bia, G., García, M., Cosentino, N., y Borgnino, L. (2022). Dispersión de especies de arsénico provenientes de erupciones volcánicas históricas altamente explosivas en la Patagonia. *The Science of Total Environment*, vol 853.
- Bose, S., y Sharma, A. (2021). Arsenic in sediment and groundwater: a global overview. In: *Arsenic in Drinking Water and Food* (pp. 13–31). Springer.
- Bossi, G. y Palma, R. (1982). Reconsideración de la estratigrafía del valle de Santa María, provincia de Catamarca, Argentina. *5° Congreso Latinoamericano de Geología*, Actas 1: 155-172, Buenos Aires.
- Bossi, G., Ovejero, R. y Strecker, M. (1987). Correlación entre los perfiles de Puerta de Corral Quemado-Hualfín y de Entre Ríos (Chiquimil), provincia de Catamarca, Argentina. *10° Congreso Geológico Argentino*, Actas 2: 117-120, Tucumán.
- Bossi, G.E., Muruaga, C., Sanagua, J., Hernando, A., Quiroga, G., Ahumada, A., Gavriloff, I. (1992). Aloestratigrafía del Neógeno del Valle del Cajón (Provincia de Catamarca). En Reunión Argentina Sedimentología 4(3): 137-144. San Miguel de Tucumán.
- Bossi, G., Muruaga, C., Sanagua, J., Hernando, A. y Ahumada, A. (1993). Geología y Estratigrafía de la cuenca Neógena Santa María Hualfín (Departamentos Santa María y Belén, provincia de Catamarca). *12° Congreso Geológico Argentino*, Actas 2: 156-165, Mendoza.
- Bossi, G., Muruaga, C., y Gavriloff, I. (1999). Ciclo Andino. Neógeno-Pleistoceno. Sedimentación (González Bonorino, G; Omarini, R.; Viramonte, J.; editores). *Congreso Geológico Argentino N° 14*, 1: 329-360. Salta.
- Bossi, G., Georgieff, S., Gavriloff, I., Ibañez, L. y Muruaga, C. (2001). Cenozoic evolution of the intramontane Santa María basin, Pampean Ranges, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. 14:725-734.
- Bossi, G., y Muruaga, C. (2009). Estratigrafía e inversión tectónica del 'riff' neógeno en el Campo del Arenal, Catamarca, NO Argentina. *Andean Geology* .36: 311-341.
- Bravo Covarrubias A., Cano-Rodríguez I., Jofre-Meléndez R., Gutiérrez-Valtierra M. y Ramos-Arroyo Y.R. (2017). Mass balances in a dam that receives mine drainage. *Procedia Earth and Planet. Sci.* 17, 710-713.
- Bravo Covarrubias, A., Torres, E., Ayora, C., y Ramos Arroyo, Y. (2020). Movilidad de arsénico en los sedimentos de una presa que recibe escurrimientos de minas epitermales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(4), 797-811.
- Brodtkorb, M. (2015). Clinocloro. In S. L. M.K. de Brodtkorb, Compendio de las especies minerales de la República Argentina (pp. 608-609). Buenos Aires. Asociación Mineralógica Argentina Fundación Empremin.
- Buajan, S., y Pumijumong, N. (2010). Distribución de metales pesados en sedimentos de manglares del estuario de Tha Chin, provincia de Samut Sakhon, Tailandia. *Applied Environmental Research*, 32 (2), 61-77.

- Buret, Y., von Quadt, A., Heinrich, C., Selby, D., Wälle, M., Peytcheva, I. (2016). From a longlived upper crustal magma chamber to rapid porphyry copper emplacement: Reading the geochemistry of zircon crystals at Bajo de la Alumbrera (NW Argentina). *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 450: 120-131.
- Butler, R.F., Marshal, L.G., Drake, R.E., Curtis, G.H. (1984). Magnetic polarity stratigraphy and (super 40) K-(super 40) Ar dating of late Miocene and early Pliocene continental deposits, Catamarca province, NW Argentina. *Journal of Geology* 92(6): 623-636.
- Cain, D., Luoma, S., y Wallace, W., (2004). Vinculación de la bioacumulación de metales en insectos acuáticos con sus patrones de distribución en un río afectado por la minería. *Toxicología y Química Ambiental*, 23 (6), 1463-1473.
- Candiani, J.C., Seggiaro, R., Carrizo, N., Pereyra, F. (en prensa) (2025). Hoja Geológica 2766-III, Belén, provincias de Catamarca y Tucumán. Escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 457, 107 pp. Buenos Aires
- Canfield, T., Kemble, N., Brumbaugh, W., Dwyer, F., Ingersoll, C., y Fairchild, J., (1994). Use of benthic invertebrate community structure and the sediment quality triad to evaluate metal-contaminated sediment in the upper Clark Fork River, Montana. *Environ. Toxicol. Chem.* 13, 1999–2012.
- Caminos, R. (1979). Sierras Pampeanas Noroccidentales. Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. In *II Simposio de Geología Regional Argentina* (Vol. 1, pp. 225–291). Academia Nacional de Ciencias de Córdoba.
- Campbell, P., y Tessier, A. (1989). Biological availability of metals in sediments analytical approaches. En: *Int. Conf. Heavy Metals in the Environment, Geneva*. 1.P. Vernet (Ed), CEP Consultante Ltd. Edinburgh. UK, pp 516-525.
- Carrizo N., (2013). Estudio, caracterización y relación de las aguas termales del departamento Belén y Andalgalá, provincia de Catamarca. Tesis de grado.
- Chapman, P., Wang, F., Janssen, C., Persoone, G., y Allen, H. (1996). Ecotoxicology of metals in aquatic sediments: binding and release, bioavailability, risk assessment, and remediation. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(10), 2221–2243.
- Chatterjee, M., Massolo, S., Sarkar, S., Bhattacharya, A., Bhattacharya, B., Satpathy, K., y Saha, S. (2009). Evaluación de la contaminación por oligoelementos en núcleos de sedimentos intermareales del manglar de Sunderban, India, para evaluar las directrices de calidad de sedimentos. *Monitoreo y evaluación ambiental*, 150, 307-322.
- Chen, C., Kao, C., Chen, C., y Dong, C. (2007). Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere*, 66(8), 1431-1440.
- Corrales-Pérez, D., y Romero, F., (2013), Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 427-446.

- Dalla Salda, L., Toselli, A., Caminos, R., y Gardini, C. (1999). Proterozoico y paleozoico inferior de las Sierras Pampeanas Occidentales. *Anales del Instituto de Geología y Recursos Minerales*. 29: 159-161, Buenos Aires.
- Dávila, F., Giménez, M., Nóbile, J. y Martínez, P. (2012). The evolution of the high-elevated depocenters of the northern Sierras Pampeanas (ca. 28° SL), Argentine broken foreland, South-Central Andes: the Pipanaco Basin. *Basin Research* 24: 615-636.
- Domenech, X. (1995). *Química de la hidrosfera. Origen y destino de los contaminantes*. Ed. Miraguano, Madrid, pp 174.
- Drever, J. (1997). *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Durand, F. (1982). Caracteres geológicos del basamento de la sierra de la Ovejería, provincia de Catamarca. *Acta Geológica Lilloana* 16(1): 93-109.
- Durand, F.R. (1985). Caracterización geológica y paleoambiental de las psefitas de la Formación Suncho (Precámbrico superior - Cámbrico inferior), Provincia de Catamarca. *Acta Geológica Lilloana* 16(2): 337-345.
- Durand, F. y Spalletti, L. (1986). Las facies turbidíticas del Precámbrico Superior-Cámbrico inferior en la zona de Corralito, provincia de Salta. *Reunión Argentina de Sedimentología*. Resúmenes: 113-116.
- Eaton, A., Clesceri, L., Rice, E., y Greenberg, A. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, twenty-first ed. APHA. *American Public Health Association*, Washington DC.
- Echevarría, A.E. (1991). Ostrácodos del Oligoceno del noroeste de la provincia de Santa Cruz, Argentina. *Ameghiana* 28(1-2): 35-53.
- Enns, S., y Findlay, A. (2005). Geological evaluation of the cerro atajo prospect, Argentina. Vancouver, Canadá: Cardero Resource Corp.
- Fabricaciones Militares. (1977). Informe geológico Bajo San Lucas. Repositorio Segemar.
- FAO. (2021). Procedimiento operativo estándar para el análisis de carbonato de calcio equivalente en suelo - Método de titulación. Roma.
- Fernandes, M., y Nayak, G. (2016). Role of sediment size in the distribution and abundance of metals in a tropical (Sharavati) estuary, west coast of India. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), 33.
- Ferpozzi, L., Turel, A., Vargas, D., Valladares, H., Jara, A., Siehankiewicz, D., y Casa, A. (2002a). Datos Geoquímicos Multielemento y Ubicación de Sitios de Muestreo de Sedimentos de Corriente del Plan NOA I Geológico- Minero. Hoja 2766-III Belén, Provincia de Catamarca, República Argentina. *Serie Contribuciones Técnicas*. Geoquímica, 88. SEGEMAR, Servicio Geológico Minero Argentino."
- Ferpozzi, L., Turel, A., Vargas, D., Valladares, H., Jara, A., Siehankiewicz, D., y Casa, A. (2002b). Datos Geoquímicos Cu, Pb y Zn y Ubicación de Sitios de Muestreo de Sedimentos de Corriente del Plan NOA I Geológico-Minero, Hoja 2766-III Belén,

- Provincia de Catamarca. República Argentina. *Serie Contribuciones Técnicas. Geoquímica*, 88. SEGEMAR, Servicio Geológico Minero Argentino."
- Flynn, J.J., Swisher, C.C. (1995). Cenozoic South American Land Mammal Ages. Correlation to global Geochronologies. *Geochronology Time Scales and Global Stratigraphic Correlation*. SEPM, Special Publication N° 54.
- Förstner, U., y Salomons, W. (1980). Trace metal analysis on polluted sediments: Part I: Assessment of sources and intensities. *Environmental Technology*, 1(11), 494–505.
- Förstner, U., y Wittmann, G. (1981). *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer-Verlag.
- Friedman, G. (1965). Occurrence of Talc as a Clay Mineral in Sedimentary Rocks. *Nature* 207 (pp. 283-284).
- Galli, C., Caffè, P., Arnosio, M., Seggiaro, R. y Becchio, R. (2012). Análisis paleoambiental y procedencia de los depósitos cenozoicos en el extremo suroeste de la sierra de Aconquija, Provincia de Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69: 596-610.
- Galván, A., y Ruiz Huidobro, O. (1965). Geología del Valle de Santa María. Estratigrafía de las formaciones mesozoicas terciarias. *Acta Geológica Lilloana* 7: 217-230.
- Galván A., (2024). Petrología y estructura interna del basamento metamórfico en Cumbre de las Cuchillas, Sierra de Ambato, Catamarca – Argentina: Implicancias en el Orógeno Famatiniano. Tesis de grado
- Gonsior, S., Sorci, J., Zoellner, M., y Landenberger, B. (1997). *Efectos del EDTA en la solubilización de metales en sistemas de sedimentos fluviales/agua* (Vol. 26, N.º 4, págs. 957-966). Sociedad Americana de Agronomía, Sociedad Americana de Ciencias de los Cultivos y Sociedad Americana de Ciencias del Suelo.
- González, O.E. (1990). Las vulcanitas del portezuelo Las Ánimas, sierra de Aconquija, provincia de Catamarca y Tucumán. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 45(3-4): 386-396.
- González Bonorino, F. 1950a. Descripción geológica de la Hoja 13e Villa Alberdi, Tucumán. Ministerio de Industria y Comercio de la Nación, Dirección Nacional de Minería, Boletín N° 74, 78 pp. Buenos Aires.
- González Bonorino, F. 1950b. *Geología y Petrografía de las Hojas 12d Capillitas y 13d Andalgalá*. Catamarca. Ministerio de Industria y Comercio de la Nación, Dirección General de Industria Minera, Boletín N° 70, 100 pp. Buenos Aires.
- González Bonorino, F. 1950c. Algunos problemas Geológicos de las Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 5(3): 6-110.
- González Bonorino, F. 1951a. Descripción geológica de la Hoja 12e Aconquija, Catamarca-Tucumán. Ministerio de Industria y Comercio de la Nación, Dirección Nacional de Minería, Boletín N° 75, 50 pp. Buenos Aires.
- González Bonorino, F. 1972. Descripción geológica de la Hoja 13c Fiambalá, Catamarca. Ministerio de Industria y Minería, Subsecretaría de Minería, Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 127, 75 pp. Buenos Aires.

- González Bonorino, F. 1978. Descripción geológica de la Hoja 14f, San Francisco del Valle de Catamarca. Ministerio de Economía, Secretaria de Estado de Minería, Boletín N° 160, 85 pp. Buenos Aires.
- Goldberg, S., Kapoor, B., y Rhoades, J. (1990). Efecto de los óxidos de aluminio y hierro, y de la materia orgánica, en la floculación y dispersión de suelos de zonas áridas. *Soil Science (150):588-593*.
- Gordillo, C., y Lencinas, A., (1979). Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En Turner, J.C. (Ed.): *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias. 577-650. Córdoba.
- Guilbert, J. (1995). Geology, alteration, mineralization and genesis of the Bajo de la Alumbrera porphyry copper-gold deposit, Catamarca Province, Argentina. *Arizona Geol. Soc. Digest, 20*, 646-656.
- Gutiérrez, A., Mon, R., Cisterna, C., Altenberger, U., y Arnous, A. (2023). Cenozoic Age Counterclockwise Rotation in the Northwest End of the Sierras Pampeanas, Argentina. *Open Journal of Geology*, 345-383.
- Hakanson, L. (1980). Un índice de riesgo ecológico para el control de la contaminación acuática. Un enfoque sedimentológico. *Investigación del agua*, 14 (8), 975-1001.
- Halter, W., Bain, N., Becker, K., Heinrich, C., Landtwing, M., VonQuadt, A., Clark, A., Sasso, A., Bissig, T. y Tosdal, R. (2004). From andesitic volcanism to the formation of a porphyry Cu-Au mineralizing magma chamber: The Farallón Negro Volcanic Complex, NW Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 136: 1-30.
- Harris, A., Allen, C., Bryan, S., Campbell, I. Holcombe, R., y Palin, M. (2004). ELA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of regional volcanism hosting the Bajo de la Alumbrera Cu-Au deposit: implications for porphyry-related mineralization. *Mineralium Deposita* 39: 46-67.
- Harris, A., Golding, S., y White, N. (2005). Bajo de la Alumbrera copper-gold deposit: Stable isotope evidence for a porphyry-related hydrothermal system dominated by magmatic aqueous fluids. *Economic Geology*, 100(5), 863-886.
- Hernández, J., Orihuela, D., Pérez-Mohedano, S., Marijuan y L., Furet, N., (2003). Efecto de la modificación del pH sobre la lixiviación de cationes en columnas de suelos calizos. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*, 6, 99-104.
- Hongve, D., Skogheim, O., Hindar, A., y Abrahamsen, H. (1980) Effects of heavy metals in combination with NTA, humic acid, and suspended sediment on natural phytoplankton photosynthesis. *Bull Environ Contam Toxicol* 25, 594-600.
- Horowitz, A. (1991). *A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry*. 2nd Edition, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2277.
- Imperial Pérez, L. (2010). Evaluación del potencial de generación de drenaje ácido de mina del material estéril del yacimiento de la mina Álamo Dorado. Sonora: Universidad de Sonora.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2003). *Guidelines for the use of sediment quality values in the assessment of sediment contamination*. IAEA-TECDOC-1357.

- Isacks, B., Jordan, T., Allmendinger, R. y Ramos, V. (1982). La segmentación tectónica de los Andes Centrales y su relación con la geometría de la Placa de Nazca subductada. *V Congreso Latinoamericano de Geología*, Vol. 3, 587-606.
- Jácome de Solorzano, M., y Llanos de Bonilla, L. (1990). Estudio de la materia orgánica en los sedimentos del río Jubones, en el área comprendida entre el puente La Iberia hasta su desembocadura.
- JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón). (1987) *Informe sobre Exploración de Minerales del área de Alto de la Blenda, República Argentina*. Fase I. YMAD (inédito) 166 p., Catamarca.
- JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón). (2002). *Estudio de desarrollo para la promoción del desarrollo sustentable en el área de influencia del Proyecto Bajo de la Alumbraera, Provincia de Catamarca, República Argentina*. Secretaría de Minería de la Nación.
- Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Brewer, J., Ramos, V., y Ando, C. (1983). Andean Tectonics Related to Geometry of Subducted Nazca Plate. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 341-361.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.
- Kirschbaum, A., y Seggiaro, R. (2011). Influencia de minera La Alumbraera en la calidad del agua del río Vis Vis – Amanao, Catamarca. In *VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea* (pp. 408–415).
- Knüver, M. 1983. Dataciones radimétricas de rocas plu tónicas y metamórficas. En Aceñolaza, F.G., Miller, H., Toselli, J. (Eds.). *Geología de la sierra de Ancasti*. Münstersche Forschungen zur Geologie und Päläon tologie. Münster. Heft 59: 201-218
- Kolthoff I., Sandell E., y Meehan E. (1979). *Análisis Químico Cuantitativo*. 5º Ed. Buenos Aires. pp 243.
- Kretz, R. 1983. Symbols of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68,277–279.
- Lafleur, A.E. (1981). Geología de las unidades sedimentarias en el este del Salar de Pipanaco. INCYTH. Ministerio de Obras y Servicios Públicos. Buenos Aires.
- Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry*. Prentice Hall.
- Lannefors, N. (1929). *Las Minas de Hierro de Visvil (Provincia de Catamarca). Informe Minero*. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología; Argentina.: Servicio Geológico Minero Argentino.
- Larovere, M., Casquet, C., Aciar, R., Baldo, E., Alasino, P. y Rapela, C. (2021). Extensión del orógeno pampeano en el oeste de Argentina: Nueva evidencia de magmatismo y metamorfismo cámbrico en el cinturón Ordovícico Famatiniano revelada por nuevas edades U-Pb de SHRIMP. *Journal of South American Earth Sciences*, 109, 103222.

- Lee, P., Baillif, P., y Touray, J. (1997). Geochemical behaviour and relative mobility of metals (Mn, Cd, Zn and Pb) in recent sediments of a retention pond along the A-71 motorway in Solohne, France. *Environmental Geology* 32(2), 142-152.
- Liu, J., Wu, J., Feng, W. y Li, X. (2020). Evaluación del riesgo ecológico de metales pesados en cuerpos de agua cercanos a minas de cobre típicas en China. *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública*, 17 (12), 4315.
- Llambías, E. (1970). Geología de los Yacimientos Mineros de Agua de Dionisio, Provincia de Catamarca, República Argentina. *Revista de La Asociación Mineralogía Petrología y Sedimentología*, 3–32.
- Llambías, E. (1972). Estructura del grupo volcánico Farallón Negro, Catamarca, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 27: 161-169.
- Lottermoser B., y Ashley, P. (2006). Physical dispersion of radioactive mine waste at the rehabilitated Radium Hill uranium mine site, South Australia. *Journal of Earth Sciences*, 53, 485–499.
- Luraghi, C., y Truco, S. (2007). “Estudio de Impacto Ambiental. Exploración en vetas mineralizadas de Farallón Negro y Alto de la Blenda. Etapa de Exploración”. Informe inédito. YMAD.
- Marín Galvín, R. (2010). Características físicas, químicas y biológicas de las aguas. Córdoba: *Empresa Municipal de Aguas de Córdoba S.A. (EMACSA)*.
- Márquez-Zavalía, M., y Galliski, M. (2007). Epithermal mineralization at Cerro Atajo, Farallón Negro Volcanic Complex, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 30(3–4), 251–267.
- Marshall, L., Butler, R., Drake, R., Curtis, G., y Tedford, R. (1979). Calibration of the Great American Interchange. *Science* 204: 272-279.
- Marshall, L. y Patterson, B. (1981). Geology and geochronology of the mammal-bearing Tertiary of the valle de Santa María and río Corral Quemado, Catamarca province, Argentina. *Publication (Field Museum of Natural History)*, 1321.
- Massanet, I., Hernando Costa, J., Barba Carretero A. y Barba Solana, C. (2001). *Vermiculita en suelos desarrollados sobre gneis*. Revista de la sociedad Española de la Ciencia del suelo, Volumen 8, 9–19.
- Mc Donough, M., Ramos, V., Isachsen, C., Bowring, S., y Vujovich, G. (1993). Edades preliminares de circones del basamento de la Sierra de Pie de Palo, Sierras Pampeanas occidentales de San Juan, sus implicancias para el supercontinente proterozoico de Rodinia. *XII Congreso Geológico Argentino*. Actas 3: 340-342, Mendoza.
- Mc Laren, R., Williams, J., y Swift, R. (1983). The adsorption of copper by soil samples from Scotland at low equilibrium solution concentrations. *Geoderma*. 31:97-106.
- Méndez, J. (2003). Geología Física. Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Central de Venezuela. 206 p.
- Merea Llanos, A.C. (1980). Geología y prospección hidrogeológica de la zona sur del Campo del Arenal. Provincia de Catamarca. Revista de la Asociación Geológica

- Argentina 35(4): 453-459. Metamorphic basement of the southern Sierra de Aconquija, Eastern
- Milessi, A., Sellanes, J., y Lange, C. (2005). Material óseo esquelético y escamas de peces en sedimentos marinos bajo la zona de mínimo oxígeno frente al norte y centro de Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64 (2-3), 185-190.
- Minera Alumbreira (2016). Geología de Bajo la Alumbreira. San Fernando del valle de Catamarca, *Minera Alumbreira Ltd.* Informe Técnico.
- Miranda L., Ayoko G., Egodawatta P., Hu W., Ghidan O., y Goonetilleke A. (2021). *Adsorption-desorption behaviour of heavy metals in aquatic environments: Influence of sediment, water and metal ionic properties. Journal of Hazardous Materials*, 421:126743.
- Mirré, J. y Aceñolaza, F. (1972). El hallazgo de *Oldhamia* sp. (traza fósil) y su valor como evidencia de edad cámbrica para el supuesto Precámbrico del borde occidental del Aconquija, provincia de Catamarca. *Ameghiniana* 9: 72-78.
- Morales Santos, L. (2020). Influencia del pH, conductividad, contenido de C inorgánico, materia orgánica y de los metales Fe, Mn, Al extraíbles sobre la adsorción de fósforo en la fracción limo-arcilla de los sedimentos de las lagunas Unare y Píritu, Edo. Anzoátegui. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Morlans, M. (1995). Regiones naturales de Catamarca. Provincias geológicas y provincias fitogeográficas. *Revista de Ciencia y Técnica*, 2(2), 1-42.
- Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geological Journal*, 2, 108-118.
- Munson, S., Belnap J., y Okin, G. (2011). Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 108: 3854-3859.
- Murra, J., Casquet, C., Locati, F., Galindo, C., Baldo, E., Pankhurst, R. y Rapela, C. (2016). Geocronología de isótopos (Sr, C) y U-Pb SHRIMP de circonio de series sedimentarias portadoras de mármol en las Sierras Pampeanas Orientales, Argentina. Restringiendo el margen SO de Gondwana en Ediacara hasta los primeros tiempos del Cámbrico. *Investigación Precámbrica*, 281, 602-617.
- Muruaga, C. (1998). Estratigrafía y sedimentología del Terciario Superior de la sierra de Hualfín, entre las localidades de Villavil y San Fernando, Provincia de Catamarca. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo (Inédita), 270 p., Tucumán.
- Muruaga, C. 2001a. Estratigrafía y desarrollo tectosedimentario de sedimentos terciarios en los alrededores de la Sierra de Hualfín, borde suroriental de la Puna, Catamarca, Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 8(1): 27-50.
- Muruaga, C. 2001b. Estratigrafía del Miembro El Jarillal (Formación Chiquimil, Mioceno superior), la Sierra de Hualfín, Catamarca. *Acta Geológica Lilloana* 18(2): 265-280.
- Nicolli, H., Bundschuh, J., Blanco, M., Tujchneider, O., Panarello, H., Dapeña, C., y Rusansky, J. (2012). Arsénico y oligoelementos asociados en aguas subterráneas de

- la llanura chaco-pampeana, Argentina: resultados de 100 años de investigación. *Science of the Total Environment*, 429, 36-56.
- Nordstrom, D. (2011). "Mine Waters: Acidic to Circumneutral." *Elements*, 7(6), 393–398.
- Nordstrom, D., y Alpers, C. (1999). Geochemistry of acid mine waste. In G. S. Plumlee y M. J. Logsdon (Eds.), *Reviews in Economic Geology, The environmental geochemistry of ore deposits. Part A: Processes, techniques and health issues* (pp. 133–160).
- Norrish, K. (1972). Factors in the Weathering of Mica to Vermiculite. Madrid: *Congreso Internacional de Arcilla*.
- Palacio, M., Chernicoff, C. y Godeas, M. (2005). La estructura caldéica Vis-Vis asociada al volcanismo Mioceno del distrito minero Farallón Negro, provincia de Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60, 609-612.
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Yigini, Y., y Montanarella, L. (2013). Contaminated Sites in Europe: Review of the Current Situation Based on Data Collected through a European Network. *Journal of Environmental and Public Health*, 2013, 1–11.
- Pankhurst, R., Rapela, C., Fanning, C. (2000). Age and origin of coeval TTG, I-and S-type granites in the Famatinian belt of NW Argentina. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences* 91: 151-168.
- Pantorrilla, A. (1995). Estudio Mineralógico y Metalogenético del Complejo Vetiforme Alto de la Blenda, su aplicación en el beneficio de los elementos oro y plata. Distrito Hualfín-departamento Belén, Catamarca. Tesis Doctoral, *Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán* (inérita) 366 p., Tucumán.
- Penck, W. (1920). *El límite sur de la Puna de Atacama (NO de Argentina): una contribución al conocimiento del tipo de montaña andino y a la cuestión de la formación montañosa (N.º 1)*.
- Peña-Monné, J., y Sampietro-Vattuone, M. (2018). Fluvial and aeolian dynamics of the Santa María River in the Cafayate depression (Salta Province, NW Argentina). *Journal of Maps*, 14(2), 567-575.
- Peralta, E. (1999). Distrito aurífero de Cerro Atajo, Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina. (Ed.): E.Zappettini. SEGEMAR. Anales 35: 1653-1657. Buenos Aires.
- Peralta Moreno, G. (2019). Efecto de diferentes dosis de material calcáreo sobre el ph y acidez intercambiable en suelos ácidos de textura arcillosa y arenosa en los distritos de Hernandarias y Nueva Italia. *San Lorenzo: Universidad Nacional de Asunción*.
- Pérez-Rojas, A., Torres-Orozco, R., Morales-Gutiérrez, E., y Pérez-Méndez, E. (2000). Textura, composición y contenido de materia orgánica de los sedimentos recientes de un lago tropical de México. *Hidrobiológica*, 10(1), 41-50.
- Proffett, J. (2003). Geology of the Bajo de la Alumbra Porphyry Copper-Gold Deposit, Argentina. *Economic Geology* 98: 1535 1574.

- Powell, J., Mulé, P., Duarte, R., Ortiz, P., Sanagua, J., Muruaga, C. (1998). Mamíferos de la Formación Chi quimil (Mioceno superior) de la vertiente occidental de la sierra de Hualfin, provincia de Catamarca. XI Jornadas Argentinas de Paleontología de Vertebrados. *Acta Geológica Lilloana* 18(1): p. 178. San Miguel de Tucumán.
- Rahi, D., Chandak, R. y Vishwakarma, A. (2024). Evaluación de la fluctuación estacional de la contaminación por metales pesados en sedimentos y aguas superficiales del río Narmada, India. *Revista de Agua y Cambio Climático*, 15 (7), 3173-3189.
- Ramos, V., Vujovich, G., Kay, S., Y McDonough, M. (1993). La orogénesis de Grenville en las Sierras Pampeanas Occidentales: la Sierra de Pie de Palo y su integración al supercontinente proterozoico. *12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*. Actas 3: 343-357, Buenos Aires.
- Ramos, V. (1999). Las provincias geológicas del territorio argentino. En Caminos, R. (Ed.): Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. *Servicio Geológico Minero Argentino. Anales* 29: 41-96. Buenos Aires.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Fanning, C.M., Galindo, C., Baldo, E.G. 2005. Datación U-Pb SHRIMP de circones detríticos en parafibrolitas neo proterozoicas de la secuencia Difunta Correa (Sierras Pampeanas Occidentales, Argentina). *Geogaceta* 38: 227-230.
- Riggs, E. y Patterson, B. (1939). Stratigraphy of late Miocene and Pliocene deposits of the Province of Catamarca (Argentina). *Physis* 14: 143-162. Buenos Aires.
- Rivera Uria, M., Romero, F., Sedov, S., y Solleiro Rebolledo, E. (2020). Carbonatos pedogénicos para el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM). Experimentos de laboratorio. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, p. 72.
- Rodríguez, M., y Bechara, J. (2005). "Composición físico-química del agua y los sedimentos en ríos de montaña". *Revista de Biología Tropical*, 53(3-4), 369-379.
- Romans, B., Castelltort, S., Covault, J., Fildani, A., y Walsh, J. (2016). Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales. *Earth-Science Reviews*, 153, 7-29.
- Romero F., Armienta M., y Carrillo R. (2004). Arsenic sorption by carbonate-rich aquifer material, a control on arsenic mobility at Zimapán, México. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 47 (1), 1-13.
- Romero, F., Núñez, L., Gutiérrez, M., Armienta, M., y Cenicerros-Gómez, A., (2011). Evaluation of the potential of indigenous calcareous shale for neutralization and removal of arsenic and heavy metals from acid mine drainage in the Taxco mining area, Mexico: *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 60(2), 191-203.
- Romero Guadarrama, J. (2011). *Geoquímica de As, Hg, Pb y Zn y mineralogía en sedimentos superficiales de la cuenca de drenaje del distrito minero El Triunfo, B.C.S.*, Tesis de maestría, México.
- Rossi, J., Toselli, A., Saavedra, J., Sial, A., Pellitero, E., Ferreira, V. 2002. Common Crustal Source for Contrasting Peraluminous Facies in the Early Paleozoic Capillitas Batholith, NW Argentina. *Gondwana Research* 5(2): 325-337.

- Rovira, J. (1993). Estudio de la contaminación por metales pesados del Río Jarama. *Madrid: Tesis Doctoral*.
- Rubiolo, D.G, Poma, E., Quenardele, S., Cuchi, R., Bossi, G., Georgieff, S., Muruaga, C. y otros (2004). Memoria Hoja geológica 2766-III Belén, versión preliminar. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:250.000. Secretaría de Minería. Servicio Geológico Minero Argentino (inédito). Buenos Aires.
- Ruiz Huidobro, O.J. 1972. Descripción Geológica de la Hoja 11 e, Santa María, provincias de Catamarca y Tucumán. Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Escala 1:200.000. Servicio Nacional Minero Geológico, Boletín N° 134, 90 pp. Buenos Aires.
- Ruiz Huidobro, O.J. 1975. Descripción Geológica de la Hoja 12 c, Laguna Helada. Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Escala 1:200.000. Provincia de Catamarca. Subsecretaría de Minería, Servicio Geológico Nacional, Boletín N° 146, 68 pp. Buenos Aires.
- Salminen, R., Batista, M., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., y Tarvainen, T. (2005). *Geochemical Atlas of Europe: Part 1 – Background Information, Methodology and Maps*. Espoo: Geological Survey of Finland.
- Sánchez-Díaz J., López-Cardona J., Prada-Pedrerros S., et al. (2020). Assessment of trace element pollution and ecological risks in sediments of the San Jorge River, Colombia. Springer.
- Sasso, A. (1997). Geological evolution and metallogenic relationships of the Farallon Negro volcanic complex, NW Argentina. PhD thesis, Kingston, *Queen's University* (inédita), 842 p., Kingston.
- Sasso, A., Clark, A., y Farrar, E. (1995). Tectonic controls on scale of upper Miocene porphyry Cu-Au mineralization centers 250 km to the east of coeval mineralization in the Chilean Andes. In Clark, A.H. (ed.) *Giant Ore Deposits II: Controls on the Scale of Orogenic Magmatic-Hydrothermal Mineralization, Proceedings of the Second Giant Ore Deposits Workshop, Queen's University* 1:101-111, Ontario.
- Sasso, A., y Clark, A. (1998). The Farallón Negro group, NW Argentina: magmatic, hydrothermal and tectonic evolution and implication for Cu-Au metallogeny in the Andean Back-arc. *SEG Newsletter* 34:1, 8-18 p.
- Schumm, S. (1977). *The Fluvial System*. John Wiley, New York. 388pp.
- Schlesinger, W., Reynolds, J., Cunningham, G., Huenneke, L., Jarrell, W., Virginia, R., y Whitford, W. (1990). Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 247(4946), 1043-1048.
- Secretaría de Minería de Catamarca, (2001). Informe Monitoreo Proyecto PASMA - UNCa Sedimentos de Corrientes Vis Vis - Candado. San Fernando del valle: *Secretaría de Minería Catamarca, Dirección de Minería*.
- Seggiaro, R., Da Poian, G., Becchio, R., Galli, C.I., Arnosio, M., Caffè, P. 2011. Tectónica andina en las Sierras Pampeanas Noroccidentales, Provincia de Catamarca. XVIII Congreso Geológico Argentino (Neuquén), Actas 1: 856-857.

- Seggiaro, R., Caffè, P., Becchio, R., Galli, C., Amosio, M., y Da Poián, G. (2014). Evolución tectónica andina entre las sierras de Hualfín, Capillitas y extremo sur de Aconquija, provincia de Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71(4), 500-512.
- Senten, R. (1989). Pollution of Harbour Sediments by Heavy Metals. *Ocean and Shoreline Management*.
- Sharma, K., Vangani, N., Menenti, M., Huygen, J., y Vich, A. (1994). Spatiotemporal variability of sediment transport in arid regions. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 224, 251-258.
- Shrivastava, A., Ghosh, D., Dash, A. y Bose, S. (2015). Contaminación por arsénico en suelos y sedimentos de la India: fuentes, efectos y remediación. *Current Pollution Reports*, 1, 35-46.
- Sillitoe, R. (2003). *Porphyry copper systems*. *Economic Geology*, 98(3), 451-465.
- Smedley, P., y Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568.
- Sobel, E. y Strecker, M. (2003). Uplift, exhumation and precipitation: tectonic and climatic control of Late Cenozoic landscape evolution in the northern Sierras Pampeanas, Argentina. *Basin Research* 15: 431-451.
- Sosic, M. (1973). Descripción geológica de la Hoja 14e, Salar de Pipanaco, Provincias de Catamarca y La Rioja. Subsecretaría de Minería, Servicio Nacional Minero Geológico, Boletín N° 137, 61 pp. Buenos Aires.
- Sposito, G. (1989). *The chemistry of soils*. Oxford University Press.
- Stipanovic, P.N. y Linares, E. (1975). Catálogo de edades radiométricas determinadas para la República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial, Serie B (Didáctica y Complementaria) N° 3*. Buenos Aires.
- Strecker, M.R. (1987). Nuevos datos geotectónicos sobre las Sierras Pampeanas Septentrionales (26°-27°S), República Argentina. X Congreso Geológico Argentino (San Miguel de Tucumán), Actas I: 231-234.
- Stumm, W., y Morgan, J. (1996). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- Summer, M. y Miller W. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. Chapter 40. Pp1201-1229 In: JM Bartels (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA and ASA. Madison, WI.
- Syvitski, J. (2003). Supply and flux of sediment along hydrological pathways: research for the 21st century. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 1-11.
- Toselli, A.J. (1992). El Magmatismo del Noroeste Argentina: Reseña Sistemática e Interpretación. Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica N° 8, 243 pp.
- Toselli, A.J., Sial, A.N., Saavedra, J., Rossi de Toselli, J.N., Ferreira, V.P. (1996). The Famatinian peraluminous Capillitas batholith, Argentina; genesis by collision-related

- crustal anatexis. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos (Buenos Aires), Actas 5: 463.
- Toselli, A., Aceñolaza, G., Miller, H., Adams, C., Aceñolaza, F., y Rossi, J. (2012). Basin evolution of the margin of Gondwana at the Neoproterozoic/Cambrian transition: the Puncoviscana Formation of Northwest Argentina.
- Touceda-González, M., Alvarez-López, C., Prieto-Fernández, A., Rodríguez-Garrido, B., Trasar-Cepeda, C., Mench, M., Puschenreiter, M., Quintela-Sabaris, C., Macías-García, F., y Kidd, P. (2017). Aided phytostabilisation reduces metal toxicity, improves soil fertility and enhances microbial activity in Cu-rich mine tailings. *Journal of Environmental Management*, 186, 301–313.
- Turner, J.C.M., (1962). Estratigrafía de la región al naciente de la Laguna Blanca, Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 7(1-2): 11-46.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA), (1998). Permeable reactive barrier technologies for contaminant remediation: Washington DC, U. S. *Environmental Protection Agency*, 102 p.
- Varela, R. y Dalla Salda, L. (1993). Geocronología Rb-Sr de metamorfitas y granitoides del tercio sur de la sierra de Pie de Palo, San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 47: 271-276, Buenos Aires.
- Vázquez, M., Sastre, A., y Colombo, R. (2006). Composición química de aguas termales de los Baños de Vis Vis (Catamarca, Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(2), 294–302.
- Viruel, M. (1973). Geología de la región comprendida entre los ríos Visvis y Jaci Yaco. Plan NOA I Geológico Minero. *Seminario. Universidad Nacional de Tucumán*, (inédito), 87 p., Tucumán.
- Wen, C., Li, Q., Zhu, D., Zhong, M., Zhu, S., Xu, H., ... y Luo, X. (2024). Biofilm-mediated heavy metal bioaccumulation and trophic transfer in a mining-contaminated river. *Water Research*, 267, 122487.
- Wetzel, R. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.
- Winter, J. (2014). Metamorphic Reactions. In *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (p. 595). *Inglatera: British Library*.
- Yana Neira, E. (2014). Contaminación por materia orgánica en el río Torococha de la ciudad de Juliaca. Tesis de grado. Universidad Nacional del Altiplano Facultad de Ciencias Biológicas.
- Yaciuk, P., Colombo, F., y Lecomte, K. (2021). Fosfatos de las vetas La Argentina y La Rosario (Mina Capillitas), Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*; 375-389.
- Younger, P. (2001). "Mine Water Pollution: The Remarkable Recovery of the Rivers in the Former Coalfields of North-East England." *Science of the Total Environment*, 265(1–3), 171–192.

7.3. ANEXOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en laboratorio, los cuales fueron representados mediante diagramas de barras elaborados con el software de análisis estadístico InfoStat. También se incluyen los resultados de la determinación mineralógica realizada con el software libre Profex 5.4. Además, se muestra la Tabla realizada para el cálculo del balance iónico, junto con los distintos diagramas hidroquímicos correspondientes a los sitios de muestreo, obtenidos a través del software Diagrammes. Finalmente, se incorpora la cartografía elaborada para complementar.

Tabla 8. Resultados obtenidos en laboratorio para las muestras analizadas.

Muestra	pH	Conductividad (mS/cm)	Silicatos (%)	Materia orgánica (%)	Carbonatos (%)	CIC (meq /100g)
DS1	8,44	0,455	78,371	3,389	7,172	3,298
DS1	8,24	0,444	79,361	2,831	5,663	2,759
DS1	7,98	0,588	79,973	3,880	4,352	3,826
QLB	8,11	0,363	27,286	5,727	69,850	3,167
QLB	8,52	0,391	17,638	5,962	79,454	1,458
QLB	8,09	0,485	26,799	6,586	70,144	3,969
DS4	8,71	0,55	65,974	4,504	20,888	4,187
DS4	8,42	0,686	60,848	4,023	15,559	3,767
DS4	8,7	0,422	74,092	4,570	9,641	4,439
DS5	8,31	0,408	78,971	3,260	9,662	3,138
DS5	8,15	1,463	66,261	4,205	13,286	4,005
DS5	8,29	0,706	72,235	4,026	15,023	3,818
DS6	8,04	0,615	69,682	2,658	17,452	2,408
DS6	8,21	0,37	76,696	4,095	9,852	3,966
DS6	8,38	0,534	68,915	5,840	17,672	5,583
DS7D	8,31	0,546	71,417	5,149	14,435	4,947
DS7D	8,12	0,596	66,082	4,218	21,698	3,890
DS7D	8,32	0,401	67,640	3,614	22,804	3,277
DS7E	8,18	0,376	76,368	4,974	8,899	4,858
DS7E	8,27	0,478	64,752	4,774	12,732	4,577
DS7E	8,35	0,413	76,619	5,657	7,945	5,553
DS8	8,25	0,707	56,528	4,050	30,679	3,507
DS8	8,26	0,677	59,801	4,361	30,630	3,849
DS8	8,32	0,343	67,777	3,562	20,941	3,253
SC	7,96	0,421	75,452	6,860	5,426	6,788
SC	7,82	0,639	73,451	6,058	5,246	5,986
SC	7,86	0,229	80,728	4,452	3,371	4,410

Tabla 9. Cálculo del C_n para el Índice de geoacumulación (I_{geo}).

Metal	C_n (ppm)							
	DS1	QLB	DS4	DS5	DS6	DS7D	DS7E	DS8
As	17,6	7,3	14,1	18,1	11,3	14,20	13,80	12,60
Cr	45,4	40,4	41,8	45,6	37,4	59,30	44,90	74,20
Cu	194,2	104,7	85,7	132,5	127,1	146,6	70,5	113,1
Zn	372	219,9	172,8	181,8	144,3	104,40	330,60	110,50

Tabla 10. Cálculo del B_n para el Índice de geoacumulación (I_{geo}).

Metal	B_n (ppm)							
	4542	4786	27881	4702	27853	12935	12938	
As	8,4	10,7	6,4	4,7	6,4	9,80	7,80	
Cr	29	35	36	26	49	45,00	40,00	
Cu	19,1	14,9	13,3	13,2	16,3	22	16,8	
Zn	60	40	30	60	40	30,00	40,00	

Tabla 11. Cálculo del *logaritmo binario* para el Índice de geoacumulación (I_{geo}).

Metal	Log_2							
	DS1	QLB	DS4	DS5	DS6	DS7D	DS7E	DS8
As	0,48	-1,14	0,55	1,36	0,68	0,56	-0,09	0,11
Cr	0,06	-0,38	-0,37	0,23	-0,06	-0,31	-0,59	0,31
Cu	2,76	2,23	2,10	2,74	2,68	2,58	1,10	2,17
Zn	2,05	1,87	1,94	1,01	0,68	0,80	2,88	0,88

Tabla 12. Cálculo del C'_s para el Riesgo ecológico potencial (Er) e índice de riesgo ecológico potencial (RI).

Metal	C'_s (ppm)							
	DS1	QLB	DS4	DS5	DS6	DS7D	DS7E	DS8
As	17,6	7,3	14,1	18,1	11,3	14,20	13,80	12,60
Cr	45,4	40,4	41,8	45,6	37,4	59,30	44,90	74,20
Cu	194,2	104,7	85,7	132,5	127,1	146,6	70,5	113,1
Zn	372	219,9	172,8	181,8	144,3	104,40	330,60	110,50

Tabla 13. Cálculo del C'_n para el Riesgo ecológico potencial (Er) e índice de riesgo ecológico potencial (RI).

Metal	C'_n (ppm)							
	4542	4786	27881	4702	27853	12935	12938	
As	8,4	10,7	6,4	4,7	6,4	9,80	7,80	
Cr	29	35	36	26	49	45,00	40,00	
Cu	19,1	14,9	13,3	13,2	16,3	22	16,8	
Zn	60	40	30	60	40	30,00	40,00	

Tabla 14. Cálculo del C_f para el Riesgo ecológico potencial (Er) e índice de riesgo ecológico potencial (RI).

C_f	Muestras							
	DS1	QLB	DS4	DS5	DS6	DS7D	DS7E	DS8
As	2,10	0,68	2,20	3,85	2,40	2,22	1,41	1,62
Cr	1,57	1,15	1,16	1,75	1,44	1,21	1,00	1,86
Cu	10,17	7,03	6,44	10,04	9,63	8,99	3,20	6,73
Zn	6,20	5,50	5,76	3,03	2,41	2,61	11,02	2,76

Tabla 15. Cálculo del Riesgo ecológico potencial (Er) para el índice de riesgo ecológico potencial (RI).

Er	Muestras							
	DS1	QLB	DS4	DS5	DS6	DS7D	DS7E	DS8
As	20,95	6,82	22,03	38,51	24,04	22,19	14,08	16,15
Cr	3,13	2,31	2,32	3,51	2,88	2,42	2,00	3,71
Cu	50,84	35,13	32,22	50,19	48,14	44,97	16,02	33,66
Zn	6,20	5,50	5,76	3,03	2,41	2,61	11,02	2,76

Tabla 16. Valores de aniones y cationes para el cálculo del balance iónico.

Sitio	ANIONES				CATIONES			
	Cl	SO4	Nitratos	HCO3-	Na	Mg	K	Ca
mg/L								
DS1	172	695	8	194	316,60	40,00	18,80	114,20
DS5	179,00	709	8	190	313,10	52,40	19,90	113,30
DS6	147	549	8	211	282,20	36,70	14,60	90,90
QLB	242,00	495	10	112	159,50	47,90	4,60	175,60
DS1	184,20	690	1	237	349,00	42,40	20,80	123,00
DS5	173,9	715	3	225	300,00	56,70	19,50	123,00
DS6	147	576	4	246	295,00	38,20	15,30	105,00
DS8	107,60	414	2	155	195,00	43,00	10,30	52,60
QLB	211,1	435	7	147	143,00	46,40	3,10	183,00
DS1	168	593	5	313	294,00	37,00	18,90	114,00
DS4	154	889	0	260	189,00	171,80	13,80	95,10
DS5	163	642	3	284	281,00	57,40	18,70	107,00
DS6	128	518	6	281	278,00	32,50	15,40	84,40
DS7D	118	494	2	240	248,00	41,70	15,10	90,70
DS7E	65	189	1	202	116,00	35,90	8,52	52,60
DS8	101	379	1	229	209,00	39,80	13,20	78,90
QLB	241	518	3	208	170,00	48,00	3,80	196,00
DS1	219,9	656,3	8,6	350,2	379,50	36,70	19,30	106,80
DS4	193,8	1010	0	274	219,60	234,60	12,90	101,70
DS5	203,6	777,9	8,4	311,4	311,30	93,20	18,40	99,30
DS6	138,2	503,4	8,4	311	275,4	39,60	15,20	93,30
DS7D	147,6	567,9	8,3	242,9	262,80	48,10	14,30	67,40
DS7E	62,6	161	0	172	98,90	30,70	6,40	38,20
DS8	88,2	289,9	0	251,2	153,50	37,50	9,50	52,60
DS1	-	-	-	-	461,43	42,80	27,40	113,20
DS4	-	-	-	-	250,72	275,60	15,40	97,10
DS5	-	-	-	-	360,19	74,30	21,70	108,50
DS6	-	-	-	-	274,38	38,90	15,90	76,40
DS7D	-	-	-	-	284,19	52,20	16,30	79,80
DS7E	-	-	-	-	114,22	38,90	7,70	52,40
DS8	-	-	-	-	244,32	48,80	13,70	79,50

Aporte a la evaluación del riesgo ambiental a partir de la caracterización química y mineralógica de sedimentos del Río Vis Vis-Amanao, Catamarca.

Tabla 17. Cálculo del balance iónico

BALANCE DE MASAS											
Sitios	Cl	SO4	NO3	HCO3-	Na	Mg	K	Ca	Σ aniones	Σ cationes	Error (%)
	meq/L										
PM/ Carga	35,5	96	62	61	23	24,3	39	40			
valencia	1	2	1	1	1	2	1	2			
DS1	4,85	14,48	0,13	3,18	13,77	3,29	0,48	5,71	22,63	23,25	1,34
DS5	5,04	14,77	0,13	3,11	13,61	4,31	0,51	5,67	23,06	24,1	2,21
DS6	4,14	11,44	0,13	3,46	12,27	3,02	0,37	4,55	19,17	20,21	2,65
QLB	6,82	10,31	0,16	1,84	6,93	3,94	0,12	8,78	19,13	19,78	1,67
DS1	5,19	14,38	0,02	3,89	15,17	3,49	0,53	6,15	23,47	25,35	3,86
DS5	4,9	14,9	0,05	3,69	13,04	4,67	0,5	6,15	23,53	24,36	1,73
DS6	4,14	12	0,06	4,03	12,83	3,14	0,39	5,25	20,24	21,61	3,28
DS8	3,03	8,63	0,03	2,54	8,48	3,54	0,26	2,63	14,23	14,91	2,34
QLB	5,95	9,06	0,11	2,41	6,22	3,82	0,08	9,15	17,53	19,27	4,71
DS1	4,73	12,35	0,08	5,13	12,78	3,05	0,48	5,7	22,3	22,01	-0,65
DS4	4,34	18,52	0	4,26	8,22	14,14	0,35	4,76	27,12	27,47	0,63
DS5	4,59	13,38	0,05	4,66	12,22	4,72	0,48	5,35	22,67	22,77	0,22
DS6	3,61	10,79	0,1	4,61	12,09	2,67	0,39	4,22	19,1	19,38	0,72
DS7D	3,32	10,29	0,03	3,93	10,78	3,43	0,39	4,54	17,58	19,14	4,23
DS7E	1,83	3,94	0,02	3,31	5,04	2,95	0,22	2,63	9,1	10,85	8,78
DS8	2,85	7,9	0,02	3,75	9,09	3,28	0,34	3,95	14,51	16,65	6,85
QLB	6,79	10,79	0,05	3,41	7,39	3,95	0,1	9,8	21,04	21,24	0,47
DS1	6,19	13,67	0,14	5,74	16,5	3,02	0,49	5,34	25,75	25,36	-0,77
DS4	5,46	21,04	0	4,49	9,55	19,31	0,33	5,09	30,99	34,27	5,03
DS5	5,74	16,21	0,14	5,1	13,53	7,67	0,47	4,97	27,18	26,64	-1
DS6	3,89	10,49	0,14	5,1	11,97	3,26	0,39	4,67	19,61	20,29	1,69
DS7D	4,16	11,83	0,13	3,98	11,43	3,96	0,37	3,37	20,1	19,12	-2,51
DS7E	1,76	3,35	0	2,82	4,3	2,53	0,16	1,91	7,94	8,9	5,72
DS8	2,48	6,04	0	4,12	6,67	3,09	0,24	2,63	12,64	12,63	-0,03
DS1	-	-	-	-	20,06	3,52	0,7	5,66	0	29,95	-
DS4	-	-	-	-	10,9	22,68	0,39	4,86	0	38,83	-
DS5	-	-	-	-	15,66	6,12	0,56	5,43	0	27,76	-
DS6	-	-	-	-	11,93	3,2	0,41	3,82	0	19,36	-
DS7D	-	-	-	-	12,36	4,3	0,42	3,99	0	21,06	-
DS7E	-	-	-	-	4,97	3,2	0,2	2,62	0	10,99	-
DS8	-	-	-	-	10,62	4,02	0,35	3,98	0	18,97	-

Diagrama de Piper - DS1

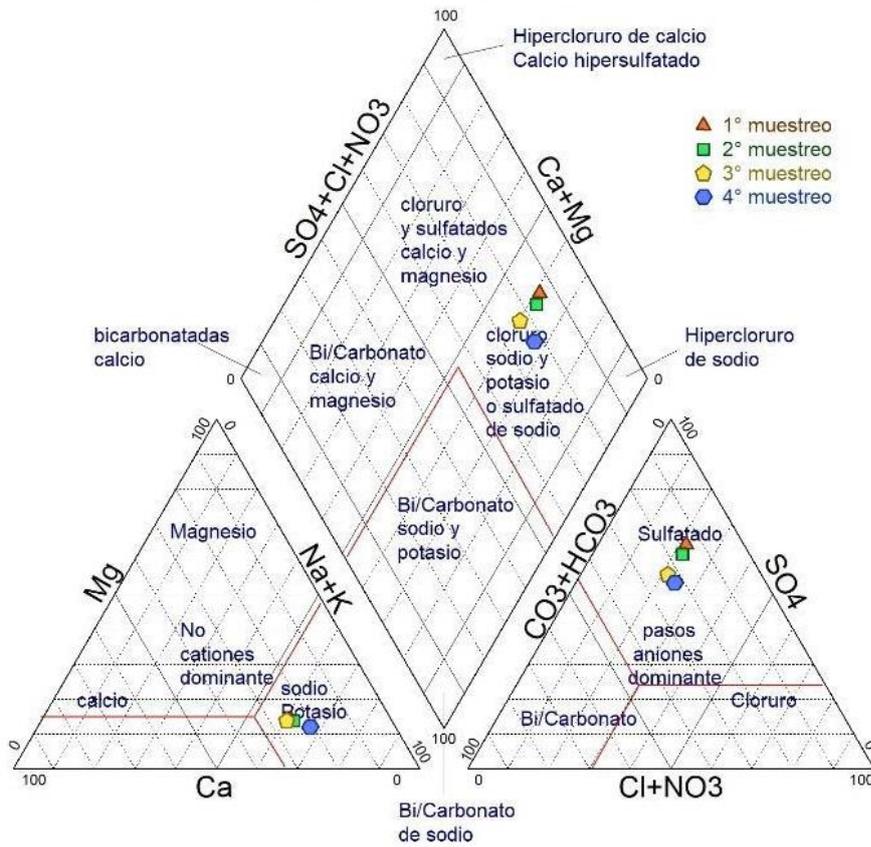


Figura 28. Diagrama de Piper correspondiente al sitio de muestreo DS1.

Diagrama Stiff - DS1

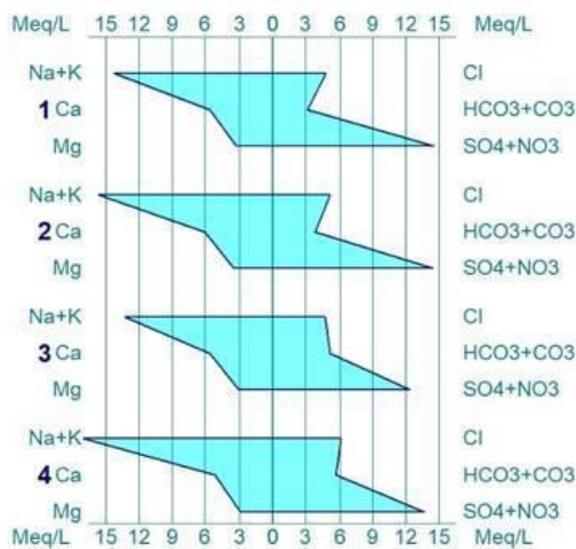


Figura 29. Diagrama de Stiff correspondiente al sitio de muestreo DS1.

Diagrama de Piper - DS4

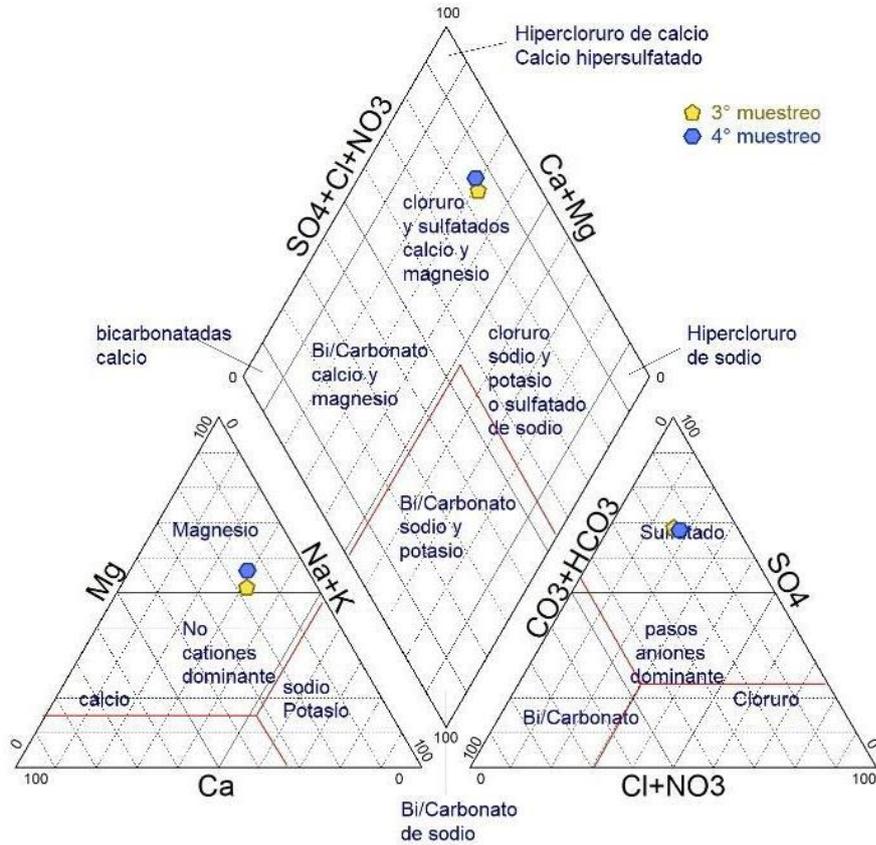


Figura 30. Diagrama de Piper correspondiente al sitio de muestreo DS4.

Diagrama Stiff - DS4

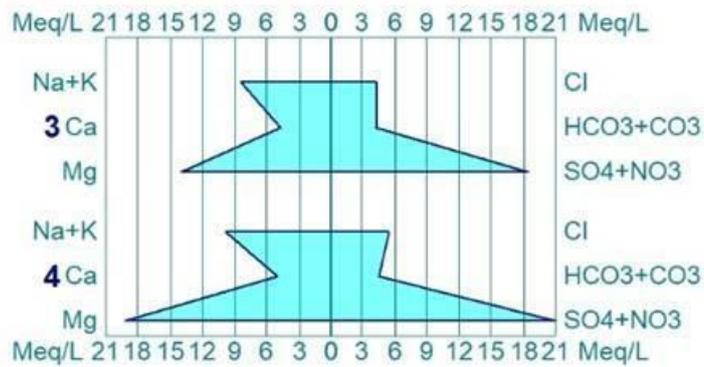


Figura 31. Diagrama de Stiff correspondiente al sitio de muestreo DS4.

Diagrama de Piper - DS5

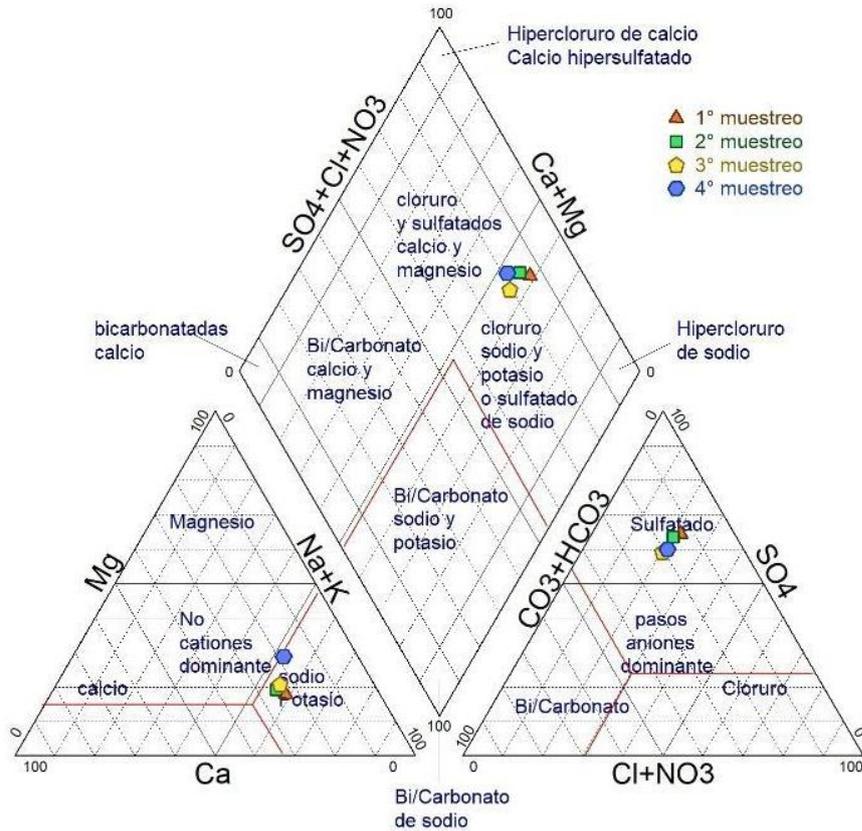


Figura 32. Diagrama de Piper correspondiente al sitio de muestreo DS5.

Diagrama Stiff - DS5

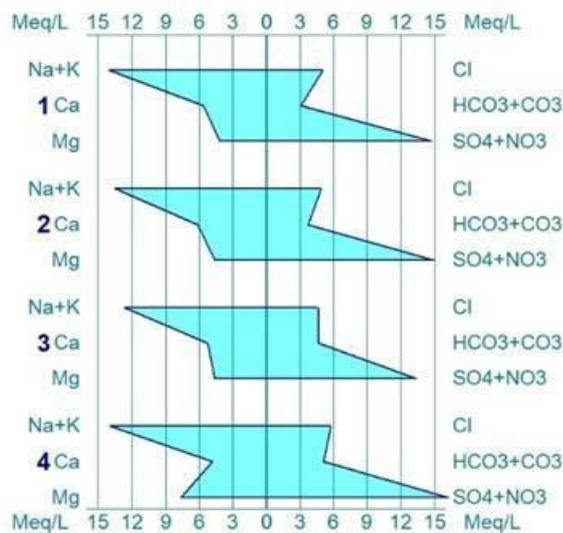


Figura 33. Diagrama de Stiff correspondiente al sitio de muestreo DS5.

Diagrama de Piper - DS6

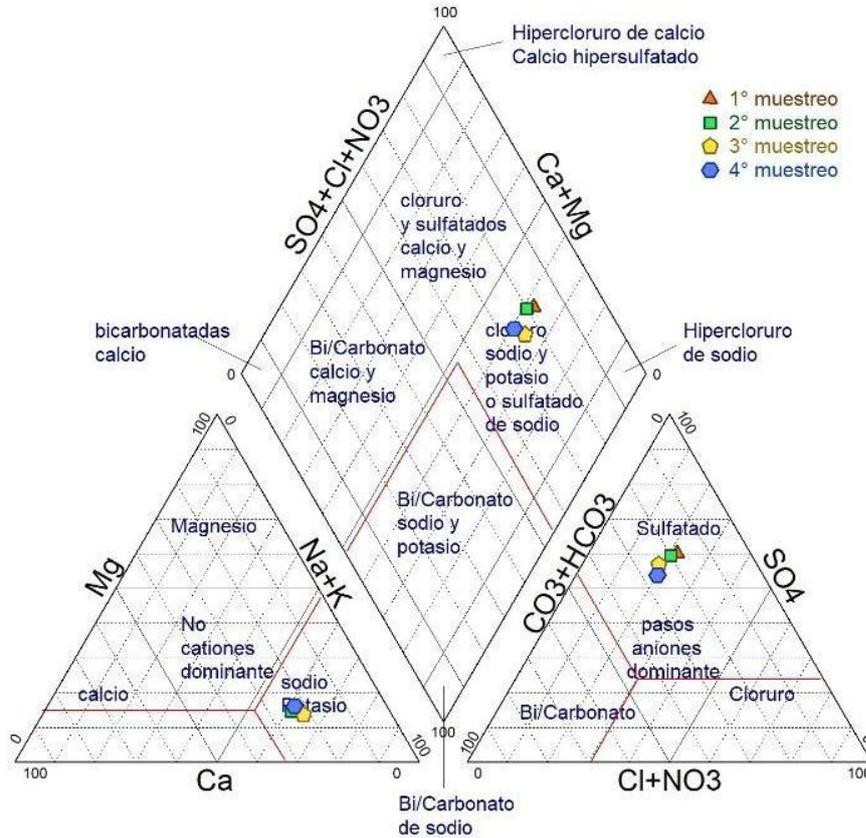


Figura 34. Diagrama de Piper correspondiente al sitio de muestreo DS6.

Diagrama Stiff - DS6

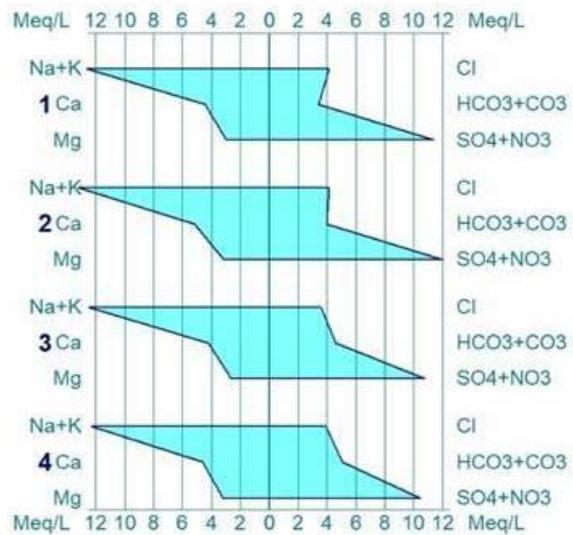


Figura 35. Diagrama de Stiff correspondiente al sitio de muestreo DS6.

Diagrama de Piper - DS7E

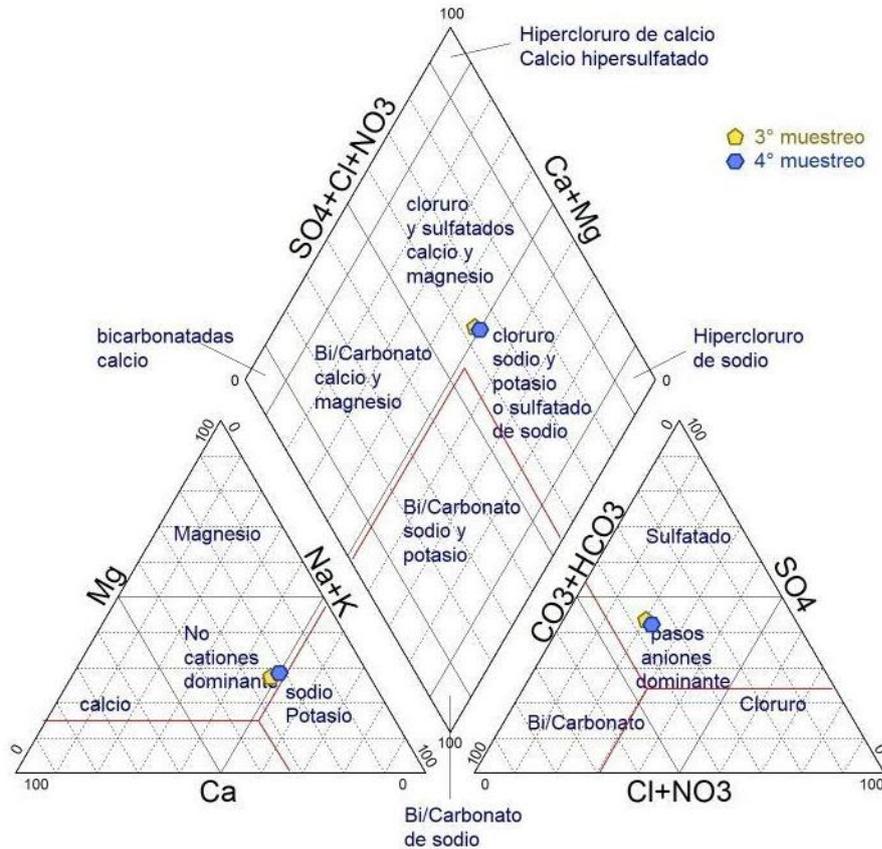


Figura 38. Diagrama de Piper correspondiente al sitio de muestreo DS7E.

Diagrama Stiff - DS7E

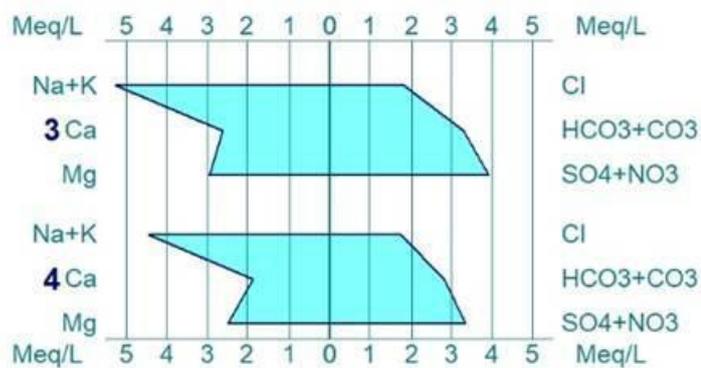


Figura 39. Diagrama de Stiff correspondiente al sitio de muestreo DS7E.

Diagrama de Piper - DS8

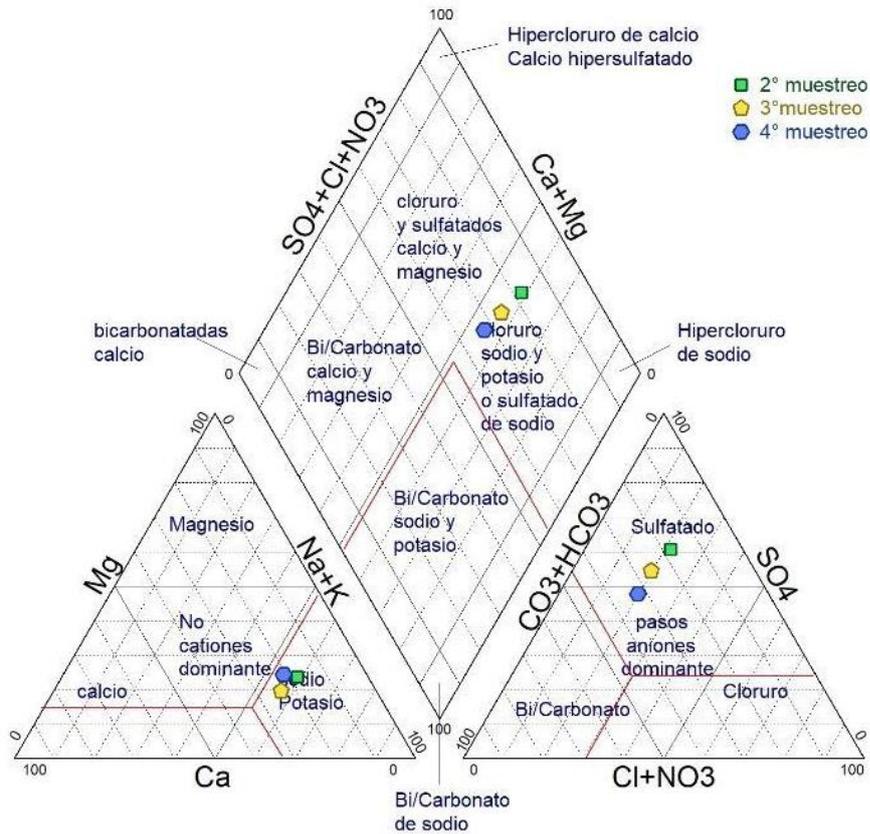


Figura 40. Diagrama de Piper correspondiente al sitio de muestreo DS8.

Diagrama Stiff - DS8

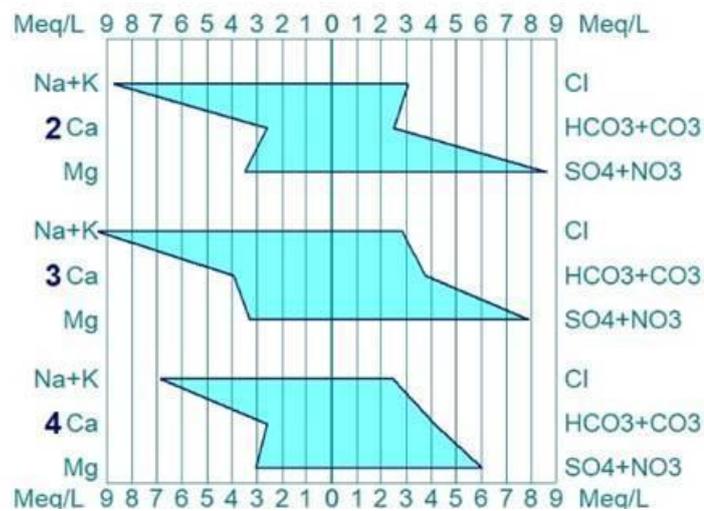


Figura 41. Diagrama de Stiff correspondiente al sitio de muestreo DS8.

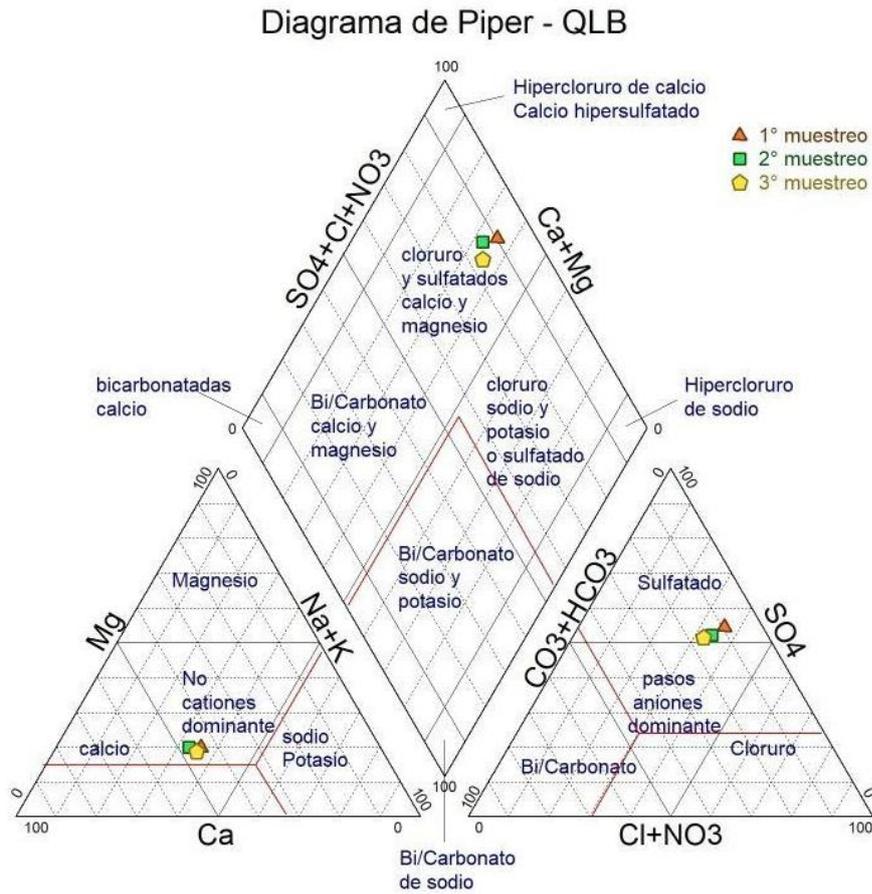


Figura 42. Diagrama de Piper correspondiente al sitio de muestreo QLB.

Diagrama Stiff - QLB

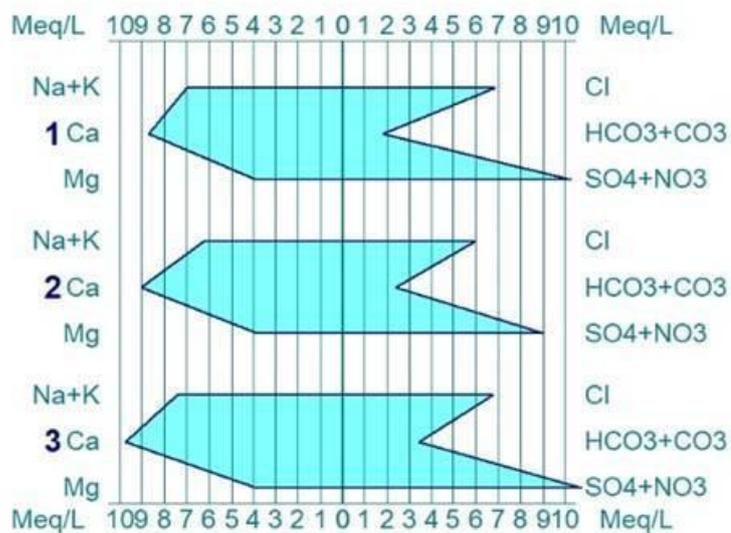


Figura 43. Diagrama de Stiff correspondiente al sitio de muestreo QLB.

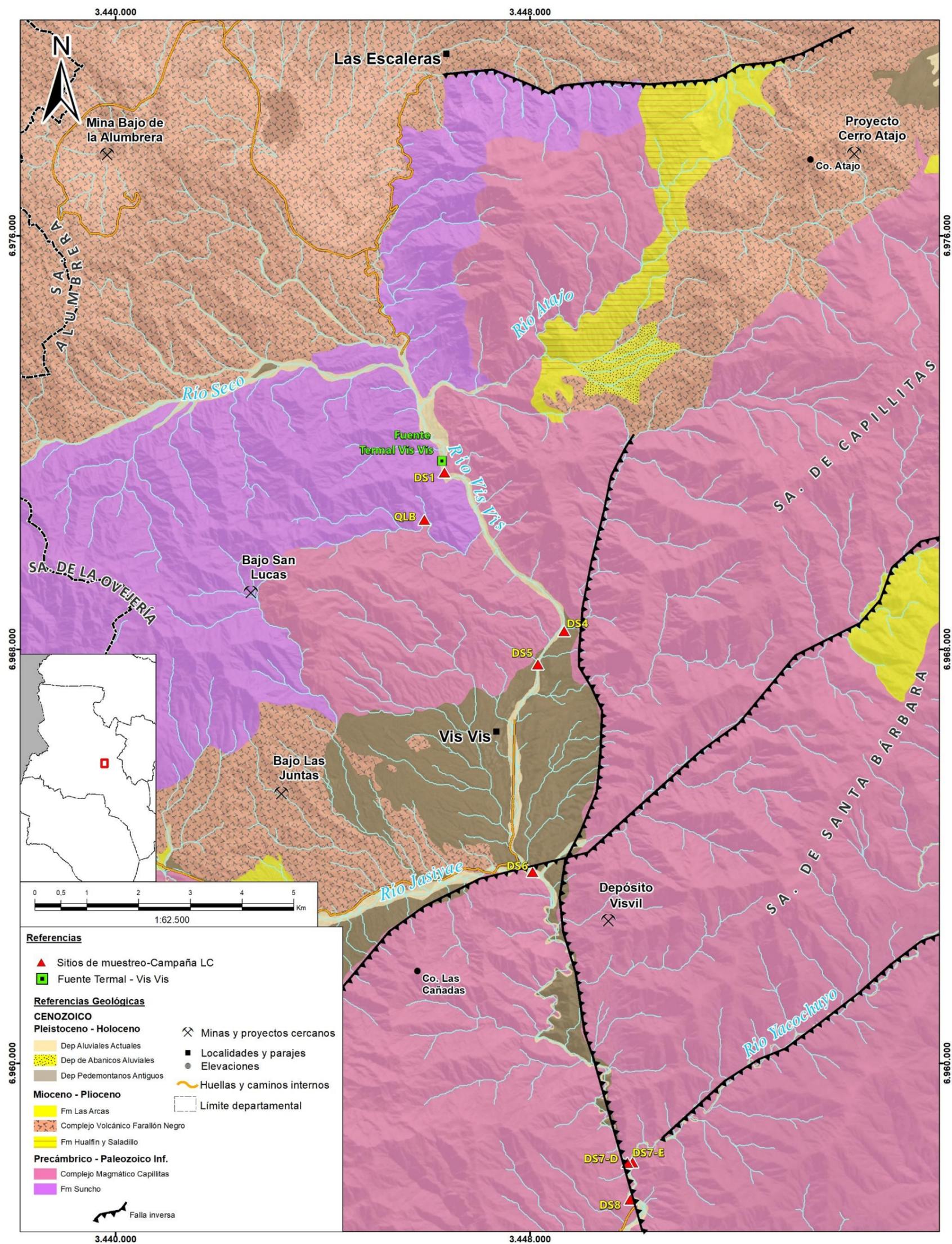


Figura 44. Mapa de detalle, geológico-estructural de la zona de estudio.

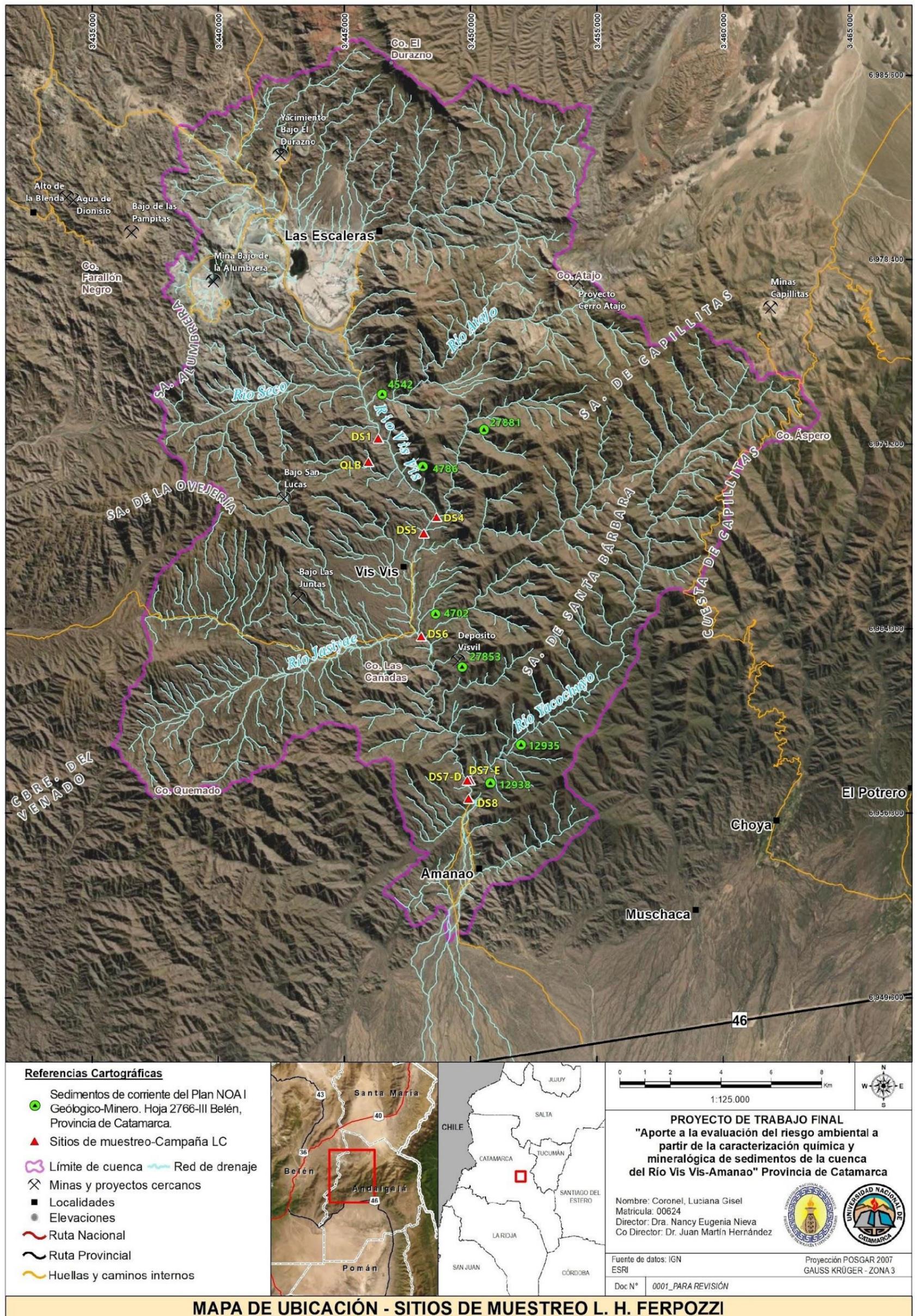


Figura 45. Mapa de ubicación de los sitios de muestreo para el cálculo de Igeo, ER y RI.

