

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, INGENIERÍA AMBIENTAL, INGENIERÍA
DE ALIMENTOS, INGENIERÍA PETROQUÍMICA E INGENIERÍA EN
BIOTECNOLOGIA Y BIOPROCESOS



TRABAJO DIRIGIDO

ALTERACIONES EN LA GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL DEL CAUCE NATURAL
DEL RÍO COROICO (TRAMO CARANAVI - GUANAY) COMO EFECTO DE LA
MINERÍA ALUVIAL AURÍFERA

PASTORAL SOCIAL CARITAS COROICO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

POSTULANTE: UNIV. JHOSELYN ALONDRA PIJUAN VISCARRA

TUTOR: MSC. ING. OMAR SALINAS PRUDENCIO

COTUTOR: MSC. GERRIT JAN SCHOT

LA PAZ – BOLIVIA

Agosto, 2025

DEDICATORIA

A mi madre cuyo
esfuerzo y confianza
fueron mi mayor
motivación. Tu fe y
amor han sido luz en
mi camino durante
estos años de estudio.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Mayor de San Andrés por haberme brindado la oportunidad de formarme profesionalmente en sus aulas, convirtiéndose en el espacio donde crecí tanto académica como personalmente

A todos los docentes que fueron parte de mi proceso de formación. Cada uno de ustedes dejó una huella significativa en mi camino, transmitiéndome conocimientos y valores.

A Cáritas Coroico, por abrirme sus puertas y permitirme desarrollar mi proyecto en su institución. En especial, agradezco a los técnicos del proyecto “Mi cuenca, mi casa” Jan Schot, Iván Riveros y Noel Ortuño, por su valioso acompañamiento y orientación durante todo el proceso.

Al Ing. Omar Salinas, mi tutor, por su guía académica y su constante aliento. Su apoyo fue clave para continuar con firmeza y claridad.

A mi mamá, por creer en mis sueños y por permitirme hacerlos realidad. Sin su apoyo nada de esto habría sido posible y a mi familia, por su ayuda y cariño.

A Fabricio Castellón, por creer en mí, por motivarme, por brindarme su apoyo incondicional y por estar presente en todos los sentidos.

Y finalmente, a Dios, por darme la fuerza, la vida y la fe para seguir adelante y culminar este importante logro en mi vida.

ABSTRACT

Over the years, alluvial gold mining has expanded in Bolivia, particularly in the departments of Beni and La Paz. While the development of this activity brings economic benefits to various sectors of the population, it also generates significant negative impacts on both the environment and society. As this activity continues to grow, it is important to understand all aspects of its implementation in order to identify and mitigate potential long term effects.

This thesis analyzes the geomorphological alterations of the Coroico River channel specifically in the Caranavi - Guanay section caused by the expansion of alluvial gold mining. The analysis was conducted through a multitemporal study of satellite imagery over a nine-year period (2016–2024), using the Normalized Difference Water Index (NDWI).

The identified changes reflect disruptions to the river's natural course. The methodology used allowed for the identification of river segments showing geomorphological changes that coincide with the locations of active mining operations. Deforestation along the riverbanks was also observed, resulting in bank displacement. These environmental impacts are compounded by the absence of land use planning, as mining activities steadily increasing overlap with human settlements and agricultural zones.

This study provides technical evidence of the effects of gold mining on the Coroico River and proposes strengthening community based organizations through environmental monitoring committees, promoting awareness of current mining and environmental regulations, and fostering collaboration between communities and local governments.

RESUMEN

A lo largo de los años la minería aluvial de oro ha ido expandiéndose en Bolivia principalmente en los departamentos de Beni y La Paz. Si bien el desarrollo de la actividad trae beneficios económicos a diferentes sectores de la población también trae consigo diferentes impactos negativos al medio ambiente y a la sociedad, al ser una actividad que va creciendo progresivamente es importante entender todo lo que conlleva su realización para así poder identificar y hacer frente a posibles impactos a largo plazo.

El presente proyecto de grado analiza las alteraciones geomorfológicas del cauce del río Coroico, específicamente en el tramo Caranavi–Guanay, provocadas por el avance de la minería aluvial aurífera. A través del análisis multitemporal de imágenes satelitales con una data temporal de nueve años (2016–2024) y la aplicación del Índice Diferencial de agua Normalizado “NDWI” por sus siglas en inglés (Normalized Difference Water Index).

Las modificaciones identificadas reflejan un impacto en el cauce natural del río ya que mediante la metodología empleada se identificó segmentos del río que presentan cambios en su geomorfología los cuales coinciden con la ubicación de las actividades mineras en operación, también se evidenció deforestación de las márgenes del río y como consecuencia desplazamiento de riberas además de una falta de ordenamiento territorial ya que existe una superposición entre las actividades mineras que van creciendo progresivamente, los asentamientos humanos y actividades agrícolas.

El estudio aporta evidencia técnica para visibilizar los efectos del extractivismo aurífero sobre el Río Coroico y en respuesta, propone fortalecer la organización comunitaria mediante comités de vigilancia ambiental, promover el conocimiento sobre las normativas mineras y ambientales vigentes, y fomentar el trabajo articulado entre comunidades y gobiernos locales.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. GENERALIDADES | 1 |
| 1.1 Introducción | 1 |
| 1.2 Antecedentes | 3 |
| 1.3 Planteamiento del problema..... | 5 |
| 1.4 Objetivos | 6 |
| 1.4.1. Objetivo general | 6 |
| 1.4.2 Objetivos específicos..... | 6 |
| 1.5 Justificaciones | 6 |
| 1.5.1 Justificación académica..... | 6 |
| 1.5.2 Justificación ambiental..... | 7 |
| 1.5.3 Justificación social | 7 |
| 1.5.4 Justificación técnica | 7 |
| 1.6 Alcance | 7 |
| 2. MARCO TEORICO | 9 |
| 2.1 Objetivos del desarrollo sostenible | 9 |
| 2.2 Dinámica y clasificación de sistemas fluviales y cuencas hidrográficas | 9 |
| 2.2.1 Cuenca hidrográfica | 9 |
| 2.2.2 Sistema Fluvial..... | 10 |
| 2.2.3 El río como sistema dinámico | 11 |
| 2.2.4 Riberas y llanuras de inundación..... | 13 |
| 2.2.5 Geomorfología fluvial | 14 |
| 2.2.6 Alteraciones geomorfológicas en cauces | 15 |
| 2.3 Minería aluvial en Bolivia..... | 17 |
| 2.3.1 Impactos ambientales y sociales de la minería aluvial..... | 19 |
| 2.3.2 Ley de regulación de la actividad minera en Bolivia | 20 |
| 2.4 Sobre la Cuenca del Río Coroico..... | 21 |
| 2.4.1 Zonificación | 21 |
| 2.4.2 Características físicas y climáticas..... | 22 |
| 2.4.3 Uso de la tierra | 23 |
| 2.4.4 Usos del agua | 23 |

| | |
|---|----|
| 2.4.5 Conflictos por el agua | 24 |
| 2.4.6 Minería en la cuenca del Río Coroico | 24 |
| 2.4.7 Sobre Caritas Coroico y el Proyecto "Mi cuenca, mi casa" | 25 |
| 2.5 Teledetección y Análisis multitemporal | 26 |
| 2.5.1 Teledetección..... | 26 |
| 2.5.2 Imágenes Satelitales | 28 |
| 2.5.2.2 Misión satelital Copernicus | 30 |
| 2.5.3 Análisis multitemporal | 31 |
| 2.5.4 Software Qgis..... | 32 |
| 3. MARCO METODOLOGICO | 33 |
| 3.1. Zona de estudio | 33 |
| 3.2 Reconocimiento de actividades mineras | 34 |
| 3.3 Selección de imágenes satelitales | 34 |
| 3.4 Adquisición de imágenes satelitales | 34 |
| 3.5 Análisis multitemporal..... | 35 |
| 3.5.1 Cálculo del Índice NDWI..... | 36 |
| 3.5.2 Aplicación de algebra de mapas en Qgis..... | 37 |
| 3.6 Mapas geológicos del área de estudio..... | 38 |
| 3.7 Parámetro geomorfológico Sinuosidad..... | 38 |
| 3.9 Análisis de variación superficial del río y desplazamiento de riberas | 39 |
| 3.10 Procedimiento metodológico en Qgis..... | 39 |
| 4. CÁLCULOS Y RESULTADOS | 43 |
| 4.1 Reconocimiento de actividades mineras | 43 |
| 4.2 Descarga de imágenes satelitales | 45 |
| 4.3 Procesamiento de imágenes en Qgis..... | 46 |
| 4.4 Análisis de NDWI histórico en el río..... | 48 |
| 4.6 Calculo de Sinuosidad SI | 54 |
| 4.7 Análisis de NDWI histórico en las riberas..... | 56 |
| 4.8 Análisis de desplazamiento de la ribera | 59 |
| 4.9 Análisis de zonas de influencia..... | 64 |
| 4.10 Propuesta de acciones comunitarias..... | 70 |

| | |
|--|----|
| 5. ANALISIS DE RESULTADOS..... | 73 |
| 5.1 Análisis de NDWI para el río..... | 73 |
| 5.2 Análisis de variación de superficie | 73 |
| 5.3 Análisis de sinuosidad..... | 74 |
| 5.4 Análisis de NDWI para la ribera..... | 74 |
| 5.5 Análisis de expansión de la ribera..... | 75 |
| 5.6 Análisis de zonas antrópicas influenciadas por la actividad minera | 75 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 77 |
| 6.1 Conclusiones | 77 |
| 6.2 Recomendaciones..... | 79 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA | 80 |
| 8. ANEXOS | 84 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabla 1 | División de cuencas según su orden de flujo | 10 |
| Tabla 2 | Valores de clasificación del índice NDWI | 37 |
| Tabla 3 | Características de bandas para el análisis de NDWI | 37 |
| Tabla 4 | Coordenadas geográficas de cooperativas mineras en operación 2024 | 43 |
| Tabla 5 | Características de imágenes satelitales descargadas para la época seca | 45 |
| Tabla 6 | Características de imágenes satelitales descargadas para la época de lluvia | 45 |
| Tabla 7 | Variación de la superficie ocupada por el río a lo largo del tiempo – Época seca | 51 |
| Tabla 8 | Variación de la superficie ocupada por el río a lo largo del tiempo – Época de lluvia | 52 |
| Tabla 9 | Incremento de la superficie ocupada por el río para la época seca | 53 |
| Tabla 10 | Incremento de la superficie ocupada por el río para la época de lluvia | 53 |
| Tabla 11 | Análisis de variación de sinuosidad del río para la época seca | 54 |
| Tabla 12 | Análisis de variación de sinuosidad del río para la época de lluvia | 55 |
| Tabla 13 | Medición de la variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 3 | 60 |
| Tabla 14 | Medición de la variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 5 | 61 |
| Tabla 15 | Medición de la variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 6 | 62 |
| Tabla 16 | Medición de la variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 7 | 63 |
| Tabla 17 | Acciones de fortalecimiento comunitario | 72 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 1 | Sección transversal de un río..... | 11 |
| Figura 2 | Cálculo y clasificación de la sinuosidad de una curva meándrica | 15 |
| Figura 3 | Producción de oro en Bolivia (en toneladas) | 19 |
| Figura 4 | Ubicación de la Cuenca del Río Coroico | 22 |
| Figura 5 | Caracterización del uso del agua en la cuenca | 24 |
| Figura 6 | Diagrama del proceso de Teledetección | 27 |
| Figura 7 | Curva de reflectancia..... | 28 |
| Figura 8 | Resolución espectral y espacial de Sentinel 2..... | 30 |
| Figura 9 | Cuenca del Río Coroico, tramo del río en estudio | 33 |
| Figura 10 | Diagrama de flujo del procedimiento metodológico..... | 41 |
| Figura 11 | Actividades mineras en operación en el tramo Caranavi – Guanay del Río Coroico | 44 |
| Figura 12 | Índice diferencial de agua normalizado NDWI por año para la época seca | 47 |
| Figura 13 | Índice diferencial de agua normalizado NDWI por año para la época de lluvia | 47 |
| Figura 14 | Principales zonas de cambio geomorfológico en el río durante la época seca..... | 49 |
| Figura 15 | Principales zonas de cambio geomorfológico en el río durante la época de lluvia.... | 50 |
| Figura 16 | Índice diferencial de agua normalizado histórico (NDWI) - ribera época seca..... | 57 |
| Figura 17 | Índice diferencial de agua normalizado histórico (NDWI) - ribera época de lluvia.. | 58 |
| Figura 18 | Longitudes de expansión de la ribera para el año 2024 | 59 |
| Figura 19 | Zonas antrópicas influenciadas por las operaciones de la actividad minera | 64 |
| Figura 20 | Zona de influencia/incidencia con el medio antrópico de la mina 3 | 66 |
| Figura 21 | Zona de influencia con el medio antrópico de la mina 5 | 67 |
| Figura 22 | Zona de influencia con el medio antrópico de la mina 6 | 68 |
| Figura 23 | Zona de influencia con el medio antrópico de la mina 7 | 69 |

ÍNDICE DE GRAFICAS

| | | |
|------------------|---|----|
| Gráfico 1 | Variación de la superficie ocupada por el río a lo largo del tiempo – Época seca | 51 |
| Gráfico 2 | Variación de la superficie ocupada por el río a lo largo del tiempo – Ép. de lluvia | 52 |
| Gráfico 3 | Variación de sinuosidad del río en las principales zonas de cambio – Época seca..... | 55 |
| Gráfico 4 | Variación de sinuosidad del río en las principales zonas de cambio – Ép. de lluvia | 56 |
| Gráfico 5 | Variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 3 | 60 |
| Gráfico 6 | Variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 5 | 61 |
| Gráfico 7 | Variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 6..... | 62 |
| Gráfico 8 | Variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 7 | 63 |

INDICE DE ANEXOS

| | | |
|----------------|--|----|
| Anexo A | Capturas de pantalla del procesamiento de imágenes satelitales en QGIS | 84 |
| Anexo B | Registro fotográfico de actividades mineras | 89 |
| Anexo C | Artículos normativos relevantes sobre la actividad minera en Bolivia..... | 94 |

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

La geomorfología fluvial estudia las formas y procesos que modelan los cauces de los ríos a lo largo del tiempo y está determinada por el transporte de agua y sedimentos. La dinámica fluvial de los ríos es compleja, un río al ser un sistema dinámico puede verse modificado a lo largo del tiempo tanto por factores naturales como antrópicos (Muñoz, 2021) entre ellos la actividad minera aluvial de oro, la cual ha ido incrementándose de manera progresiva con los años.

La minería aluvial de oro se realiza hace décadas en Bolivia, es una forma de extracción muy antigua, principalmente se realiza en ríos de Beni, Los Yungas y Santa Cruz, debido a la mecanización del trabajo en los últimos años la actividad se ha ido intensificando y expandiéndose (CEDIB, 2019).

El proceso de esta actividad consiste en la remoción de los sedimentos de fondo y de las márgenes de los ríos haciendo uso de maquinaria lo que causa el traslado de sedimentos, deforestación ribereña, corte de meandros, excavaciones, modificaciones de las llanuras de inundación entre otros, lo que repercute en la geomorfología del río (Estrada et al., 2023; Ollerro & Garcia, 2007).

En la cuenca del Río Coroico ubicada al norte del departamento de La Paz el principal tipo de actividad minera que se realiza es la aurífera aluvial principalmente en el tramo que conduce de Caranavi hacia Guanay, en los últimos años se ha visto que la actividad se ha ido intensificando alterando el paisaje natural de los lugares donde se desarrolla y además está siendo relacionada por diferentes autoridades locales con los eventos de inundación que ha atravesado la región. Pese a la expansión de esta actividad, no se evidencian estudios que aborden de forma específica las transformaciones en la geomorfología fluvial en la Cuenca del Río Coroico (FIDES, 2023; La Razón, 2024).

A nivel global existen estudios que han evaluado y evidenciado el impacto de la minería aluvial de oro en el sistema fluvial mediante imágenes satelitales. Destacando a la región amazónica como la región con más afectación e indicando que países como Colombia, Perú, Brasil y Bolivia están enfrentando un crecimiento progresivo de la minería aluvial lo cual está alterando la dinámica natural de los ríos. De manera puntual existen estudios en Latinoamérica de los cuales

se habla en el apartado de antecedentes, que han evaluado los cambios en la forma del cauce de un río en específico empleando herramientas de teledetección y análisis multitemporal llegando a obtener resultados útiles para el área de estudio.

En ese sentido el presente proyecto de grado se desarrolla en la cuenca del Río Coroico (tramo Caranavi – Guanay) específicamente entre el segmento del río que fluye entre las comunidades de Salcala y Santa Fe, la zona de estudio se encuentra en una región de transición a la amazonia por lo cual es muy biodiversa.

El estudio tiene como objetivo evaluar las alteraciones en la forma del cauce del Río Coroico (Tramo Caranavi - Guanay) y sus riberas debido a la minería aluvial con una data temporal de nueve años (2016 - 2024), empleando el análisis multitemporal de imágenes satelitales Sentinel 2A a través del software Quantum GIS mediante la aplicación del Índice diferencial de Agua Normalizado (NDWI) en temporada seca y húmeda. La investigación aporta al conocimiento académico y los resultados pueden ser útiles para futuras acciones de gestión ambiental y planificación territorial en la cuenca del Río Coroico.

El documento se organiza en cinco capítulos. El primer capítulo desarrolla el marco de generalidades en el cual establece el contexto y la base conceptual de la investigación. El segundo capítulo corresponde al marco teórico donde se abordan los conceptos relacionados con la geomorfología fluvial, la minería aluvial, normativa vigente, teledetección y análisis multitemporal. El tercer capítulo describe la metodología utilizada, incluyendo el área de estudio, adquisición de imágenes satelitales, herramientas geoespaciales y los procedimientos aplicados. En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis del NDWI, seguidos por el quinto capítulo, donde se realiza la interpretación de los resultados. Finalmente, el sexto capítulo expone las conclusiones y recomendaciones del estudio. Al final de los capítulos en Anexos se adjunta fotografías de las actividades mineras en operación e imágenes del procesamiento del análisis multitemporal.

1.2 Antecedentes

En los últimos años, diversas investigaciones han evidenciado el creciente impacto de la minería aurífera sobre los ecosistemas fluviales tropicales. A nivel global, el estudio denominado “El aumento global de la minería aluvial incrementa la carga de sedimentos en los ríos tropicales”, realizado por Dethier et al., (2023), analizó 37 años de imágenes satelitales (1984–2021) en 396 distritos mineros de 49 países tropicales, incluido Bolivia. Los resultados demostraron que la minería aluvial ha incrementado significativamente la carga de sedimentos en los ríos, alterando su dinámica natural, la calidad del agua y la biodiversidad acuática, además de representar un riesgo para la salud humana.

Este patrón se confirma en el artículo publicado por la revista *Periodismo Ambiental Independiente* en 2020, la cual documenta el impacto de 34 años de minería ilegal en los ríos de Madre de Dios para lo cual científicos de la Universidad de Dartmouth analizaron 3.200 imágenes satelitales de la NASA entre 1984 y 2018, demostrando que la concentración de sedimentos se multiplicó por diez, con un consecuente aumento del transporte de mercurio, deforestación y alteraciones en los cursos fluviales (CINCIAS, 2020).

Del mismo modo, en el estudio de análisis multitemporal realizado en el Río Quevedo, en Ecuador, se analizaron imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2 entre 1985 y 2019 para evaluar cambios geomorfológicos en el cauce del río. Se identificaron cuatro zonas con variaciones importantes en la forma del cauce, además de una tendencia creciente en el régimen meándrico según los valores de sinuosidad. El estudio concluye que estos cambios se deben tanto a causas naturales como a actividades humanas, y destacan que el Índice NDWI es una herramienta adecuada para este tipo de evaluación.

Un estudio similar al anterior denominado “identificación de los efectos asociados al cambio del cauce del Río Amazonas en Colombia entre 2015 y 2022”, presta especial atención a comunidades asentadas cerca de las riberas y que están expuestas al cauce del río. Para realizar el análisis y modelamiento de la dinámica fluvial empleó imágenes satelitales Landsat 8 y aplicó el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificada a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados obtenidos se consideran un aporte relevante para la gestión de

riesgos y la planificación territorial en mencionada región, ya que permiten identificar zonas propensas a la erosión y deslizamientos (Rodríguez, 2022).

En el caso de Bolivia, se han registrado situaciones críticas asociadas a desbordes de ríos en zonas mineras. En febrero de 2023, la Agencia de Noticias FIDES informó que más de 2.500 personas fueron afectadas por inundaciones en el municipio de Guanay. El alcalde Víctor Ticona responsabilizó directamente a la intensa actividad minera por los desbordes anuales del río en la región.

Esta problemática se repitió en febrero de 2024, cuando La Razón reportó que 7.400 familias resultaron damnificadas en el mismo municipio, y nuevamente se destacó la influencia de la minería en la alteración del régimen hidrológico. De manera similar, el 9 de febrero de 2025, el Río Coroico se desbordó afectando a varias comunidades del macrodistrito Zongo en La Paz. Las autoridades atribuyeron esta situación no solo a las lluvias intensas, sino también a las actividades mineras que han modificado el cauce natural del río (La Razón, 2025).

A pesar de la relevancia de estos eventos, existe escasa información específica sobre estudios multitemporales en la cuenca del Río Coroico. No se han encontrado investigaciones que analicen mediante índices como el NDWI los cambios en el recurso hídrico asociados a la actividad minera en la zona.

No obstante, una investigación publicada por la Selva Andina Research Society analizó la cobertura boscosa en la provincia de Caranavi entre 1989 y 2014, utilizando herramientas SIG. Los resultados revelaron una reducción de áreas boscosas, asociada principalmente al avance de la frontera agrícola (Condori, 2018). Esta situación indica una transformación progresiva del paisaje y pone en evidencia la necesidad de monitorear la cuenca desde múltiples enfoques.

En respuesta a estos desafíos, Cáritas Coroico ha desarrollado diversas iniciativas enfocadas en la sostenibilidad ambiental. En el marco del proyecto "Mi Cuenca, Mi Casa", la organización ha coordinado acciones con cinco municipios y entidades gubernamentales para implementar procesos de descontaminación y sensibilización sobre la problemática del mercurio y los sedimentos en ríos. Además, promueve la Escuela de Campo en Minería Responsable, una estrategia que busca reducir los impactos negativos de la minería mediante la adopción de prácticas más sostenibles en el sector minero (Agencia de Noticias Ambientales [ANA], 2023).

1.3 Planteamiento del problema

La minería aluvial es una forma de extracción que se ha extendido de forma legal e ilegal principalmente a lo largo de cauces de ríos en La Paz, Beni y Pando, incluso llegando a desarrollarse en áreas protegidas y territorios de pueblos indígenas, a pesar de presentar fluctuaciones anuales la actividad ha demostrado una tendencia creciente en términos de producción, participación de actores mineros y exportaciones (Estrada et al., 2023; Ministerio de Minería y Metalurgia, 2023).

En 2025, el precio internacional del oro alcanzó un valor histórico de más de 3.000 dólares por onza, mientras que a nivel nacional para el mismo año en abril se registró un aumento del 41,01 %, con un precio máximo de Bs 741,96 por gramo, y para la joyería en el mismo año el oro se comercializó en 1500 Bs. Este ascenso en el valor del oro ha incentivado una expansión significativa de la minería aurífera en el país (La Patria, 2025; Exchange Rates, 2025).

La extracción aluvial de oro, se caracteriza por el uso de maquinaria pesada, que remueven los sedimentos del fondo del río y de las márgenes, lo que provoca la traslocación de sedimentos de mayor tamaño, a la vez se realiza deforestaciones en las riberas, lo cual cambia la geomorfología del cauce natural de los ríos. Estas transformaciones modifican la dinámica natural del río, incrementando la carga de sedimentos y provocando procesos de erosión y sedimentación que afectan directamente la estabilidad del cauce y la seguridad de las comunidades asentadas aguas abajo (CINCIA, 2020; Estrada, 2023).

En ese contexto, se ha registrado un incremento de la actividad minera aluvial en la cuenca del Río Coroico, caracterizado por el uso intensivo de maquinaria pesada, remoción de sedimentos y deforestación de riberas, lo que está provocando alteraciones visibles en el paisaje del entorno natural, además de que coincide con un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos de inundación que afectan a diversas comunidades asentadas en la región (FIDES, 2023; La Razón, 2024).

A pesar de la magnitud del problema, existe una limitada disponibilidad de estudios académicos que documenten estas alteraciones geomorfológicas en la cuenca del Río Coroico. En particular, se identifica un vacío en el uso de herramientas de análisis multitemporal mediante imágenes satelitales que permitan evaluar el comportamiento del cauce.

En consecuencia, se considera pertinente desarrollar una investigación que analice los cambios en la morfología fluvial del Río Coroico, a través del procesamiento y evaluación de imágenes satelitales con enfoque multitemporal. Este estudio no solo contribuirá al conocimiento científico sobre la influencia de la minería aluvial en sistemas fluviales tropicales, sino que también aportará insumos técnicos para la gestión ambiental, territorial y de riesgos de la cuenca del Río Coroico.

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar las alteraciones geomorfológicas en el cauce del Río Coroico (Tramo Caranavi - Guanay) y sus riberas debido a la minería aluvial entre los años 2016 a 2024 empleando el análisis multitemporal de imágenes satelitales en temporada húmeda y seca.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar las principales actividades mineras aluviales de oro desarrolladas sobre el cauce del Río Coroico (tramo Caranavi - Guanay) que causan alteraciones considerables al río.
- Analizar imágenes satelitales históricas del área de estudio mediante el software Quantum Gis (Qgis) en base al análisis espacial del Índice de Diferencia de Agua Normalizada (NDWI) para identificar las principales zonas de cambio en la geomorfología del cauce natural del Río Coroico.
- Proponer acciones que puedan aportar al fortalecimiento del rol comunitario en la regulación y gestión de las actividades mineras.

1.5 Justificaciones

1.5.1 Justificación académica

La actividad minera aluvial tiene un crecimiento sostenido por lo que requiere de estudios que puedan evaluar sus impactos en el medio ambiente y las comunidades. No obstante, en la cuenca del Río Coroico las investigaciones referentes a la actividad son limitadas. La presente investigación contribuye al conocimiento de la dinámica fluvial en la cuenca en contextos mineros y proporciona información útil para futuras investigaciones que quieran fortalecer el respaldo técnico a las comunidades frente a la actividad minera aluvial.

1.5.2 Justificación ambiental

Existe una relación muy compleja entre la actividad minera y los efectos ambientales que produce ya que trae consigo efectos a todos los factores ambientales (agua, aire, suelo) que persisten a lo largo del tiempo entre ellos la modificación geomorfológica del cauce de los ríos, la cual es importante conocer y entender para poder reforzar las capacidades de adaptación de las poblaciones involucradas, además de poder realizar un mejor control y seguimiento a las operaciones mineras, todo ello para contribuir a la salud ambiental de la cuenca.

1.5.3 Justificación social

La minería aluvial aurífera extrae oro a lo largo de los cauces de los ríos, de manera legal e ilegal, el proceso de extracción muchas veces llega a ser muy invasivo para las comunidades involucradas llegando a afectar ecosistemas, indispensables para un desarrollo social adecuado. Actualmente se sabe que diferentes comunidades asentadas donde se extrae el oro están sufriendo consecuencias negativas en su salud, contaminación del medio ambiente y desastres. Los resultados del proyecto contribuirán a la gestión ambiental y de riesgos de las comunidades involucradas.

1.5.4 Justificación técnica

El uso de Sistemas de Información Geográfica como el software Qgis e imágenes satelitales históricas es una forma de bajo costo para monitorear los impactos de la minería a largo del tiempo sobre el cauce de un río y las riberas, es importante conocer mencionada información y la tecnología ahora hace posible que veamos qué está pasando con la minería para plantear un adecuado control de los procesos de extracción minera y medidas de adaptación para las comunidades involucradas ya que las consecuencias van a durar mucho tiempo.

1.6 Alcance

El presente estudio permite evaluar el efecto de la minería aluvial de oro en geomorfología del cauce natural del Río Coroico en el tramo Caranavi – Guanay, específicamente entre las comunidades Salcala y Santa Fe con una data de tiempo de nueve años (2016 a 2024).

Para lo cual se emplea el análisis multitemporal del índice NDWI para imágenes satelitales Sentinel 2A mediante el software Qgis. El análisis se realizó en época seca como época prioritaria

de estudio debido a que la actividad minera se desarrolla e intensifica en esos meses, y por otro lado el análisis en época de lluvia es importante como época de comparación ya que permite observar si los efectos en la geomorfología del cauce se mantienen pese a las mayores precipitaciones.

Los productos más relevantes que la investigación obtuvo son mapas espaciales de: ubicación de actividades mineras, identificación de zonas con mayor cambio en el cauce del río según el análisis de NDWI, interacción minería – actividad antrópica; además de graficas para evaluar la sinuosidad, crecimiento de la superficie ocupada por el río y desplazamiento de riberas.

El presente estudio es de tipo aplicado, ya que busca generar conocimientos útiles para comprender los impactos de la actividad minera sobre la geomorfología del Río Coroico. Se adopta un enfoque mixto, integrando herramientas cuantitativas, como el análisis multitemporal mediante imágenes satelitales e índices espectrales (NDWI), y elementos cualitativos, como la interpretación contextual y la propuesta de acciones para la gestión comunitaria del territorio.

Es importante mencionar que el estudio no aborda los impactos químicos y biológicos de la actividad minera sobre el río, pero son considerados en la parte teórica para una mejor comprensión del tema. También el estudio reconoce el impacto social de la minería aluvial, pero, no tiene como objetivo abordar la dimensión social del problema. No obstante, a partir de los resultados obtenidos, plantea algunas acciones orientadas a la gestión comunitaria frente a la actividad minera.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEORICO

2.1 Objetivos del desarrollo sostenible

La industria minera, debido a su amplia gama de actividades y su presencia significativa en naciones en desarrollo, mantiene una estrecha relación con los temas abordados en los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (Responsible Mining Foundation, 2020).

Los ODS no constituyen un conjunto de requisitos obligatorios para las empresas, sino que ofrecen un marco de referencia que permite evidenciar, mediante su incorporación y la presentación de informes, que están administrando de forma responsable todos los aspectos económicos, ambientales, sociales y de gobernanza. Sin embargo, la integración y la presentación de informes de los ODS todavía no son comunes en la actividad minera (Responsible Mining Foundation, 2020).

La actividad minera suele desarrollarse en áreas remotas y con menor nivel de desarrollo, donde puede fomentar la creación de empleo e impulsar la innovación, y llegar a representar un pilar fundamental de la economía. No obstante, también ha sido un factor que contribuye a diversos problemas que los ODS buscan resolver, como la degradación ambiental, las emisiones de carbono, el desplazamiento de comunidades, el aumento de la desigualdad económica y social, los conflictos armados, la violencia de género, la corrupción y el incremento de riesgos medioambientales (Foro económico mundial, 2016).

2.2 Dinámica y clasificación de sistemas fluviales y cuencas hidrográficas

2.2.1 Cuenca hidrográfica

Rodríguez 2021 indica que una cuenca hidrográfica es un área claramente delimitada tanto topográfica como hidrológicamente, y se considera esencial en la geomorfología debido a los marcados cambios en el relieve y la composición del suelo. Su formación se debe a la acumulación de sedimentos erosionados y transportados desde las cordilleras o zonas elevadas del terreno.

Aguirre 2007 define una cuenca hidrográfica como una región geográfica conformada por un río, sus afluentes y la zona que capta y dirige el flujo del agua. Dentro de ella se encuentran

recursos naturales esenciales, como el agua, el suelo, la vegetación y la fauna, los cuales permiten el desarrollo de diversas actividades humanas.

El sistema fluvial de la cuenca hidrográfica comprende tres etapas importantes; las cuales son: zona de producción, zona de transferencia y zona de sedimentación (Rodríguez, 2021).

2.2.1.2 Clasificación de una cuenca hidrográfica

Según el sistema de drenaje y la desembocadura final, las cuencas pueden clasificarse en: arreicas cuando sus aguas se pierden por evaporación ya que no logran drenar a un río, mar o lago; exorreicas cuando las vertientes conducen las aguas a un sistema mayor de drenaje como un gran río o mar; criptorreicas cuando sus redes de drenaje superficial no tienen un sistema organizado o aparente y endorreicas cuando sus aguas drenan a un cuerpo cerrado de agua como un lago. Por otra parte, como se observa en la Tabla 1 las cuencas hidrográficas también pueden ser clasificadas en relación con su número de orden de flujo (Faustino & Jiménez, 2000; Rodríguez 2021).

Tabla 1

División de cuencas según su orden de flujo

| Unidad | N. de Orden | Área (Km ²) |
|-------------|-------------|-------------------------|
| Microcuenca | 1,2,3 | 10 - 500 |
| Subcuenca | 4,5 | 500 - 2000 |
| Cuenca | 6,7 o más | 2000 |

Fuente. Tomado de Geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Bajaña, Rodríguez 2021.

2.2.2 Sistema Fluvial

Un sistema fluvial es un conjunto de diversos elementos y procesos naturales asociados a un río incluyendo su red de afluentes, cauce principal, el corredor ribereño, la llanura de inundación, entre otros. Todos estos interactúan de manera compleja en diferentes escalas espaciales y temporales, lo que genera un comportamiento no lineal (García, 2015).

Los sistemas fluviales están influenciados por factores climáticos y estructurales, cuya interacción a lo largo del tiempo moldea el relieve, define el paisaje y determina el régimen

hidrológico y sedimentológico, influyendo en los procesos y formas que lo caracterizan (García, 2015).

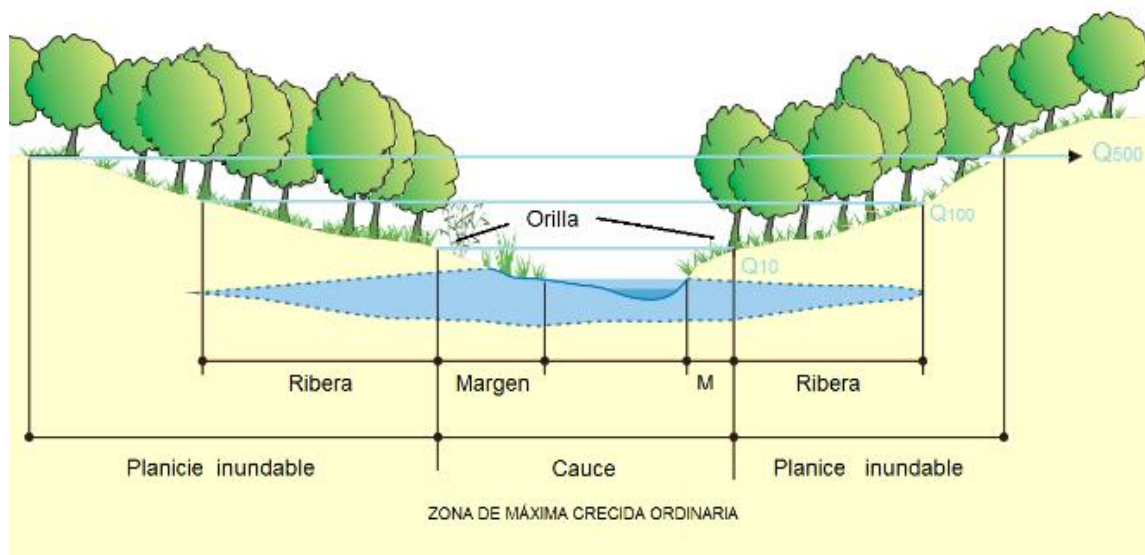
2.2.3 El río como sistema dinámico

Un río es un sistema natural caracterizado por una corriente de agua, ya sea continua o intermitente, con una dinámica variable en el tiempo y el espacio (crecidas y estiajes). Transporta caudales líquidos, sólidos y biológicos, los cuales pueden desembocar en otra corriente, en un lago, en el mar o, en algunos casos, desaparecer. Además, el río incluye el ecosistema hiporreico, que se encuentra bajo la superficie, el cauce por donde fluye y la llanura que puede inundarse de manera periódica (García, 2015).

La dinámica natural de los ríos se ajusta constantemente en el tiempo y el espacio a las variaciones en los caudales de agua y sedimentos, generando una intensa interacción ecológica. Su forma física y sus componentes biológicos están influenciados tanto por procesos naturales como por procesos antrópicos en la figura 1 se observa la sección transversal de un río (Ollerro & Garcia, 2007).

Figura 1

Sección transversal de un río



Fuente. Tomado de El río y su territorio, Hernández, N, 2018.

El adecuado funcionamiento de un sistema fluvial depende de la conservación de su dinámica natural. Solo los ríos que la mantienen pueden desempeñar correctamente sus funciones dentro del ecosistema. Un río libre de impactos antrópicos posee una dinámica natural activa de manera espontánea, sin requerir intervención (Ollerro & Garcia, 2007).

Los sistemas fluviales son los principales agentes de restauración de su dinámica natural. Con el tiempo los ríos tienden a recuperar su geomorfología, corregirse y adaptarse a los factores físicos, siempre que se eliminen las influencias antrópicas que los alteran. Para lograr una restauración fluvial sostenible, es fundamental abordar las causas de los impactos en lugar de centrarse en sus efectos (Ollerro & Garcia, 2007).

2.2.3.1 Clasificación de ríos

Los ríos según su período de actividad pueden clasificarse en: perennes si se encuentran en zonas con lluvias abundantes o con alimentación freática suficiente para que el cauce del río sea continuo todo el año, estacionales aquellos que se encuentran en regiones con estaciones bien diferenciadas (inviernos húmedos y veranos secos), transitorios que son típicos de zonas con climas desérticos o secos de tal manera que el caudal puede estar sin precipitaciones durante años y alóctonos que se encuentran en zonas áridas y el cauce del río depende de otras regiones más lluviosas (Rodríguez, 2021).

Por otra parte, según la geometría que adopta la corriente del canal, los ríos se pueden clasificar en rectilíneos, meándricos y anastomosados (Rodríguez, 2021).

- **Rectilíneo:** Estas corrientes se distinguen por su baja sinuosidad ($SI < 1.05$) y por presentar un único canal (multiplicidad 1). Son altamente inestables y, en la mayoría de los casos, tienden a transformarse en otros tipos de ríos, a menos que su curso siga una falla geológica. Se caracterizan por transportar un caudal de gran energía y tener una elevada capacidad erosiva.
- **Meándrico:** Se caracteriza por una alta sinuosidad ($SI < 1.05$) y la presencia de meandros, que son curvas completas en el canal formadas por dos arcos sucesivos. Las corrientes fluviales de este tipo combinan procesos de erosión, que suelen concentrarse en la parte cóncava de la curva, y de sedimentación, que predominan en la orilla convexa. Estas variaciones se deben a las diferencias en la velocidad del agua a lo largo de ambas orillas.

- **Anastomosado:** Tienen una sinuosidad (S_r) que varía entre 1.25 y 1.50. Estas corrientes, también denominadas trezadas, se distinguen por la presencia de múltiples canales. Poseen una gran capacidad de transporte y deposición de sedimentos, aunque su energía es menor en comparación con las corrientes rectilíneas. Como resultado, cuando encuentran obstáculos en su recorrido, ajustan su curso para adaptarse tanto al relieve como a los sedimentos acumulados en el fondo del cauce.

2.2.4 Riberas y llanuras de inundación

A las riberas se las considera una interfaz entre ecosistemas terrestres y acuáticos, el bosque de ribera es la vegetación adyacente a los ríos y arroyos, quedando fácilmente identificado por tener un nivel freático muy alto, debido a su proximidad al cauce, y sustentar una vegetación característica, ligada a la constancia de humedad en el suelo (Pero et al., 2020).

Las riberas proveen servicios ambientales al ecosistema como ser el aporte de materia orgánica e inorgánica a los ríos, moderan la temperatura del agua, regulan la entrada de nutrientes y contaminantes, mejoran la calidad ecológica del agua, estabilizan los márgenes de ribera y representan el hábitat y conectividad para especies de fauna (Pero et al., 2020).

Además, las riberas cubiertas por vegetación actúan como zonas con alta capacidad para retener sedimentos, debido a su escasa pendiente y a la alta permeabilidad de sus suelos. Esta vegetación, junto con los restos orgánicos que se acumulan sobre el suelo, reducen considerablemente la velocidad del agua, facilitando la retención de sedimentos en las llanuras aluviales (Gonzales & García, 2001).

La llanura de inundación, también llamada cauce mayor, es una forma de relieve modelada por la acción del río durante sus crecidas y, en muchos casos, presenta una ligera concavidad. Durante la temporada de lluvias, esta área actúa como un espacio de disipación de la energía del agua desbordada, decantación de sedimentos y como un depósito temporal de caudal, lo que contribuye a disminuir el flujo de agua y sedimentos en las zonas ubicadas río abajo (Gonzales & García, 2001).

2.2.5 Geomorfología fluvial

La geomorfología es una rama de la geología que se encarga de analizar las diversas formas y estructuras de la Tierra, proporcionando una explicación e interpretación de los procesos dinámicos que ocurren en la corteza terrestre. Para ello, identifica los diferentes agentes responsables de la erosión y la meteorización, así como los factores geológicos que influyen en la evolución del paisaje y el relieve (Rodríguez, 2021).

Está determinada por factores exógenos, como lluvias, incendios y vientos, que intervienen en la acumulación, transporte y remoción de sedimentos en los bordes del río, así como por procesos endógenos, incluyendo la actividad tectónica y volcánica, y actividades antrópicas. La geomorfología juega un papel clave en el mantenimiento del equilibrio del sistema y es fundamental en estudios de evaluación y restauración de ríos (Rodríguez, 2021).

2.2.6 Parámetros geomorfológicos de un río

2.2.5.1 Radio de curvatura (Rc)

El radio de curvatura (Rc) es un parámetro que permite medir la desviación y la amplitud de las curvas en un río meándrico. Este indicador representa la distancia entre el centro de la forma casi circular de un meandro y uno de los puntos periféricos que delimitan el canal del río.

2.2.5.2 Índice de sinuosidad (SI)

El índice de sinuosidad (SI) es un parámetro para la clasificación de ríos, el cual es adimensional y típicamente usado para medir el estado meandroso de los ríos. Su valor se puede calcular mediante la ecuación (1) y se tiene una idea del cálculo más clara al observar la figura 2 (Madrid et al; 2020).

Ecuación (1)

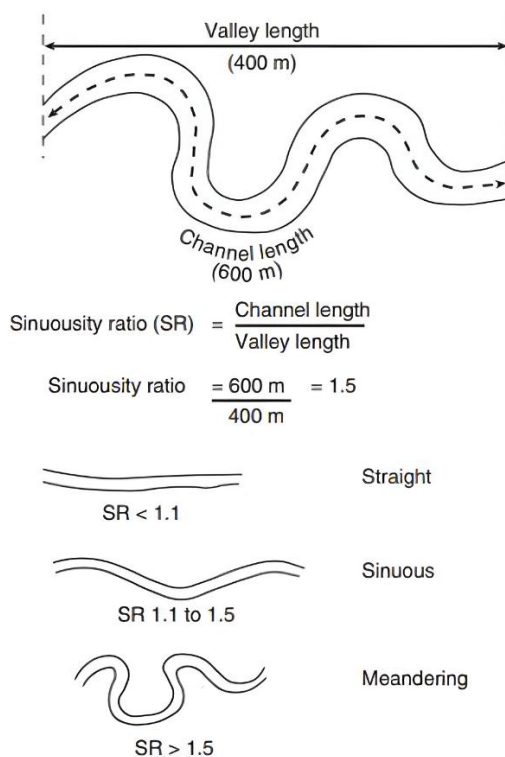
$$SI = \frac{l}{L}$$

La ecuación (1) representa la distancia recorrida a lo largo del eje central del río entre dos puntos respecto de la distancia en línea recta que los separa. Como resultado, el valor mínimo de este indicador es 1. Además, se han definido rangos de sinuosidad para clasificar los patrones fluviales en ríos rectos ($S \leq 1.05$), sinuosos ($1.05 < S < 1.5$) y meándricos ($S \geq 1.5$) (Madrid et al; 2020)

Estos criterios solo son relevantes cuando se aplican de manera local a los segmentos que componen el sistema del cauce, ya que pueden cambiar considerablemente si el río experimenta inestabilidad o si recibe una carga adicional de sedimentos provenientes de un tributario (Madrid et al., 2020).

Figura 2

Cálculo y clasificación de la sinuosidad de una curva meándrica



Fuente. Tomado de Geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Bajaña, Rodríguez 2021.

2.2.6 Alteraciones geomorfológicas en cauces desde el enfoque de la minería

El proceso de extracción de oro aluvial consiste principalmente en la remoción de los sedimentos del fondo y de las márgenes haciendo uso de bombas de succión hidráulicas a alta presión lo que incrementa la carga de sedimentos, un alto contenido de sedimentos está ligada a la reducción de cuerpos de agua favoreciendo el proceso de colmatación y reducción de la profundidad (UTECH, 2023; Bustamante & Mercado, 2020).

Todos los impactos sobre el sistema fluvial, sean directos sobre el cauce, indirectos sobre cuencas y vertientes o diferidos en el tiempo, cuentan con respuesta en el funcionamiento hidrológico y geomorfológico del sistema y en sus propias morfologías de cauce y riberas (Ollerro & García, 2007).

Las alteraciones geomorfológicas en cauces tienen lugar tanto en los procesos como en las formas y responden tanto a impactos directos en el cauce como a presiones indirectas sobre la cuenca o el sistema fluvial aguas arriba. Por ejemplo, los dragados de la actividad minera tienen repercusiones de forma local y también aguas abajo que se manifiestan con el tiempo (Ollerro & García, 2007).

a) Por reducción en la funcionalidad de la llanura de inundación

Toda reducción de la funcionalidad natural de la llanura de inundación incrementa la peligrosidad del sistema fluvial aguas abajo o en la margen opuesta. Cuando se reduce la funcionalidad de la llanura se reduce el desbordamiento lo que causa que el río fluya con mayor energía incrementando los procesos de erosión en las riberas y el transporte de una mayor carga de sedimentos aguas abajo lo que podría provocar inundaciones (Ollerro & Garcia, 2007).

A la vez la actividad de dragado causa modificaciones en la llanura de inundación lo que altera el régimen hidráulico interior del cauce y destruye la compleja estructura de las orillas naturales, trayendo consigo en la mayoría de los casos la eliminación de la vegetación de ribera y el empobrecimiento de la fauna acuática (Ollerro & Garcia, 2007).

b) Por deterioro de las riberas

Las riberas cumplen el papel principal de funcionar como filtro de los procesos fluviales, ayudando a disminuir la velocidad de la corriente, favoreciendo la sedimentación reforzando y estabilizando las orillas (Ollerro & García 2007).

Cuando se realiza una reducción superficial y ruptura de continuidad de la ribera esto afecta al funcionamiento geomorfológico del río como sistema causando que el desborde del río provoque canales de crecida y genere depósitos de material grueso y se aceleren los procesos de erosión en las orillas. Si no hay vegetación ribereña los materiales finos se sedimentan con mayor dificultad, lo que causa el incremento de turbidez de la corriente (Ollerro & García, 2007).

c) Por actuaciones directas sobre el fondo del lecho del río

El dragado y la descarga de material pueden ser definidos como un proceso artificialmente inducido de erosión, transporte y deposición de los sedimentos. La actividad de dragado por parte de la actividad minera y la extracción de áridos presentan los efectos más graves para la geomorfología de los ríos. Las intensas labores de extracción alteran los depósitos sedimentarios de las orillas convexas de los meandros causando el retraimiento gradual de las orillas, lo que hace que el río sea más ancho y menos profundo (Cruz, s.a; Ollerro & García, 2007).

Si se extrae sedimentos de forma constante no hay forma natural de que el río lo recupere lo que creara un déficit de sedimentos, lo que puede producir un ensanchamiento del cauce y posibles desbordes además la fauna es dañada gravemente con las remociones de gravas y en todos los casos van unidos a la destrucción de islas y masas de vegetación a veces extensas. En el caso de extracciones en la llanura de inundación, resultan depresiones que alteran el paisaje y provocan riesgos de contaminación del acuífero (Ollerro & García, 2007).

2.3 Minería aluvial en Bolivia

Este tipo de minería realiza la explotación de oro en el lecho de los ríos o en las riberas, el proceso consiste principalmente en la remoción de los sedimentos del fondo y de las márgenes haciendo uso de maquinaria pesada, lo que provoca la traslocación de sedimentos de mayor tamaño en las orillas del río, a la vez se realiza deforestaciones en las riberas y cortes de meandros, lo cual cambia la dinámica fluvial natural de los ríos al alterar el ancho, la profundidad, la sinuosidad y la estabilidad del canal (Estrada et al., 2023).

El oro es un tipo de metal muy pesado lo que quiere decir que su movimiento por los canales fluviales es difícil, por lo que las piezas más pesadas de oro al viajar por el río recorrerán el camino de menor resistencia y se irán depositando en los meandros, que posteriormente serán intervenidos por la actividad minera llegando a largo plazo a cambiar la geomorfología del cauce natural (Metallurgist, 2018).

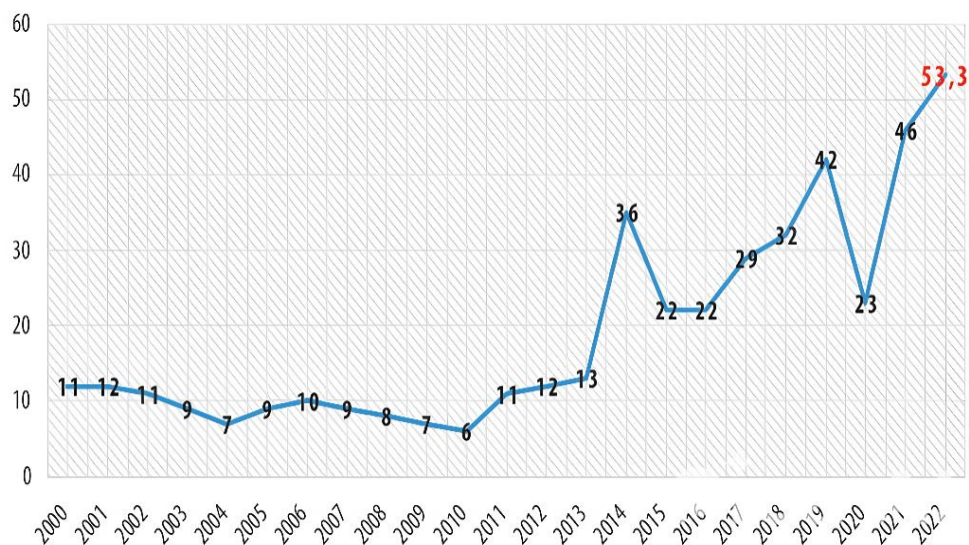
Existen diversas técnicas para la extracción de oro aluvial (bateo tradicional, semimecanizado y mecanizado), pero todas se basan en el principio de aprovechar la alta densidad del oro, lo que permite que se hunda rápidamente en el agua y pueda separarse del resto del material del que está acompañado (CEDIB, 2019).

La separación final del oro se realiza utilizando mercurio, un elemento que se une al polvo de oro formando una amalgama. Posteriormente, para obtener oro puro, la amalgama es calentada, provocando la evaporación del mercurio. Se calcula que solo en el Amazonas se liberan más 200 toneladas de mercurio al ecosistema, a continuación, se explican los principales métodos de minería aluvial empleado (CEDIB, 2019).

- **Método artesanal:** Se realiza el lavado de oro de manera manual en una batea, el proceso consiste en el lavado de arena superficial de los lechos o playas de los ríos mediante centrifugación manual en la batea el cual como etapa final puede incluir el uso de mercurio para una purificación (CEDIB, 2019).
- **Método semimecanizado:** Utiliza motobombas para extraer el material. Existen dos formas, la primero emplea presión sobre un talud de material aluvial para descomponerlo y luego hacerlo pasar por una canaleta; el segundo permite alcanzar profundidades de entre 5 y 6 metros, el material extraído se filtra en una plancha inclinada con un selector que atrapa las partículas de oro, lo retenido se somete a un proceso de decantación artesanal, tras el cual se agrega mercurio para la separación del oro (CEDIB, 2019).
- **Método mecanizado:** Se emplea dragas para remover sedimento del lecho fluvial y son capaces de excavar a varios metros de profundidad, el material extraído se transporta para filtrar las partículas grandes como rocas y el oro se concentra en el sedimento fino el cual se obtiene mediante canaletas de separación en el que se prenden las partículas de oro para su tratamiento con mercurio (CEDIB, 2019).

La producción de oro en Bolivia se ha ido intensificando debido a la mecanización, en la figura 3 se observa el crecimiento que ha tenido la extracción de oro en los últimos años. Las principales zonas de explotación son el río Madre de Dios y el río Beni la región de los Yungas, y la parte sur del Apolobamba (CEDIB, 2019).

El sector cooperativista es el principal actor minero en el país, en 2018 fue responsable del 89% de la extracción de oro en todo el territorio nacional y el porcentaje va en aumento, además que según el Ministerio de Minería y Metalurgia hasta el año 2017 existían 1102 cooperativas auríferas mineras y de estas casi 1.000 están ubicadas en el departamento de La Paz, su tipo y funcionamiento dependen de la región a la que pertenece (CEDIB, 2019).

Figura 3*Producción de oro en Bolivia (en toneladas)*

Fuente. Tomado de Oro en Bolivia: Asimetrías de un modelo en expansión, Zaconeta, 2023.

2.3.1 Impactos ambientales y sociales de la minería aluvial

La actividad minera aluvial de oro puede causar impactos ambientales al aire, agua, suelo y tierra, entre ellos están la acumulación de sedimentos en cuerpos de agua superficiales debido a una inadecuada gestión de los materiales y residuos, la alteración del flujo natural de los ríos por la ocupación y desvío de sus cauces, el deterioro de los lechos fluviales, la modificación de la calidad del agua por el aporte de sedimentos, residuos orgánicos y sustancias químicas como el mercurio que no solo contamina el medio ambiente, la flora, la fauna sino que también atenta contra la salud de las comunidades (Terán, 2021).

La situación del mercurio es complicada y preocupante, un estudio realizado el año 2021 en las cuencas de los ríos Beni, Madre de Dios y Mamoré (donde habitan alrededor de 26 pueblos indígenas) analizó 865 muestras de cabello humano, revelando niveles de mercurio muy superiores al límite recomendado de 1 ppm. Los valores promedio oscilan entre 10 y 20 ppm, alcanzando hasta 30 ppm en algunos casos, lo cual representa un grave riesgo para la salud, especialmente a nivel neurológico (CEDIB, 2022).

Además, la minería aluvial impacta significativamente la vida de las comunidades donde se lleva a cabo, transformando su cultura, economía, estructura social y el entorno natural. Tanto

la minería legal como la ilegal provocan tensiones entre los habitantes, generando conflictos entre mineros y no mineros, así como con las cooperativas mineras (CEDIB, 2019).

Esta actividad también conlleva problemas como el desplazamiento de comunidades, la vulneración de derechos, el incremento del costo de vida y un clima de inseguridad. Aunque la explotación del oro genera una alta circulación de dinero en la región, su beneficio económico es temporal y no promueven la diversificación de actividades productivas (CEDIB, 2019).

2.3.2 Ley de regulación de la actividad minera en Bolivia

En Bolivia existen diferentes normas que regulan la actividad minera entre las principales se tiene a La constitución política del estado, Ley N° 535 de Minería y Metalurgia, Ley N° 1333 de Medio Ambiente, Reglamento Ambiental para Actividades Mineras, Ley N° 1257 de ratificación del Convenio 169 de la OIT, Ley N° 3760 de incorporación a la legislación nacional de la Declaración de las Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas (Poveda, 2022).

El párrafo I del Artículo 369 de la Constitución Política del Estado reconoce como sujetos que participan en la actividad minera a tres tipos de actores: la industria minera estatal, la industria minera privada y las cooperativas mineras (CEJIS, s.a).

La Ley N° 535 fue aprobada el 28 de mayo de 2014 y regula las actividades mineras y metalúrgicas, estableciendo principios, lineamientos y procedimientos para la otorgación, conservación y extinción de derechos de los mineros. La misma indica que la Autoridad Jurisdiccional Administrativa Minera (AJAM) es la encargada de la dirección, administración superior, control y fiscalización de la actividad minera en todo el territorio del Estado (Ministerio de minería y metalurgia, 2023).

El artículo 171 de la Ley 535 refiere que las actividades mineras requieren Licencia de Operación otorgada por la AJAM y el artículo 172 de la misma Ley indica que para obtener la Licencia de operación es requisito la Licencia ambiental (Ministerio de minería y metalurgia, 2023).

La Ley 535 también contempla otros artículos de importancia como ser el (Art. 220) para actividades mineras en áreas protegidas, (Art. 221) cierre de operaciones que establece los

lineamientos para rehabilitar la zona y asumir los costes de ello, y (Art. 222) control de las normas ambientales por parte del Ministerio de Minería y Metalurgia (Schot, 2023).

Una de las competencias asignadas a la AJAM consiste en organizar y ejecutar los procesos de consulta previa a las naciones y pueblos indígena originario campesinos, así como a las comunidades interculturales y al pueblo afro boliviano. La consulta previa es de carácter obligatorio ya que es un derecho colectivo de los pueblos indígenas y debe ser llevada a cabo de manera libre, informada y de buena fe (CEJIS, s.a).

2.4 Sobre la Cuenca del Río Coroico

2.4.1 Zonificación

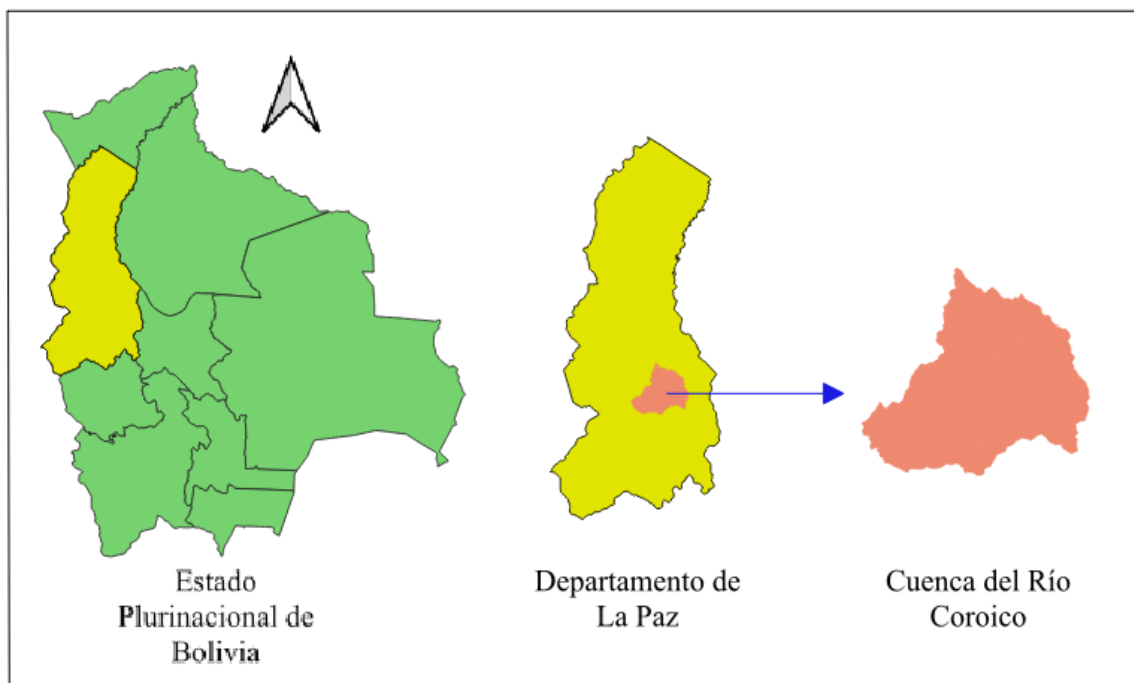
La cuenca está ubicada en el departamento de La Paz (figura 4), cuenta con 5.356,68 Km² de superficie, atraviesa los municipios de Coroico, Caranavi, Teoponte, Guanay, Nuestra Señora de La Paz con el aportante del río Zongo, Coripata, La Asunta y Pucarani (Ortuño & Flores, 2023).

La cuenca nace en la Cordillera Real y fluye hasta la cuenca del Amazonas, presenta una gran variedad de relieves, vegetación, pendiente, fisiografía, actividad económica y usos de los recursos hídricos. La cabecera de la cuenca entre 6125 a 4200 msnm abarca una zona nival, subnival y altoandino, atraviesa valles intermedios hasta llegar a la zona de los Yungas (2000 a 1000 msnm) caracterizada por una cobertura naturalmente boscosa. La parte baja de la cuenca se encuentra entre 1000 a 446 msnm con una temperatura mucho mayor y presenta un bosque pluvial subandino inferior de transición con la amazonia (Ortuño & Flores, 2023).

El área de estudio que comprende el tramo del río entre el municipio de Caranavi y Guanay se encuentra en la zona baja amazónica de la cuenca entre 1000 a 446 msnm, al norte del departamento de La Paz (Ortuño & Flores, 2023).

Figura 4

Ubicación de la Cuenca del Río Coroico



Fuente. Elaboración propia

2.4.2 Características físicas y climáticas

- **Temperatura:** El gradiente de temperatura presente en la cuenca es amplio teniendo un valor medio de -5°C en los glaciares de la parte alta de la cuenca y un valor medio de 25°C en Teoponte ubicado en la parte baja, no obstante, la temperatura supera los 30°C en el verano.
- **Precipitación:** La cuenca registra precipitaciones que varían entre 598 mm/año en la parte alta y 1901 mm/año en la parte baja lugar donde se encuentra el tramo de río entre Caranavi y Guanay.
- **Fisiografía:** Presenta una topografía irregular con pendientes empinadas y moderadas, la región de Caranavi presenta relieves accidentados configurados por altas serranías, laderas disectadas y planicies onduladas.

- **Biodiversidad:** En la cuenca existe una gran diversidad de flora y fauna muchas de ellas endémicas, principalmente en las zonas de bosques nublados, bosques de Yungas y los bosques de transición con la amazonia.

2.4.3 Uso de la tierra

La cuenca se destaca principalmente por su orientación agropecuaria. En la parte alta, correspondiente al municipio de La Paz, las actividades más comunes están relacionadas con el cultivo de productos agrícolas andinos de ciclo corto, como la papa, oca y papaliza, además de la ganadería con la crianza de llamas, ovinos y bovinos (Ortuño & Flores, 2023).

La zona intermedia o valle bajo se caracteriza por la ausencia de poblaciones asentadas, lo que limita las actividades agrícolas. Sin embargo, esta condición ha permitido la preservación de especies forestales que ya no se encuentran en otras zonas del municipio (Ortuño & Flores, 2023).

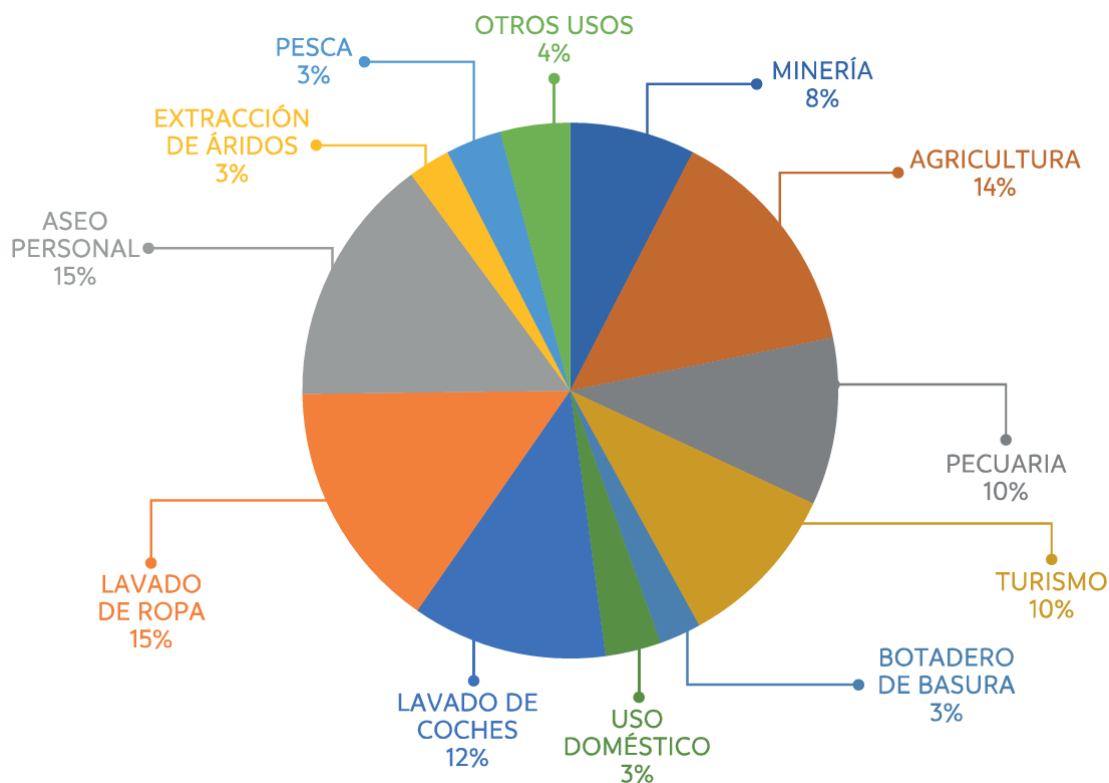
En cambio, la parte baja de la cuenca está completamente dedicada a las actividades agrícolas, presentando una mayor variedad de cultivos como haba verde, maíz, durazno, granadilla, zapallo, plátano, café, cítricos y coca. Mientras que en la zona tropical predominan cultivos como arroz, maíz, café y cacao. La zona de estudio se encuentra en la parte baja de la cuenca y las condiciones del clima y las características del suelo favorecen el desarrollo de una amplia gama de cultivos anuales, tales como arroz, maíz, yuca, walusa, tomate, cítricos, banano, café, plátano, papaya, cacao, palta, pacay, piña, guanaba, entre otros. Es importante señalar que la actividad minera también se identifica como una de las principales fuentes económicas dentro de los municipios de la cuenca (Ortuño & Flores, 2023).

2.4.4 Usos del agua

El Río Coroico atraviesa los municipios de Caranavi, Coroico, Guanay, Teoponte y La Paz, es un río intermunicipal, cabe aclarar que no se realiza su uso para consumo humano, además el agua corresponde a una clasificación de calidad de clase B según el RMCH de la Ley 1333. Dentro de la cuenca existen diferentes tipos de usos del recurso hídrico entre los cuales se destacan los sectores de agricultura, minería, pecuaria, turismo, uso doméstico entre otros. La figura 5 muestra la caracterización del uso de agua en la cuenca (Ortuño & Flores, 2023).

Figura 5

Caracterización del uso del agua en la cuenca



Fuente. Tomado del Plan director de la cuenca del Río Coroico, Ortuño & Flores, Caritas Coroico, 2023.

2.4.5 Conflictos por el agua

Los sectores que mayor movimiento económico generan en la cuenca son la minería y la agricultura, ambas actividades generan impactos ambientales sobre el agua, la actividad minera contamina el río con sólidos disueltos y mercurio lo que trae problemas a las comunidades asentadas aguas abajo, repercutiendo en conflictos entre poblaciones locales y mineros. En el caso de la agricultura el uso inadecuado de agroquímicos llega a contaminar cuerpos de agua subterráneos y superficiales (Ortuño & Flores, 2023).

2.4.6 Minería en la cuenca del Río Coroico

El tipo de minería que principalmente se realiza en la cuenca es la aurífera y se desarrolla en varios municipios de la cuenca, como Coroico, Caranavi, Teoponte, Guanay y La Paz. En la

parte alta de la cuenca se realiza la extracción de minerales de socavones que consiste en la explotación subterránea, por otra parte, en la parte media y baja se realiza la minería aluvial mediante una extracción mecanizada y empleo de dragas para la extracción de oro directamente de los sedimentos de los ríos (Ortuño & Flores, 2023).

Un gran porcentaje de esta actividad minera es realizado por cooperativas afiliadas a organizaciones como la Federación Regional de Cooperativas Mineras Auríferas (FERRECO) y la Federación de Cooperativas Mineras Auríferas del Norte de La Paz (FECOMAN). Sin embargo, muchas de estas cooperativas carecen de tecnología adecuada, recursos económicos y personal capacitado, lo que incrementa el riesgo ambiental y social (Ortuño & Flores, 2023).

Entre los principales impactos ambientales están, la contaminación del agua por mercurio, lo cual representa un riesgo para las fuentes hídricas y la salud de las comunidades, daños en los ecosistemas, pérdida de biodiversidad, modificaciones en el paisaje por la deforestación, el desvío de ríos y la remoción de sedimentos (Periódico urgente.bo, 2023).

El proyecto “Mi Cuenca, Mi Casa” impulsado por Cáritas Coroico, desde el año 2020 viene promoviendo acciones de conservación, sensibilización y limpieza en los municipios afectados por la actividad minera.

2.4.7 Sobre Caritas Coroico y el Proyecto “Mi cuenca, mi casa”

La Pastoral Social Caritas Coroico, es el brazo social de la Diócesis de Coroico, cuya jurisdicción abarca 5 provincias (Nor Yungas, Caranavi, Larecaja, Bautista Saavedra y Franz Tamayo) del departamento de La Paz. Desde 1987 viene realizando diversos proyectos autosostenibles en pro del desarrollo social mejorando la calidad de vida de muchas familias buscando siempre favorecer a la población en situación de desventaja como son: los niños, niñas, adultos mayores y mujeres.

El proyecto de gestión integral de los recursos hídricos del Río Coroico denominado “Mi cuenca, mi casa” surgió el año 2019 a partir del largo trabajo que Caritas Coroico venía realizando en las comunidades. Cáritas Coroico descubrió que la población local necesitaba urgentemente herramientas de planificación que le permitieran gestionar sus recursos de forma sostenible y con el apoyo de Cáritas Internacional y Cáritas Suiza, preparó un análisis participativo de los problemas y necesidades de la cuenca.

El proyecto comprende 3 fases, la primera se desarrolló del 2019 al 2020 en la cual en coordinación con el Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego se preparó un Plan Director de la Cuenca del Río Coroico (PDC-RC) (Ortuño & Flores, 2023). En el Plan Nacional de Cuencas (PNC) la cuenca del Río Coroico es clasificada como cuenca prioritaria por parte del Ministerio de Medio Ambiente y Agua. En la segunda fase desarrollada del 2020 al 2022 se elaboró el Plan Plurianual, se validó y aprobó el PDC y se inició su implementación.

En noviembre de 2022, se inició la tercera fase del proyecto que continuará hasta fines de abril de 2026. Esta fase se enfoca en la implementación del PDC-RC. Se pretende reforzar las capacidades técnicas, administrativas y sociales de autogestión de la cuenca para crear una gestión integrada de los recursos hídricos y, en última instancia, aumentar la resiliencia de los medios de vida de la población.

2.5 Teledetección y Análisis multitemporal

2.5.1 Teledetección

La teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. En un proceso de teledetección terrestre la información detectada es la que se obtiene mediante registro de sensores de la respuesta espectral o reflectancia de la superficie terrestre una vez iluminada (Montesdeoca, 2022).

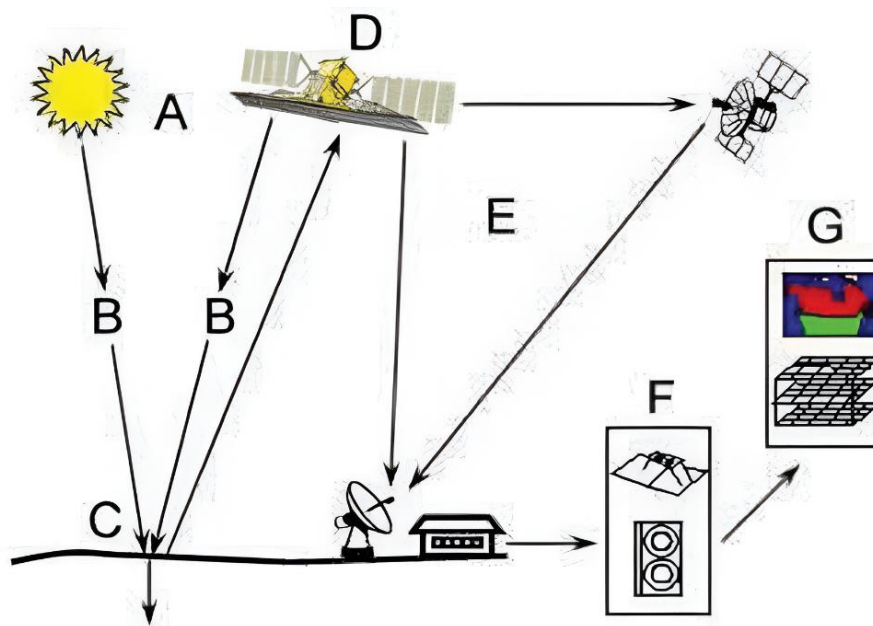
La superficie del planeta de acuerdo a su reflectancia puede dividirse en tres categorías estas son: superficie con agua, superficie con vegetación y suelos estas se diferencian entre ellas de acuerdo a la forma de reflejar la energía en las distintas longitudes de onda ya que dos superficies no son iguales, estas variaciones se pueden deber a factores físicos químicos y ambientales (Montesdeoca, 2022).

Los factores físicos principales son la temperatura, la humedad, la textura; los factores químicos son composición, contenido en materia orgánica y entre los principales factores ambientales están hora, fecha, orientación estación del año (Montesdeoca, 2022).

La figura 6 muestra como es el proceso de teledetección el cual tiene los siguientes componentes:

Figura 6

Diagrama del proceso de Teledetección



Fuente. Tomado de Aplicación de un algoritmo basado en morfología matemática a la extracción de zonas inundadas (Montesdeoca, 2022).

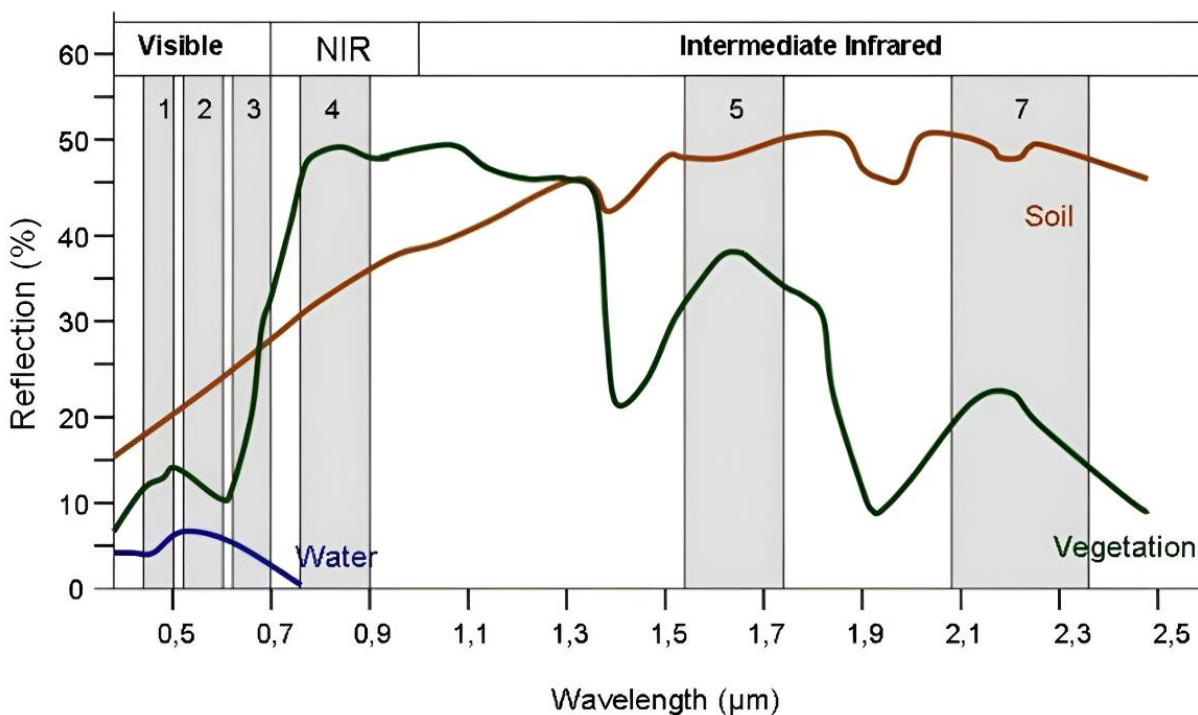
- A. Fuente de energía: En el planeta tierra es el sol, irradia energía que es devuelta por la superficie reflectante.
- B. Atmosfera: Parte de la radiación que emite la fuente y la que rebota de la superficie es absorbida por la atmosfera.
- C. Superficie reflectante: La superficie de estudio devuelve la energía y esta es posteriormente captada por un sensor.
- D. Sensor: Es un satélite que capta la energía reflejada por la superficie, pero estos también pueden poseer una fuente emisora de energía.
- E. Transmisión y procesamiento: La información que recopila el sensor es transferida a instalaciones como laboratorios.
- F. Análisis: En los laboratorios los datos recopilados se convierten en información útil.
- G. Aplicación: Los datos e información ya pueden ser utilizados por usuarios de ámbitos variados para aplicarlos en la investigación o resolución de problemas a nivel mundial.

2.5.1.2 Curva de reflectancia

La curva de reflectancia espectral muestra la relación entre el espectro electromagnético (representada en función de la longitud de onda o de la frecuencia) y el porcentaje de reflectancia asociado para cualquier material. Se representa en la figura 7 que representa las longitudes de onda en el eje horizontal y el porcentaje de reflectancia en el eje vertical.

Figura 7

Curva de reflectancia



Fuente. Tomado de NDVI, NDBI & NDWI Calculation, Bahadur, 2018.

2.5.2 Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales se constituyen en archivos digitales compuestos por una serie de píxeles, los cuales contienen valores numéricos específicos. Estos valores permiten diferenciar distintos tipos de imágenes satelitales, en función de sus características y propiedades (Fuentes, 2021).

Montesdeoca, 2022 indica que una característica importante es la resolución de las imágenes satelitales en el ámbito de la teledetección existen cuatro tipos de resolución los cuales son:

- **Resolución espacial:** Hace referencia a la capacidad que posee un sensor para diferenciar y captar objetos de menor tamaño en la superficie terrestre. Esta característica resulta esencial para determinar el nivel de detalle que puede brindar una imagen satelital. En este sentido, a menor dimensión del píxel, mayor será la calidad y precisión de la imagen obtenida.
- **Resolución espectral:** Indica a la cantidad y al rango de las bandas espectrales que un sensor es capaz de captar dentro del espectro electromagnético. En este sentido, a mayor número de bandas registradas por el sensor, más alta será su resolución espectral.
- **Resolución temporal:** hace referencia al intervalo de tiempo necesario para que un sensor complete un recorrido orbital y vuelva a capturar imágenes de una misma área. Esta característica permite conocer la frecuencia con la que se adquieren datos de un determinado lugar, siendo un aspecto fundamental para el análisis y monitoreo de los cambios que ocurren en un espacio geográfico a lo largo del tiempo.
- **Resolución radiométrica:** se define por la cantidad de bits que se requieren para almacenar la información de cada píxel. Mientras mayor sea el número de bits asignados, mayor será la capacidad del sensor para registrar con mayor precisión las variaciones de la respuesta espectral de un píxel.

2.5.2.1 Sentinel 2

La misión Sentinel-2, que forma parte del programa Copernicus, está compuesta por dos satélites gemelos denominados Sentinel-2A (lanzado el 2015) y Sentinel-2B (lanzado el 2017). Ambos satélites se encuentran ubicados en la misma órbita, pero separados entre sí por 180 grados, con el objetivo de optimizar la cobertura espacial y la recolección de datos. Gracias a esta configuración, es posible obtener imágenes de la superficie terrestre, grandes islas y áreas costeras cada cinco días (Montesdeoca, 2022).

El satélite ofrece una cobertura con un amplio campo de visión de 290 kilómetros, y una alta resolución de imágenes (10 metros, 20 metros y 60 metros) además está conformado por 13

bandas multiespectrales las cuales se encuentran dentro del espectro visible, infrarrojo cercano (VNIR) e infrarrojo de longitud de onda corta (SWIR). La figura 8 muestra a detalle las características mencionadas (Revel et. al, 2019; Montesdeoca, 2022).

Figura 8

Resolución espectral y espacial de Sentinel 2

| | SENTINEL 2 | |
|----------------------------------|------------------------------------|----------------|
| | Longitud de onda (μm) | Resolución (m) |
| Banda 1 - Aerosol | 0,43 - 0,45 | 60 |
| Banda 2 - Blue | 0,45 - 0,52 | 10 |
| Banda 3 - Green | 0,54 - 0,57 | 10 |
| Banda 4 - Red | 0,65 - 0,68 | 10 |
| Banda 5 - Red edge 1 | 0,69 - 0,71 | 20 |
| Banda 6 - Red edge 2 | 0,73 - 0,74 | 20 |
| Banda 7 - Red edge 3 | 0,77 - 0,79 | 20 |
| Banda 8 - Near Infrared (NIR) 1 | 0,78 - 0,90 | 10 |
| Banda 8A - Near Infrared (NIR) 2 | 0,85 - 0,87 | 20 |
| Banda 9 - Water vapour | 0,93 - 0,95 | 60 |
| Banda 10 - Cirrus | 1,36 - 1,39 | 60 |
| Banda 11 - SWIR 1 | 1,56 - 1,65 | 20 |
| Banda 12 - SWIR 2 | 2,10 - 2,28 | 20 |

Fuente. Tomado de Aplicación de un algoritmo basado en morfología matemática a la extracción de zonas inundadas, Montesdeoca, 2022.

2.5.2.2 Misión satelital Copernicus

El programa de Observación de la Tierra de la Comisión Europea (Copernicus), fue una propuesta e iniciativa europea presentada en octubre de 1998, con la finalidad de realizar un monitoreo global de la tierra orientado a Europa, en aspectos relacionados con el medio ambiente y la seguridad. Actualmente, este programa tiene como finalidad principal generar servicios de información operativa a nivel mundial, utilizando datos obtenidos tanto desde plataformas espaciales como terrestres, su fase inicial de exploración comenzó en el año 2001.

2.5.2.3 Google Earth Pro

Google Earth Pro es una herramienta desarrollada por Google, que permite la visualización de imágenes de la superficie terrestre en formatos bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D).

Este software presenta diversos beneficios frente a otras plataformas de visualización geográfica, ya que proporciona la posibilidad de observar el terreno desde diferentes ángulos y perspectivas. Asimismo, facilita la representación de características como la morfología del relieve, el uso del suelo y la inclinación del terreno (Suharini et al, 2020).

Google Earth Pro no se restringe al análisis de las condiciones actuales del terreno, sino que también posibilita el acceso a imágenes anteriores (históricas) lo que permite realizar un análisis en diferentes períodos de años y es utilizado para evaluar cambios en superficies terrestres y acuáticas (Suharini et al, 2020).

2.5.3 Análisis multitemporal

El análisis multitemporal se basa en la utilización de herramientas de teledetección, con el propósito de reconocer y evaluar las transformaciones que ocurren en un área determinada a lo largo del tiempo. Se lleva a cabo a partir del empleo de imágenes satelitales, y su análisis puede realizarse mediante distintos programas especializados como ArcGIS, ENVI, QGIS, SNAP. Es muy útil ya que permite detectar cambios entre diferentes fechas de referencia, deduciendo la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre ese medio (Muñoz, 2021; Figueredo, 2020).

2.5.3.1 Índice de Diferencia Normalizada de Agua

El Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) es uno de los indicadores más empleados en el ámbito de la teledetección, ya que permite identificar cuerpos de agua y estimar tanto el contenido de humedad presente en la vegetación, como el grado de saturación de agua en los suelos. El índice se obtiene de la diferencia entre los valores digitales del infrarrojo cercano y los del infrarrojo de onda corta (Alarcon & Rozo, 2020).

El cálculo del NDWI es posible mediante una ecuación matemática donde las variables son los valores de una o más bandas espectrales ubicadas en cada pixel. Diversos autores plantearon diferentes métodos para su cálculo. La ecuación 2 corresponde a al método de McFeeters la cual es adecuada para detectar coberturas acuosas en algoritmos basados en operaciones morfológicas. La ecuación 3 es la empleada en el Método de Gao la cual es más utilizada para el monitoreo de la vegetación en áreas afectadas por la sequía y su uso no está específicamente orientado a masas de agua (Montesdeoca, 2022).

- **NDWI Método de McFeeters**

$$\text{Ecuacion (2)} \quad NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Donde

NIR: Banda de infrarrojo cercano (Banda 3)

GREEN: Banda visible verde (Banda 8)

- **NDWI método de Gao**

$$\text{Ecuacion (3)} \quad NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Donde

NIR: Banda de infrarrojo cercano (Banda 8)

SWIR: Banda de radiación infrarroja de onda corta (Banda 11)

Las ecuaciones 2 y 3 para el cálculo de NDWI empleando imágenes satelitales provenientes de Sentinel 2 se traducen en las ecuaciones 4 y 5 (Montesdeoca, 2022).

- **NDWI Método de McFeeters (Sentinel 2)**

$$\text{Ecuacion (4)} \quad NDWI = \frac{Banda 3 - Banda 8}{Banda 3 + Banda 8}$$

- **NDWI método de Gao (Sentinel 2)**

$$\text{Ecuacion (5)} \quad NDWI = \frac{Banda 8 - Banda 11}{Banda 8 + Banda 11}$$

2.5.4 Software Qgis

Quantum GIS (QGIS) corresponde a un software de código abierto orientado a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el cual proporciona herramientas para la visualización, edición, gestión y análisis de información geoespacial. Al ser de código abierto su uso en proyectos es recomendable ya que no asigna costos por su uso además que posee una interfaz muy intuitiva. Es posible descargar la última versión de la página <https://qgis.org/download/> (Otavio, s.a.; Gutiérrez et al, 2024).

CAPÍTULO III

MARCO

METODOLÓGICO

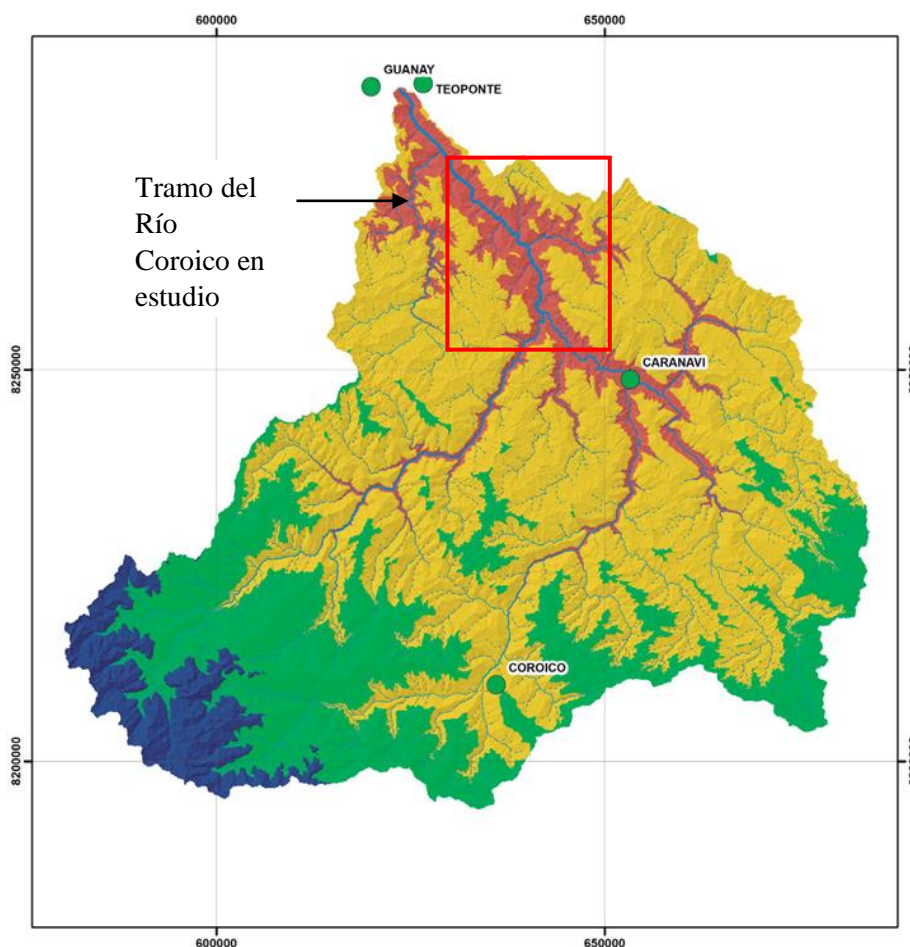
3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Zona de estudio

La figura 9 hace referencia a la ubicación de la zona de estudio que es un segmento del Río Coroico perteneciente a la Cuenca Coroico ubicada en el norte del departamento de La Paz, el tramo del río objeto de estudio se encuentra entre Caranavi (zona 19S, 653490.95, 8249155.21) a 976 msnm y Guanay (zona 19S, 620296.86, 8286449,86) a 432 msnm, mencionado tramo del río en estudio tiene una longitud aproximada de 60 Km.

Figura 9

Cuenca del Río Coroico, tramo del río en estudio



Fuente. Adaptado del Plan director de la cuenca del Río Coroico, Ortuño & Flores, 2023, Caritas Coroico.

3.2 Reconocimiento de actividades mineras

Para el desarrollo del presente proyecto, es fundamental identificar y cuantificar el número de consorcios mineros que operan activamente dentro del área de estudio. Para ello, junto con el equipo técnico de Caritas Coroico se llevó a cabo un recorrido a lo largo de la carretera principal que atraviesa la zona de estudio, con el propósito de observar, registrar y georreferenciar las distintas actividades mineras en operación. Este es un paso importante que permitió generar un mapa de actividades mineras activas dentro de la zona de estudio.

3.3 Selección de imágenes satelitales

En el estudio realizado por Rodríguez (2022) respecto a los efectos asociados al cambio del cauce del Río Amazonas en Colombia, abarcan una ventana de estudio de tiempo de 7 años desde el año 2015 hasta el año 2022 período con el cual obtuvieron resultados adecuados para su estudio. En el presente proyecto emplea un período general de estudio de 9 años entre los años del 2016 al 2024, período en el que el área de estudio presento mayor actividad minera.

Las características climáticas varían a lo largo del tiempo por lo que, la temporalidad climática es importante para el tipo de análisis que se pretende realizar, se definió un análisis de imágenes satelitales considerando la época seca (mayo a octubre) como época de interés de estudio ya que las actividades mineras se intensifican en esta época por el menor caudal del río, y la época de lluvia (noviembre a abril) como un análisis comparativo de los efectos geomorfológicos evidenciados (Fuentes, 2021).

Para la selección de imágenes satelitales es importante tomar en cuenta parámetros como la nubosidad, nivel de procesamiento y fecha de toma de imágenes las cuales serán consideradas en el momento de la descarga.

3.4 Adquisición de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales provenientes del satélite Sentinel 2 presentan mejores resoluciones en comparación a otros satélites, ya que este sensor ofrece una resolución espacial de 10*10 metros y además es una opción accesible económicamente y son recomendadas para la detección de zonas inundadas, el satélite fue lanzado en 2015 por lo que ofrece al proyecto nueve

años de imágenes satelitales, por todo lo mencionado en el estudio se trabaja con mencionado satélite (Fuentes, 2021; Monstesdeoca, 2022).

Las imágenes satelitales son obtenidas gracias a la misión Copernicus EMS que cuenta con una plataforma en la web <https://scihub.copernicus.eu/> de acceso bajo previo registro mediante la cual se puede acceder a diferente información satelital de todo el mundo (Fuentes, 2021).

La búsqueda y adquisición de imágenes depende de criterios como porcentaje de nubosidad, fechas, tipo de satélite, colección, nivel de procesamiento de la imagen, entre otros, para un adecuado análisis multitemporal es necesario obtener imágenes con un porcentaje de nubosidad menor al 20 % (Muñoz, 2021). Es posible realizar la descarga con el archivo del área de interés en formato KMZ/shape o mediante una búsqueda manual mediante el trazado de un polígono, para el proyecto se tiene el área de estudio en KMZ.

Para el análisis de NDWI se descargarán 4 escenas de satélite de manera anual dos para época seca y dos para época de lluvia, el número de escenas de satélite a descargar para un período de 9 años son 36 imágenes. Las características relevantes de las imágenes descargadas se manejarán de forma ordenada en tablas.

Las imágenes y los metadatos captados por los diferentes satélites pueden presentar errores de geometría y captación de niveles digitales, por lo cual se requiere procedimientos previos para su corrección de anomalías de localización y Niveles Digitales en los píxeles. Las imágenes Sentinel 2A descargadas cuentan con un nivel de procesamiento S2MSI2A lo que permite un estudio sin la necesidad de realizar una corrección en un preprocesado, reduciendo el coste computacional del proceso (Rodríguez, 2022; Mostesdeoca, 2022).

El sistema de referencia de coordenadas planas permite una representación más precisa de distancias y áreas. A nivel internacional el sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) es utilizado en casi todos los países por lo cual se trabajará en este formato de coordenadas (Cercarbono, s.a.).

3.5 Análisis multitemporal

Para realizar el análisis multitemporal que permite evaluar los cambios en el cauce del río a lo largo del tiempo en el proyecto se empleó el Software Qgis (versión 3.34.12) debido a que es

de acceso libre, con el cual se obtuvieron los valores del Índice NDWI mediante el álgebra de mapas. Lo cual permitió generar mapas de Distribución Anual del Índice NDWI histórico para la época seca y la época de lluvia que contemplan las principales zonas de cambio en la geomorfología.

Además, en base al análisis multitemporal del índice NDWI es posible generar un mapa de zonas antrópicas influenciadas por las operaciones de la actividad minera la cual presentará identificación asentamientos humanos y zonas agrícolas como base para proponer acciones a la comunidad local.

3.5.1 Cálculo del Índice NDWI

El Índice Diferencial del Agua Normalizado en tecnología remota es el más empleado para identificar y resaltar masas de agua, para su cálculo existen algunas ecuaciones de aplicación según la naturaleza del estudio, la ecuación (2) de McFeeters (1996) es óptima para estudios morfológicos de coberturas acuosas, en el proyecto se trabaja con mencionada ecuación (Alarcon & Rozo, 2020; Montesdeoca, 2022).

$$\text{Ecuacion (2)} \quad NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Fuente. Alarcon & Rozo, 2020

Donde:

NIR: Valores de pixel de la banda de infrarrojo cercano

GREEN: Valores de pixel de la banda visible de verde

Para el análisis de resultados es importante tomar en cuenta que los valores de NDWI obtenidos están enmarcados en rangos de interpretación según los valores obtenidos, en el proyecto se trabaja en base a los valores de clasificación citados por Alarcon & Rozo, 2020 (Tabla 2) ya que su investigación obtiene resultados adecuados para el análisis, además, que cuenta con una mayor cantidad de interpretación de rangos.

Tabla 2*Valores de clasificación del índice NDWI*

| | Rangos | Nivel | Interpretación |
|-----------|------------|-------|---|
| Muy altos | 0.61 a 1 | 5 | cuerpo de agua |
| Altos | 0.31 a 0.6 | 4 | Zona con elevada humedad, margen del cuerpo de agua |
| Medios | 0.01 a 0.3 | 3 | Zona húmeda, vegetación de ribera |
| Bajos | -0.6 a 0 | 2 | Suelo o vegetación con baja humedad |
| Muy bajos | -1 a -0.61 | 1 | Suelo seco y vegetación sin humedad |

Fuente. Adaptado de análisis multitemporal de la transformación del bosque tropical que influye en la desertificación del municipio de agua de Dios, Alarcón & Rozo, 2020.

3.5.2 Aplicación de álgebra de mapas en Qgis

Para el cálculo de NDWI, en el presente proyecto se emplea la técnica de álgebra de mapas para ello es importante comprender que la curva de reflectancia espectral el agua se encuentra en la banda Visible y de Infrarrojo Cercano (NIR), empleando imágenes provenientes del satélite Sentinel 2 la ecuación 1 se traduce en la ecuación 2 (Rodríguez, 2022).

$$\text{Ecuación (4)} \quad NDWI = \frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 8}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 8}}$$

Fuente. Montesdeoca, 2022.

En la tabla 3 se muestra un resumen de las longitudes de onda y resoluciones especiales de las bandas a emplearse en el proyecto.

Tabla 3*Características de bandas para el análisis de NDWI*

| Bandas | Nombre de Banda | Longitud de onda (μm) | Resolución (m) |
|---------|-----------------------|------------------------------------|----------------|
| Banda 3 | Green | 0.54 – 0.57 | 10 |
| Banda 8 | Near Infrared (NIR) 1 | 0.78 – 0.90 | 10 |

Fuente. Adaptado de Aplicación de un algoritmo basado en morfología matemática a la extracción de zonas inundadas en imágenes de satélites, Montesdeoca, 2022.

3.6 Mapas geológicos del área de estudio

En el desarrollo del proyecto se utiliza información cartográfica proporcionada por la Infraestructura de Datos Espaciales del Estado Plurinacional (IDE – EPB) una plataforma oficial que facilita el acceso a datos geoespaciales del país a través de la plataforma GeoBolivia, de donde se empleó la siguiente información:

- Mapa de límites departamentales de Bolivia.
- Mapa de localización de poblaciones en base a datos del Instituto Nacional de Estadística 2024.

La cuenca del Río Coroico a través del Plan director de la Cuenca cuenta con una caracterización geográfica elaborada por técnicos de Caritas Coroico además de mapas biofísicos, topográficos, ambientales, y socioeconómicos los cuales son de acceso libre en su Geoportal en la web: <https://www.cuencacoroico.org/>. Para la realización del proyecto la siguiente información geográfica fue proporcionada por Caritas Coroico en formato shapefile:

- Mapa de la cuenca del Río Coroico (nivel 9).
- Mapa de frontera agrícola de la cuenca realizado en base a datos del Instituto Nacional de Reforma Agraria (INRA) 2018.
- Mapa de Unidades Educativas en base a datos del Ministerios de Educación, Deporte y Cultura 2020.
- Centros de salud en base a datos del Ministerio de Salud 2016.

3.7 Parámetro geomorfológico Sinuosidad

Uno de los parámetros geomorfológicos más importantes asociados a un río meándrico es el índice de Sinuosidad (SI) que puede ser empleado para evaluar el cambio de meandros de un río empleando la ecuación (1) citada en el marco teórico, para el proyecto esta variable será evaluada en QGIS de forma manual y por segmentos con la herramienta medir línea, el cálculo será realizado en las secciones que presenten mayor impacto (Muñoz, 2021).

Los datos obtenidos se representaron en gráficas de la variación de la sinuosidad en diferentes segmentos del río en los que se detectó mayor cambio del índice NDWI.

3.9 Análisis de variación superficial del río y desplazamiento de riberas

Con las imágenes obtenidas de NDWI histórico es posible realizar el análisis de expansión del cauce del río en diferentes años, lo que permitió identificar una variación en la superficie del río empleando las ecuaciones 6 y 7 y el desplazamiento de las riberas en ciertos sectores. El área de expansión de cauce del río fue calculada en Qgis con la herramienta calcular geometría y para el análisis de desplazamiento de riberas se midieron las longitudes de diferentes segmentos del cauce a lo largo de las principales zonas de cambio (Rodríguez, 2022).

$$\text{Ecuación (6)} \quad \text{Incremento} = A_f - A_i$$

$$\text{Ecuación (7)} \quad \% \text{ Incremento} = \left(\frac{A_f - A_i}{A_i} \right) * 100$$

Donde

A_f : Area del rio en el periodo final

A_i : Area del rio en el periodo inicial

Los datos obtenidos se representaron en graficas de la variación de la superficie del río a lo largo del tiempo y graficas de desplazamiento de las riberas en puntos específicos.

3.10 Procedimiento metodológico en Qgis

En el presente estudio se empleó el software Qgis como herramienta fundamental para el análisis y procesamiento de datos espaciales a través de las diferentes herramientas que ofrece. Entre las herramientas más importantes para el proyecto está el algebra de mapas para la generación de mapas del índice NDWI.

Para iniciar el tratamiento de las imágenes satelitales, las treinta y seis imágenes ráster descargadas de banda 3 y 8 fueron cargadas en Qgis, para su posterior ajuste a un tamaño adecuado con la opción cortar ráster por capa teniendo como capa máscara el área de estudio. Posteriormente se evaluó de forma visual las imágenes satelitales para corroborar que ninguna nube atravesase el río ya que podría interferir en el análisis del índice NDWI.

Para el cálculo del índice NDWI se aplicó la herramienta algebra de mapas mediante la calculadora de ráster que permite realizar operaciones matemáticas con las bandas en 3 y 8 en base a la ecuación de Mcfeters.

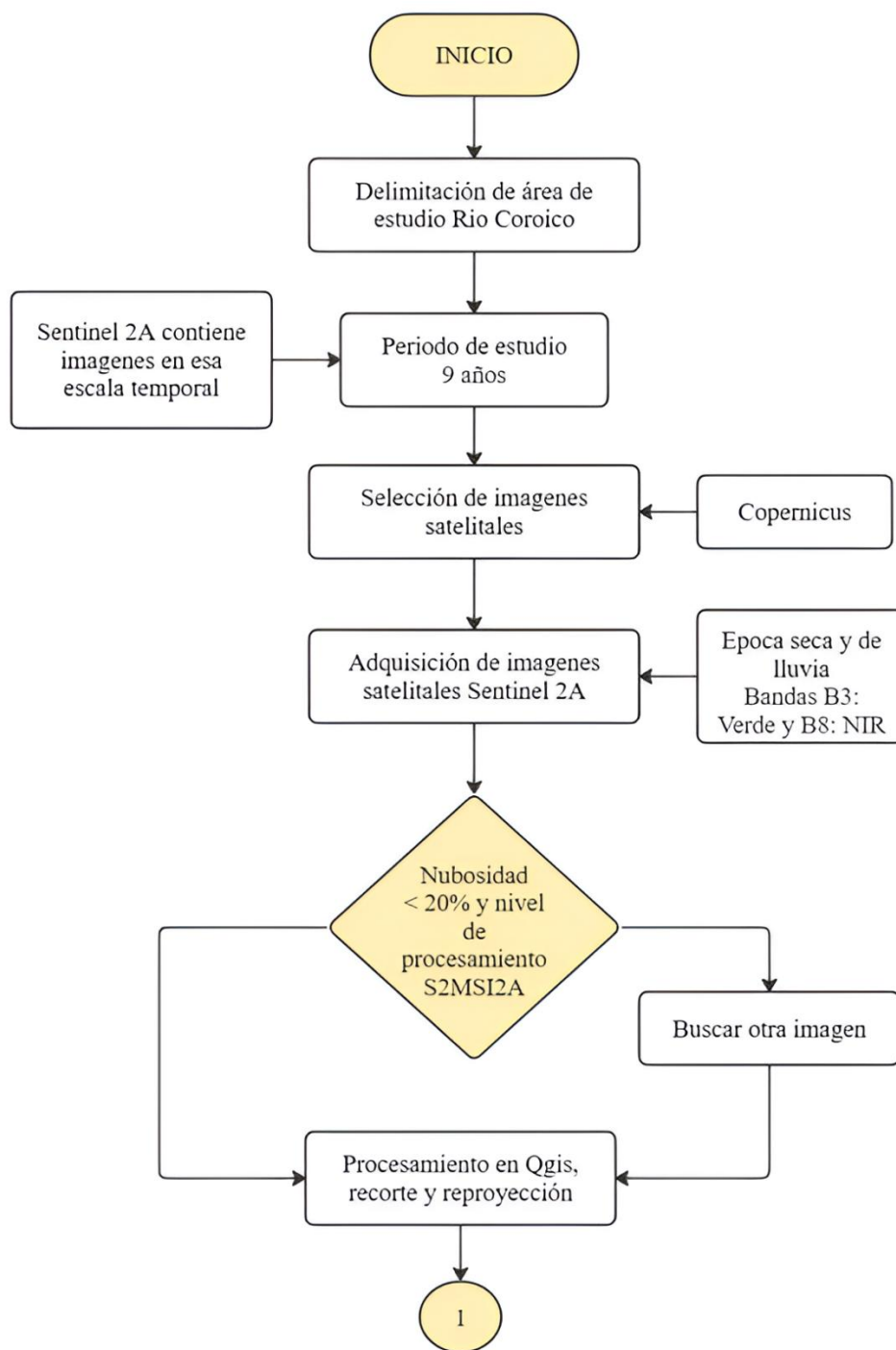
Además, se empleó la herramienta reescalar raster la cual permitirá tener un rango de valores adecuado al índice NDWI que varía entre -1 y +1, con la opción reclasificar por tablas los valores obtenidos se estandarizaran a los valores de clasificación del índice NDWI descritos en la Tabla 2.

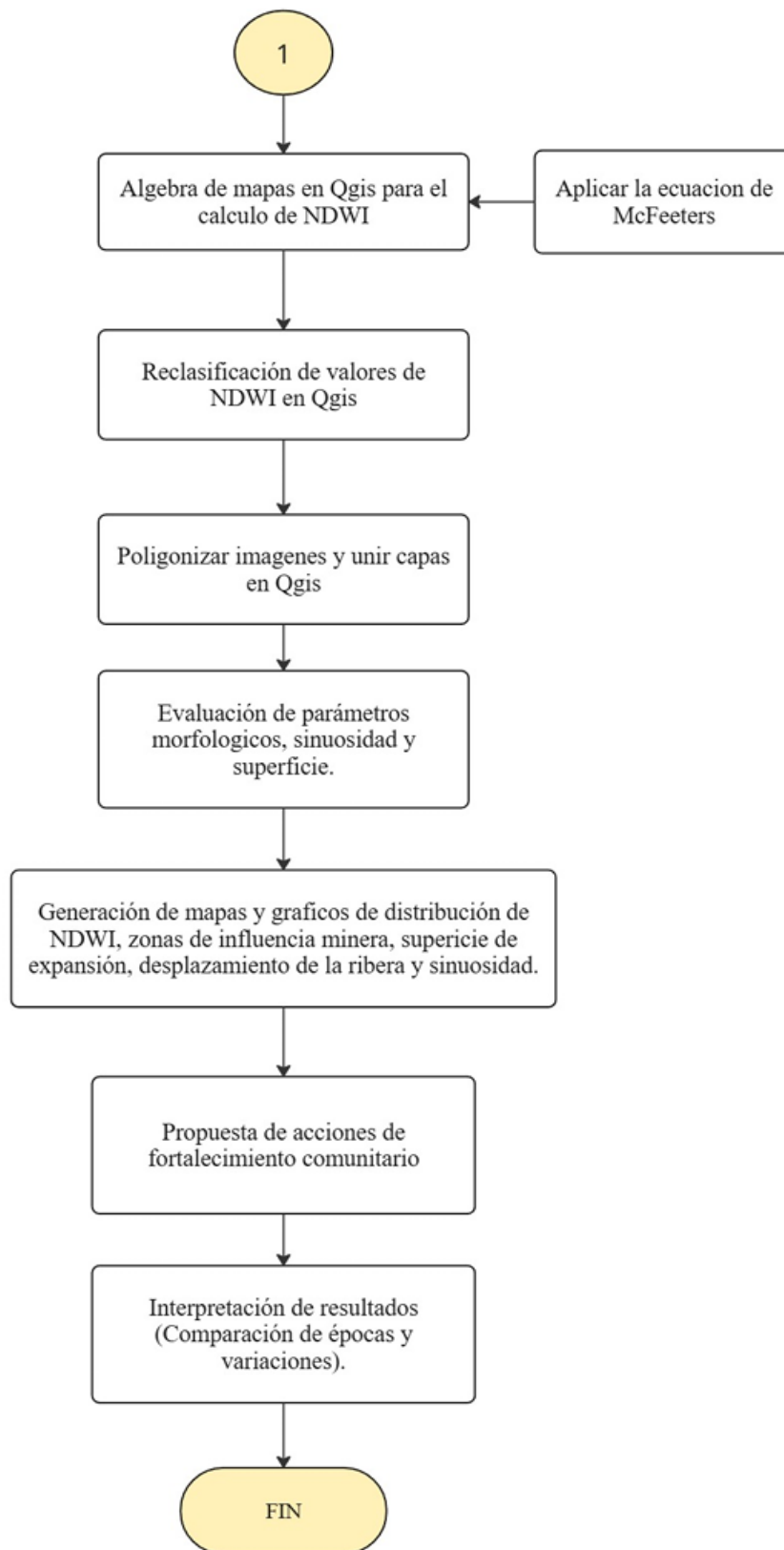
Para suavizar las curvas de las imágenes se pasó de ráster a vector mediante la herramienta poligonizar, para posteriormente ser sometidas al proceso disolver para la obtención de un nuevo shape que contemple solamente los niveles de los rangos con los que se está trabajando. Para realizar el análisis multitemporal se empleó la herramienta unir capas vectoriales que permitió visualizar el comportamiento del río y la ribera en diferentes años en una misma capa.

Las principales zonas de cambio geomorfológico en el río se evaluaron superponiendo los NDWI correspondientes a cuerpos de agua lo cual debe ser contrarrestada con la observación en el recorrido para la identificación de minas activas en el área. Finalmente, para la construcción de mapas, Qgis tiene la herramienta crear composición de impresión la cual nos dota de un lienzo en blanco para el diseño. La figura 10 muestra el diagrama de flujo de toda la parte metodológica del proyecto.

Figura 10

Diagrama de flujo del procedimiento metodológico





Fuente. Elaboración propia

CAPÍTULO IV

CÁLCULOS Y

RESULTADOS

4. CÁLCULOS Y RESULTADOS

4.1 Reconocimiento de actividades mineras

En fecha 14 de noviembre con los técnicos encargados del proyecto “Mi cuenca Mi casa” se realizó un recorrido por el tramo de estudio para la identificación de actividades mineras activas en la zona, con la identificación visual se procedió a la georreferenciación y toma de fotografías obteniéndose los datos de la Tabla 4.

Tabla 4

Coordenadas geográficas de cooperativas mineras en operación 2024

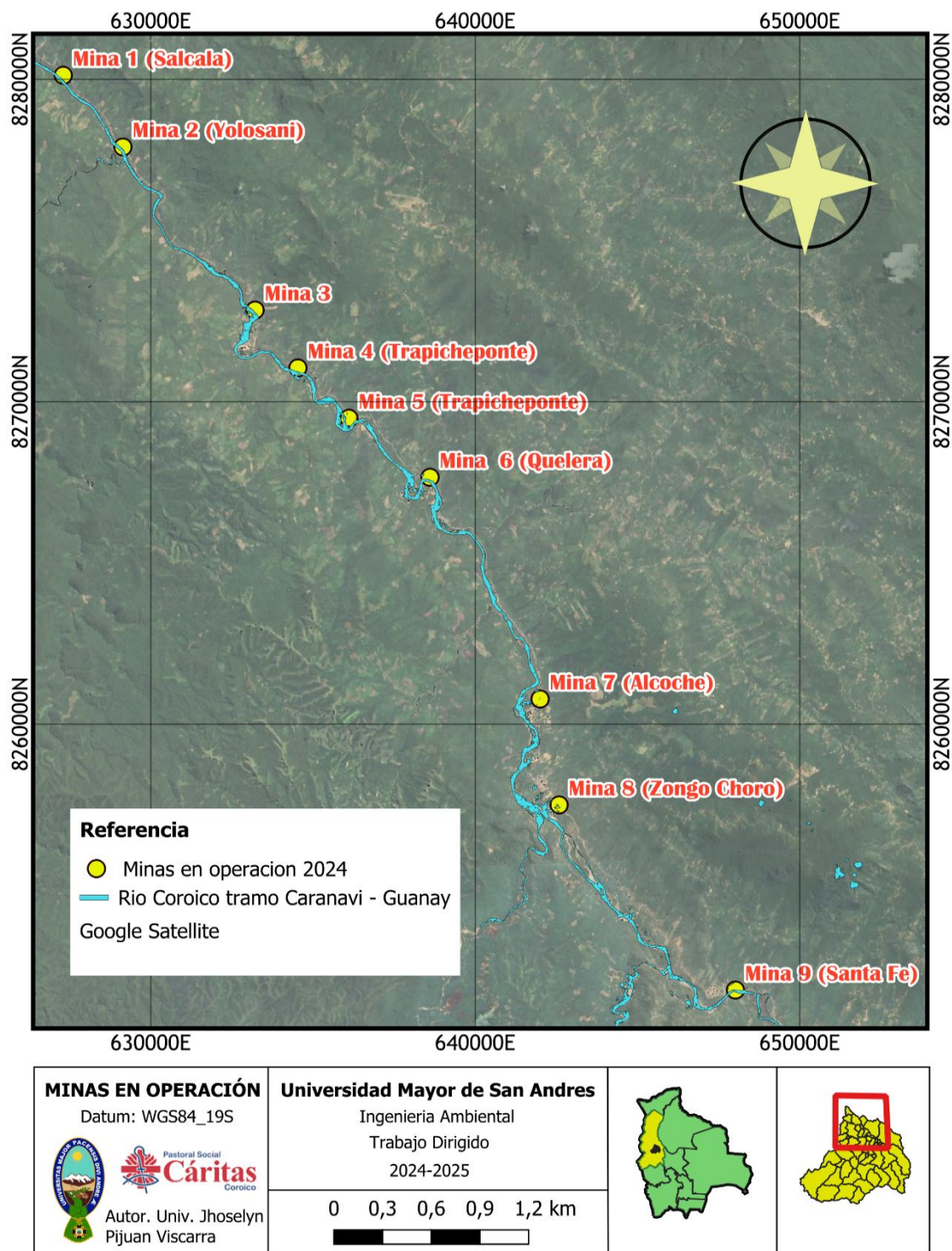
| Minas | Comunidad | UTM | Latitud | Longitud |
|--------|---------------|------|---------|----------|
| Mina 1 | Salcala | 19 L | 627301 | 8280122 |
| Mina 2 | Yolosani | 19 L | 629140 | 8277900 |
| Mina 3 | s/n | 19 L | 633212 | 8272841 |
| Mina 4 | Trapicheponte | 19 L | 634531 | 8271048 |
| Mina 5 | Trapicheponte | 19 L | 636105 | 8269487 |
| Mina 6 | Quelera | 19 L | 638604 | 8267655 |
| Mina 7 | Alcoche | 19 L | 641996 | 8260780 |
| Mina 8 | Zongo Choro | 19 L | 642581 | 8257496 |
| Mina 9 | Santa Fe | 19 L | 648016 | 8251754 |

Fuente. Elaboración propia

Con la georreferenciación de las cooperativas es posible mediante Qgis construir el mapa de actividades mineras en operación (figura 11), el cual permitió identificar un total de nueve minas en operación a lo largo del tramo del Río Coroico, entre Caranavi y Guanay. De estas, siete se encuentran ubicadas en los meandros del río, lo que sugiere una alta interacción entre la actividad minera y la dinámica fluvial.

Figura 11

Actividades mineras en operación en el tramo Caranavi – Guanay del Río Coroico



Fuente. Elaboración propia

4.2 Descarga de imágenes satelitales

Los metadatos y características necesarios para el estudio correspondientes a las imágenes satelitales Sentinel 2A descargadas a través de la plataforma Copernicus EMS se describen en las tablas 5 y 6.

Tabla 5

Características de imágenes satelitales descargadas para la época seca

| Nº | Fecha de emisión | Fecha de descarga | Peso (MB) | Nubosidad (%) | Bandas | Nivel de procesamiento |
|----|------------------|-------------------|-----------|---------------|--------|------------------------|
| 1 | 01/09/2016 | 21/11/2024 | 274 | 0.41 | 3-8 | S2MSI2A |
| 2 | 07/08/2017 | 21/11/2024 | 279 | 19.48 | 3-8 | S2MSI2A |
| 3 | 12/08/2018 | 21/11/2024 | 278 | 12.41 | 3-8 | S2MSI2A |
| 4 | 07/08/2019 | 21/11/2024 | 274 | 0.20 | 3-8 | S2MSI2A |
| 5 | 10/09/2020 | 21/11/2024 | 269 | 8.88 | 3-8 | S2MSI2A |
| 6 | 06/08/2021 | 21/11/2024 | 276 | 6.03 | 3-8 | S2MSI2A |
| 7 | 21/08/2022 | 21/11/2024 | 274 | 1.14 | 3-8 | S2MSI2A |
| 8 | 16/08/2023 | 21/11/2024 | 275 | 3.70 | 3-8 | S2MSI2A |
| 9 | 21/07/2024 | 21/11/2024 | 275 | 1.18 | 3-8 | S2MSI2A |

Fuente.Elaboración propia

Tabla 6

Características de imágenes satelitales descargadas para la época de lluvia

| N ^a | Fecha de emisión | Fecha de descarga | Peso (MB) | Nubosidad (%) | Bandas | Nivel de procesamiento |
|----------------|------------------|-------------------|-----------|---------------|--------|------------------------|
| 1 | 31/10/2016 | 21/11/2024 | 272 | 13.79 | 3-8 | S2MSI2A |
| 2 | 29/01/2017 | 21/11/2024 | 277 | 18.64 | 3-8 | S2MSI2A |
| 3 | 14/05/2018 | 23/11/2024 | 280 | 28.09 | 3-8 | S2MSI2A |
| 4 | 09/04/2019 | 21/11/2024 | 279 | 23.07 | 3-8 | S2MSI2A |

| N ^a | Fecha de emisión | Fecha de descarga | Peso (MB) | Nubosidad (%) | Bandas | Nivel de procesamiento |
|----------------|------------------|-------------------|-----------|---------------|--------|------------------------|
| 5 | 19/12/2020 | 21/11/2024 | 277 | 22.81 | 3-8 | S2MSI2A |
| 6 | 25/10/2021 | 23/11/2024 | 273 | 9.53 | 3-8 | S2MSI2A |
| 7 | 29/11/2022 | 21/11/2024 | 258 | 6.20 | 3-8 | S2MSI2A |
| 8 | 15/09/2023 | 23/11/2024 | 277 | 19.66 | 3-8 | S2MSI2A |
| 9 | 11/06/2024 | 23/11/2024 | 277 | 11.45 | 3-8 | S2MSI2A |

Fuente. Elaboración propia

4.3 Procesamiento de imágenes en Qgis

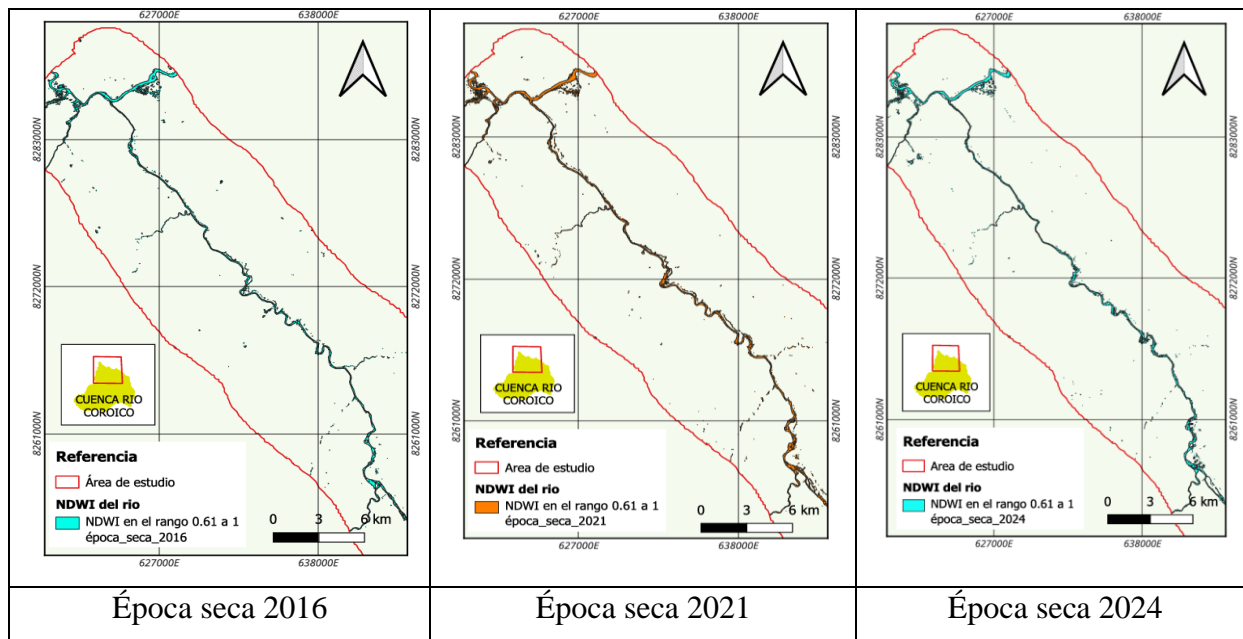
El procesamiento de imágenes satelitales en Qgis permitió generar los mapas necesarios para el análisis del índice NDWI (las herramientas utilizadas se detallan en el apartado metodológico del proyecto) se generaron mapas de NDWI para cada época y para cada año del período de estudio. En la época de lluvia no se tomó en cuenta el año 2019 debido a la alta nubosidad que cubría secciones del río.

El proceso de generación de NDWI anual es el primer paso para generar un análisis de NDWI histórico, en el estudio se realizó el proceso para la época seca y de lluvia, en las figuras 12 y 13 se puede observar el comportamiento del índice NDWI para tres años en específico 2016, 2021 y 2024, mencionados años resultaron importantes para el estudio ya que los años 2021 y 2024 son años en los que se observó un mayor cambio en la geomorfología del río y el año 2016 se considera un año base en el estudio, ya que en ese período la actividad minera era baja, permitiendo su uso como referencia para evaluar los cambios posteriores en la geomorfología.

Las figuras 12 y 13 permiten observar que el análisis del índice NDWI anual asignó valores entre 0.61 a 1 al río, lo que corresponde a la clasificación de cuerpos de agua. Es importante mencionar que el espacio de interés de estudio es únicamente el río y el espacio adyacente de ribera.

Figura 12

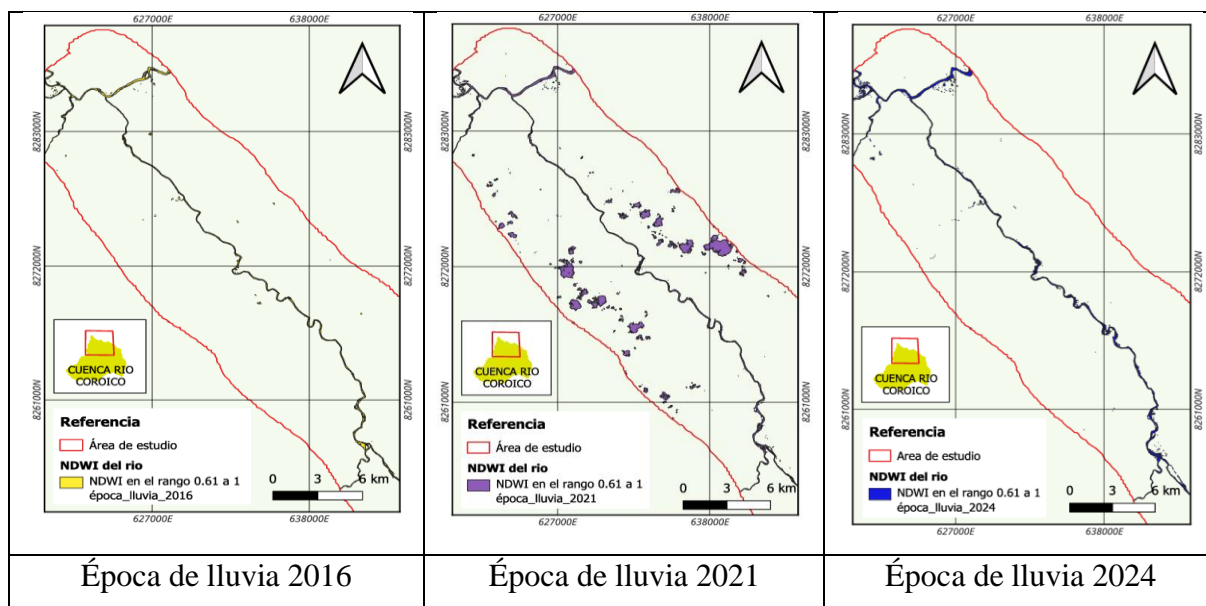
Índice diferencial de agua normalizado NDWI por año para la época seca



Fuente. Elaboración propia

Figura 13

Índice diferencial de agua normalizado NDWI por año para la época de lluvia



Fuente. Elaboración propia

Es importante aclarar que en la imagen satelital correspondiente al año 2021, durante la época de lluvias (Figura 3), se identifican ciertas manchas, estas son atribuibles a la presencia de nubes, fueron interpretadas por el programa como zonas con valores similares de NDWI. Sin embargo, dado que dichas nubes no cubren el cauce del río, su presencia no interfiere en el análisis del estado del cuerpo de agua.

4.4 Análisis de NDWI histórico en el río

Los resultados del cálculo del NDWI anual junto con la georreferenciación de las minas son fundamentales para identificar las zonas de mayor cambio en la morfología del río.

Según el análisis del índice NDWI a lo largo de los nueve años, de las 9 minas activas identificadas las que actualmente presentan mayor incidencia en el río son las minas 3,5,6 y 7, lo mencionado también es respaldado por la observación directa realizada el día del recorrido para la georreferenciación de minas activas, corroborado por comunicación personal del equipo de Cáritas Coroico.

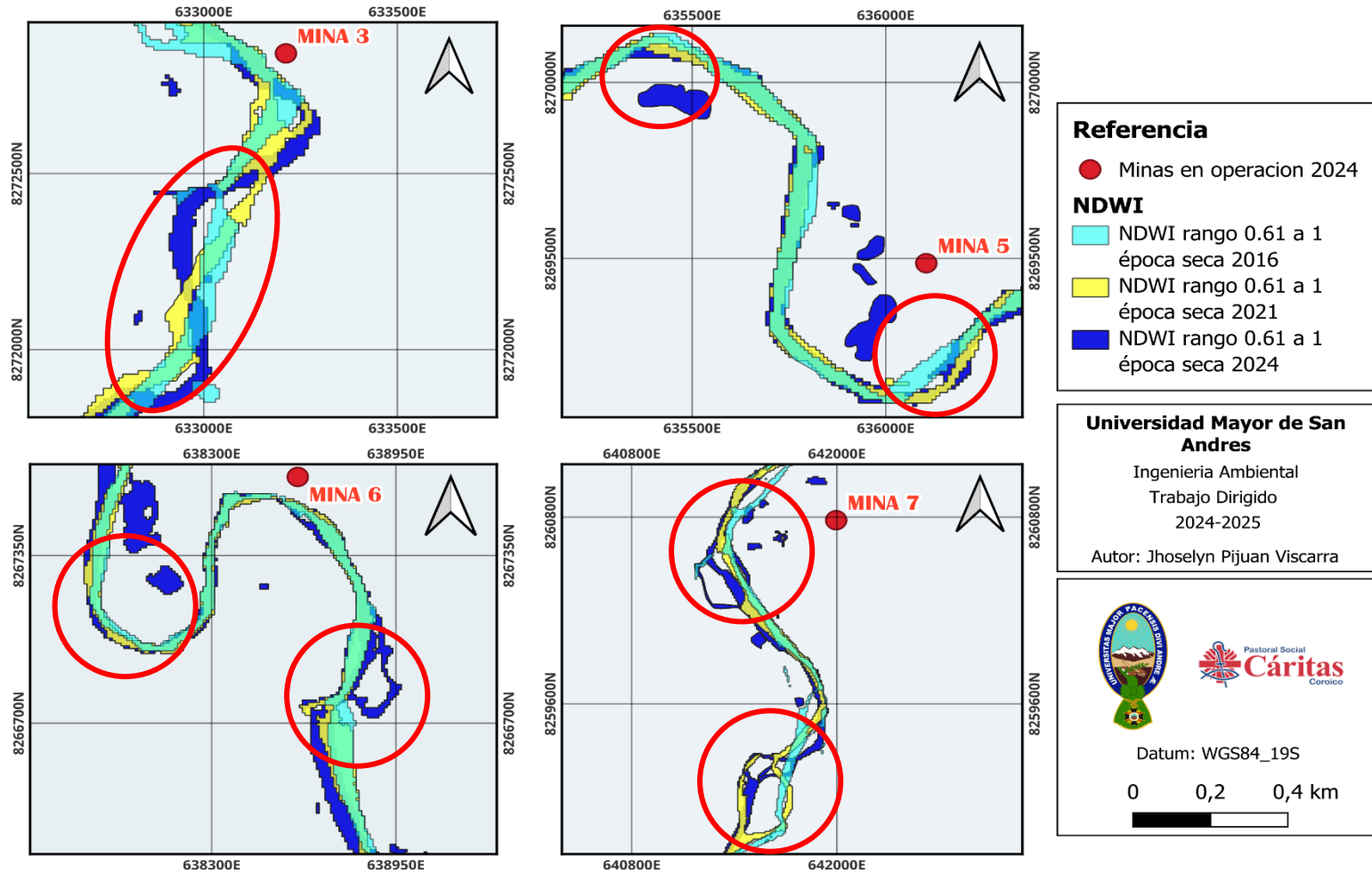
Para tener un mayor respaldo se realizó un análisis multitemporal en Google Earth llegando a observar que en los cuatro puntos con mayor incidencia minera el auge de la actividad es a partir del 2020 y 2021. En ese sentido el presente estudio realizó el análisis multitemporal en base a los años 2016, 2021 y 2024 y las principales zonas de cambio (minas 3,4,6 y 7).

Las figuras 14 y 15 fueron generadas superponiendo el comportamiento del río a través de los años siendo la capa base el año 2016 y la capa superior el año 2024, únicamente tomando en cuenta las cuatro minas que presentan mayor incidencia. En mencionadas figuras se observa que un rango de NDWI entre 0.61 a 1 representa al río y se marcó con círculos rojos las zonas donde se observa un mayor cambio. Además, se identifican cuerpos de agua artificiales, como las piscinas generadas por la actividad minera, que aparecen en color azul y corresponden al año 2024.

En la Figura 15, correspondiente a la época de lluvia se observa que el flujo del río es mayor. Durante este período, el cauce normal del río sea más amplio debido al incremento de la precipitación.

Figura 14

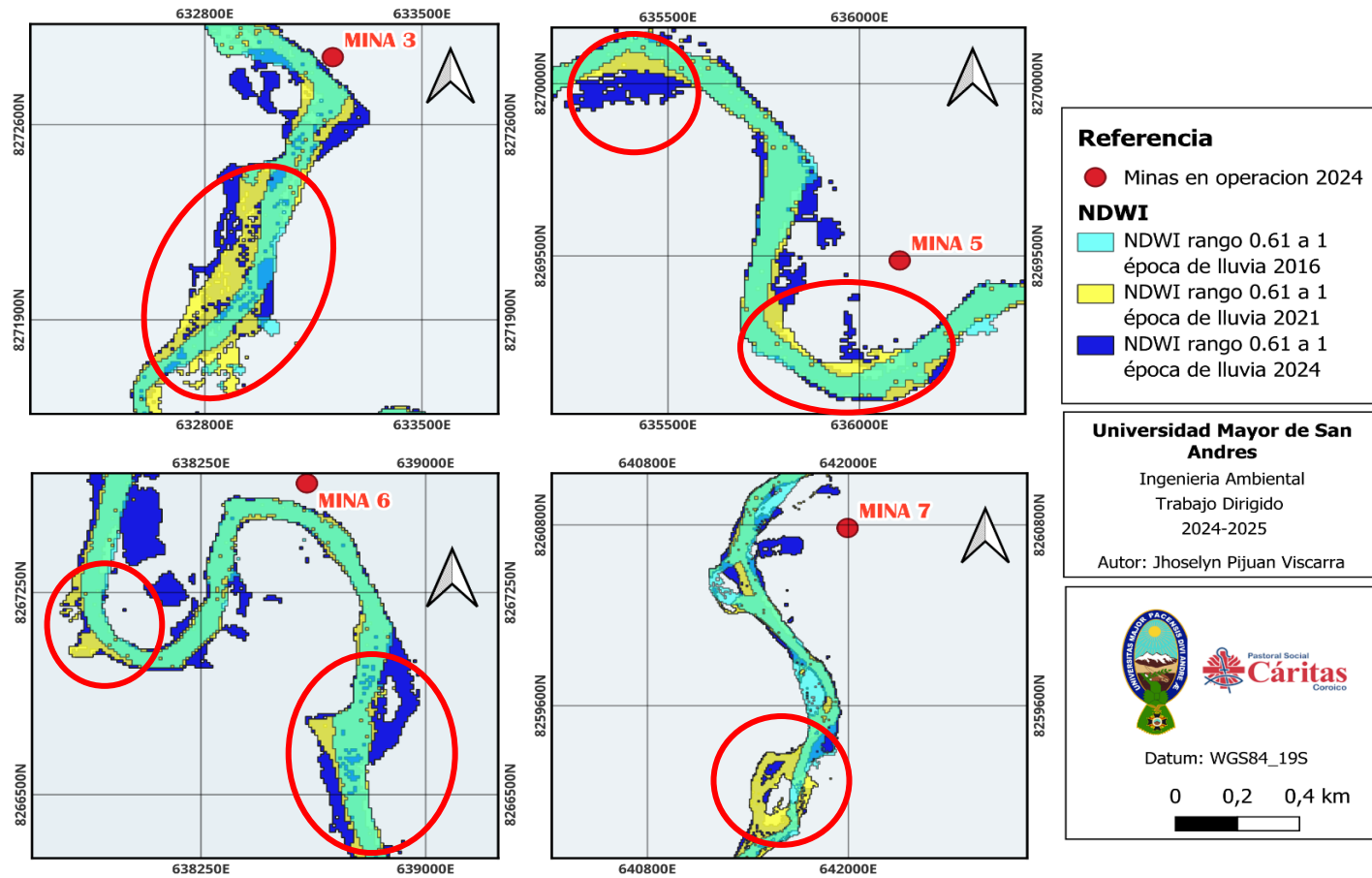
Principales zonas de cambio geomorfológico en el río durante la época seca



Fuente. Elaboración propia

Figura 15

Principales zonas de cambio geomorfológico en el río durante la época de lluvia



Fuente. Elaboración propia

4.5 Análisis de variación de la superficie ocupada por el río

En este apartado, se comparan las variaciones en la superficie del cauce fluvial en los años 2016, 2021 y 2024 (años que mayor cambio presentan en la geomorfología) con un enfoque en aquellas zonas donde la actividad minera es más intensa. Para ello, se presentan los gráficos 1 y 2 que son producto de los datos registrados en las tablas 7 y 8 considerando la época seca y la época de lluvia. Este análisis permite identificar el impacto de las actividades mineras a lo largo del tiempo.

Tabla 7

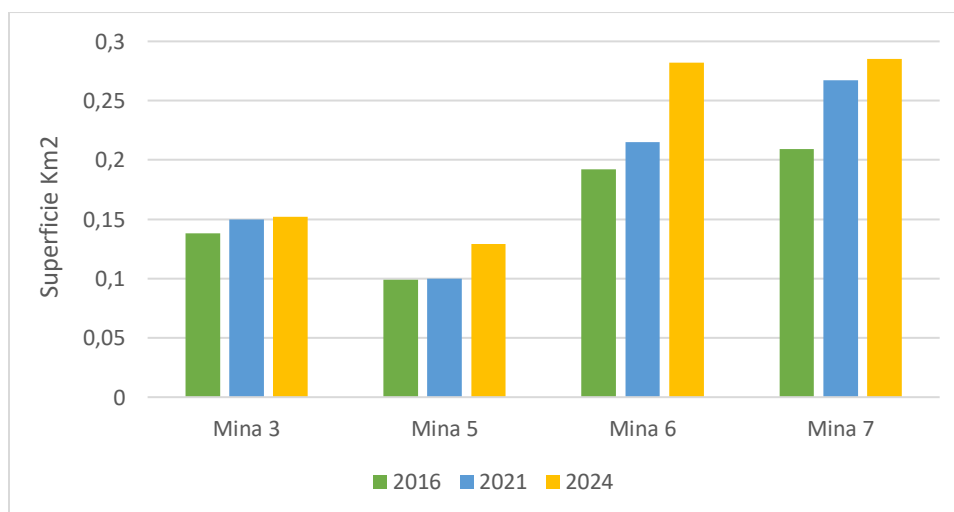
Variación de la superficie ocupada por el río a lo largo del tiempo – Época seca

| Año | Superficie [Km^2] | | | |
|------|-----------------------|--------|--------|--------|
| | Mina 3 | Mina 5 | Mina 6 | Mina 7 |
| 2016 | 0.138 | 0.099 | 0.192 | 0.209 |
| 2021 | 0.150 | 0.100 | 0.215 | 0.267 |
| 2024 | 0.152 | 0.129 | 0.282 | 0.285 |

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 1

Variación de la superficie ocupada por el río a lo largo del tiempo – Época seca



Fuente. Elaboración propia

En el Gráfico 1, se observa la variación de la superficie del río a lo largo del tiempo para la época seca, la superficie cubierta por el agua muestra un incremento progresivo desde 2016 hasta 2024, siendo este cambio particularmente notable en las áreas correspondientes a Mina 6 y Mina 7.

Tabla 8

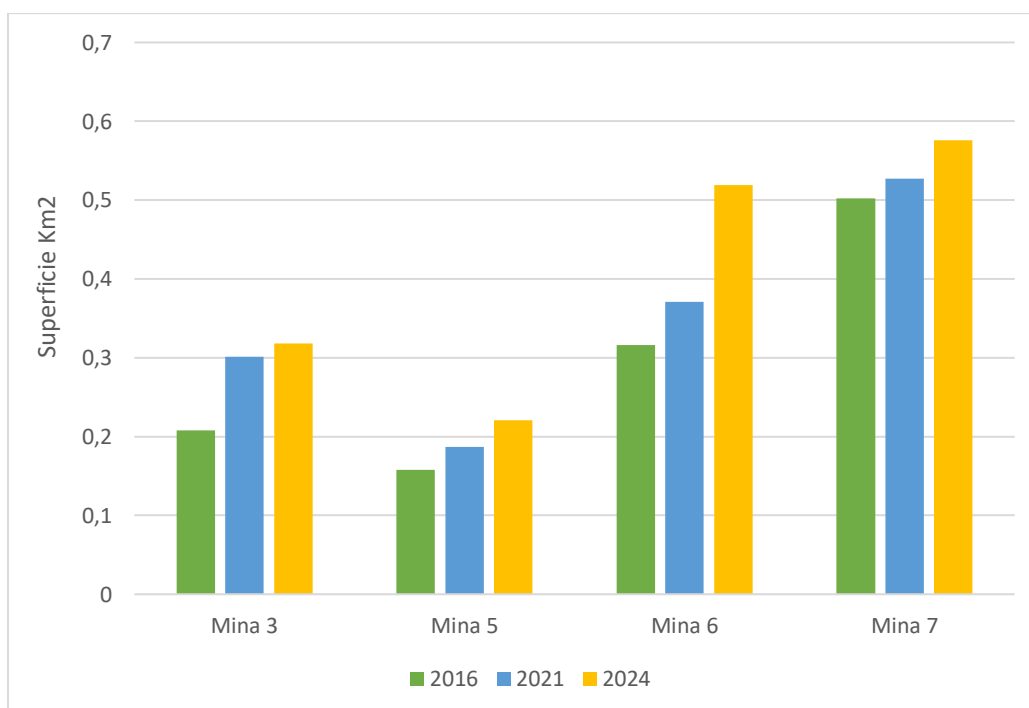
Variación de la superficie ocupada por el río a lo largo del tiempo – Época de lluvia

| Año | Superficie [Km ²] | | | |
|------|-------------------------------|--------|--------|--------|
| | Mina 3 | Mina 5 | Mina 6 | Mina 7 |
| 2016 | 0.208 | 0.158 | 0.316 | 0.502 |
| 2021 | 0.301 | 0.187 | 0.371 | 0.527 |
| 2024 | 0.318 | 0.221 | 0.519 | 0.576 |

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 2

Variación de la superficie ocupada por el río a lo largo del tiempo – Ép. de lluvia



Fuente. Elaboración propia

En el Gráfico 2, correspondiente al análisis durante la época de lluvias, se observa un incremento en la superficie del río similar al registrado en la época seca, con un aumento progresivo cada año. Sin embargo, en este período, el crecimiento de la superficie cubierta por agua es aún más evidente debido a la mayor incidencia de precipitaciones. Al igual que en la época seca, las áreas que presentan el mayor incremento son Mina 6 y Mina 7.

Por otra parte, para comparar los cambios en el tiempo del área de forma cuantitativa, se calculó el porcentaje de incremento de los años 2021 y 2024 respecto al año 2016 empleando la ecuación 3 y se obtuvieron los resultados de las tablas 9 y 10.

Tabla 9

Incremento de la superficie ocupada por el río para la época seca

| MINA | Incremento Km2 | | Incremento % | |
|--------|----------------|-------|--------------|--------|
| | 2021 | 2024 | 2021 | 2024 |
| Mina 3 | 0.012 | 0.014 | 8.70% | 10.14% |
| Mina 5 | 0.001 | 0.030 | 1.01% | 30.30% |
| Mina 6 | 0.013 | 0.080 | 6.44% | 39.60% |
| Mina 7 | 0.058 | 0.076 | 27.75% | 36.36% |

Fuente. Elaboración propia

Tabla 10

Incremento de la superficie ocupada por el río para la época de lluvia

| MINA | Incremento Km2 | | Incremento % | |
|--------|----------------|-------|--------------|--------|
| | 2021 | 2024 | 2021 | 2024 |
| Mina 3 | 0.093 | 0.110 | 44.71% | 52.88% |
| Mina 5 | 0.029 | 0.063 | 18.35% | 39.87% |
| Mina 6 | 0.055 | 0.203 | 17.41% | 64.24% |
| Mina 7 | 0.025 | 0.074 | 4.98% | 14.74% |

Fuente. Elaboración propia

Las tablas 8 y 9 muestran el incremento porcentual del área del río en las cuatro zonas principales de cambio y los valores obtenidos revelan un incremento en la superficie del cauce en

comparación con el año base 2016, tanto en la época seca como en la época de lluvias. Durante la época seca, se observa un incremento notable en las áreas correspondientes a Mina 6 y Mina 7, donde el crecimiento alcanza hasta 36.36% en 2021 y 27.36% en 2024 en el caso de la Mina 7.

Por otro lado, en la época de lluvias, el aumento de la superficie cubierta por agua es aún más pronunciado, con algunas zonas mostrando incrementos superiores al 50%, lo que se debe a las altas precipitaciones y el consecuente incremento del caudal del río, fenómeno esperado en este período. Sin embargo, un aspecto particular es que, la mina 7 a pesar de ser la mina con mayor expansión, no muestra un aumento significativo en la superficie del río durante la época de lluvias, registrando apenas un 4.98% en 2021 y 14.34% en 2024.

4.6 Calculo de Sinuosidad SI

Para completar el análisis de cambio geomorfológico en el río, se realizó el cálculo de la sinuosidad en las principales zonas de cambio, considerando tanto la época seca (Tabla 11 y gráfico 3) como la época de lluvia (Tabla 12 y gráfico 4), en los años y zonas definidos para el estudio.

Tabla 11

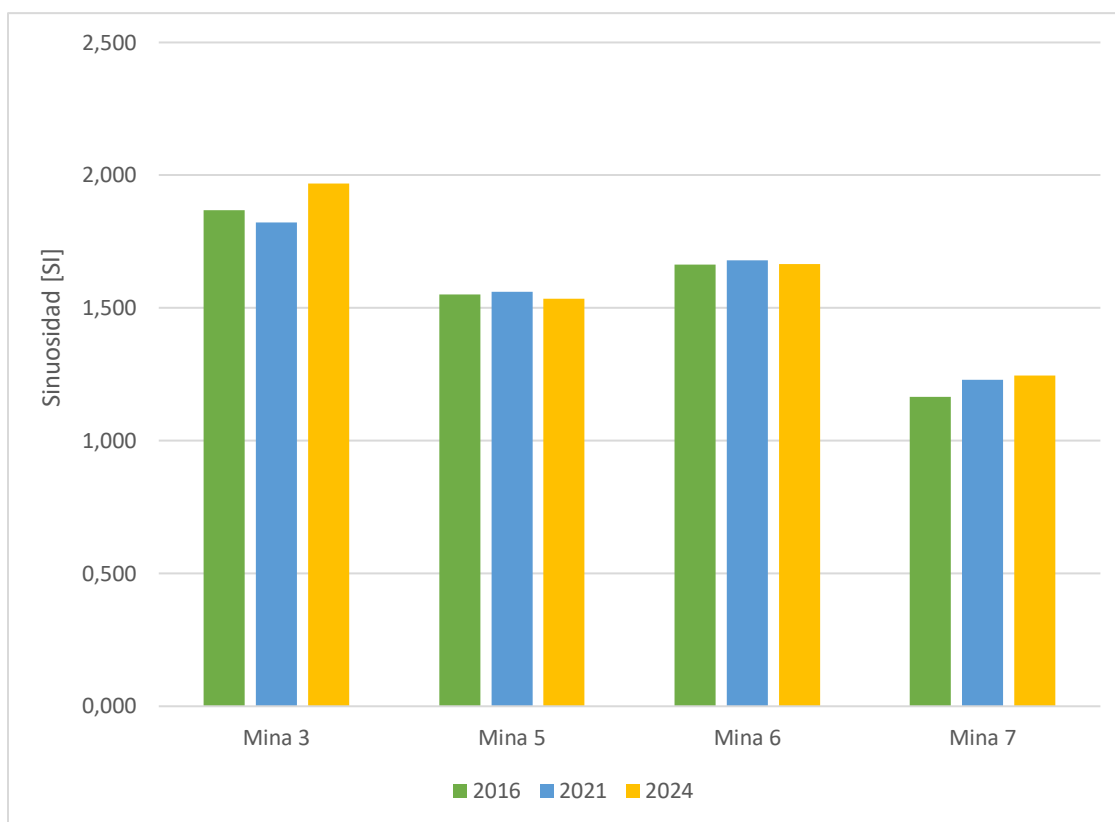
Análisis de variación de sinuosidad del río para la época seca

| Año | Sinuosidad [SI] | | | |
|---------------|-----------------|--------|--------|--------|
| | Mina 3 | Mina 5 | Mina 6 | Mina 7 |
| 2016 | 1.868 | 1.551 | 1.663 | 1.164 |
| 2021 | 1.821 | 1.562 | 1.680 | 1.231 |
| 2024 | 1.968 | 1.535 | 1.666 | 1.246 |
| Cambio SI [%] | 5.394 | -1.065 | 0.154 | 6.993 |

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 3

Variación de sinuosidad del río en las principales zonas de cambio – Época seca



Fuente. Elaboración propia

Tabla 12

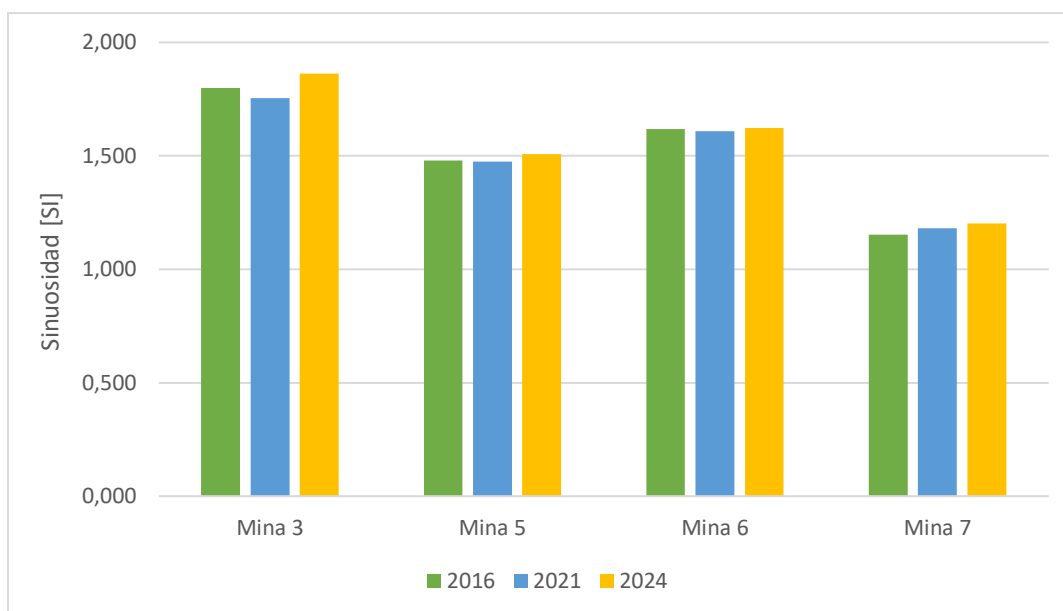
Análisis de variación de sinuosidad del río para la época de lluvia

| Año | Sinuosidad [SI] | | | |
|---------------|-----------------|--------|--------|--------|
| | Mina 3 | Mina 5 | Mina 6 | Mina 7 |
| 2016 | 1.800 | 1.480 | 1.618 | 1.152 |
| 2021 | 1.754 | 1.476 | 1.608 | 1.181 |
| 2024 | 1.863 | 1.507 | 1.622 | 1.203 |
| Cambio SI [%] | 3.508 | 1.872 | 0.270 | 4.377 |

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 4

Variación de sinuosidad del río en las principales zonas de cambio – Ép. de lluvia



Fuente. Elaboración propia

Las gráficas 3 y 4 muestran la variación de la sinuosidad a lo largo del tiempo en las cuatro zonas principales de cambio, en el diagrama de barras es posible observar que no hay una variación significativa de esta variable, pero calculando el porcentaje de cambio (Tablas 7 y 8) hay variaciones hasta del 6% en la forma del cauce.

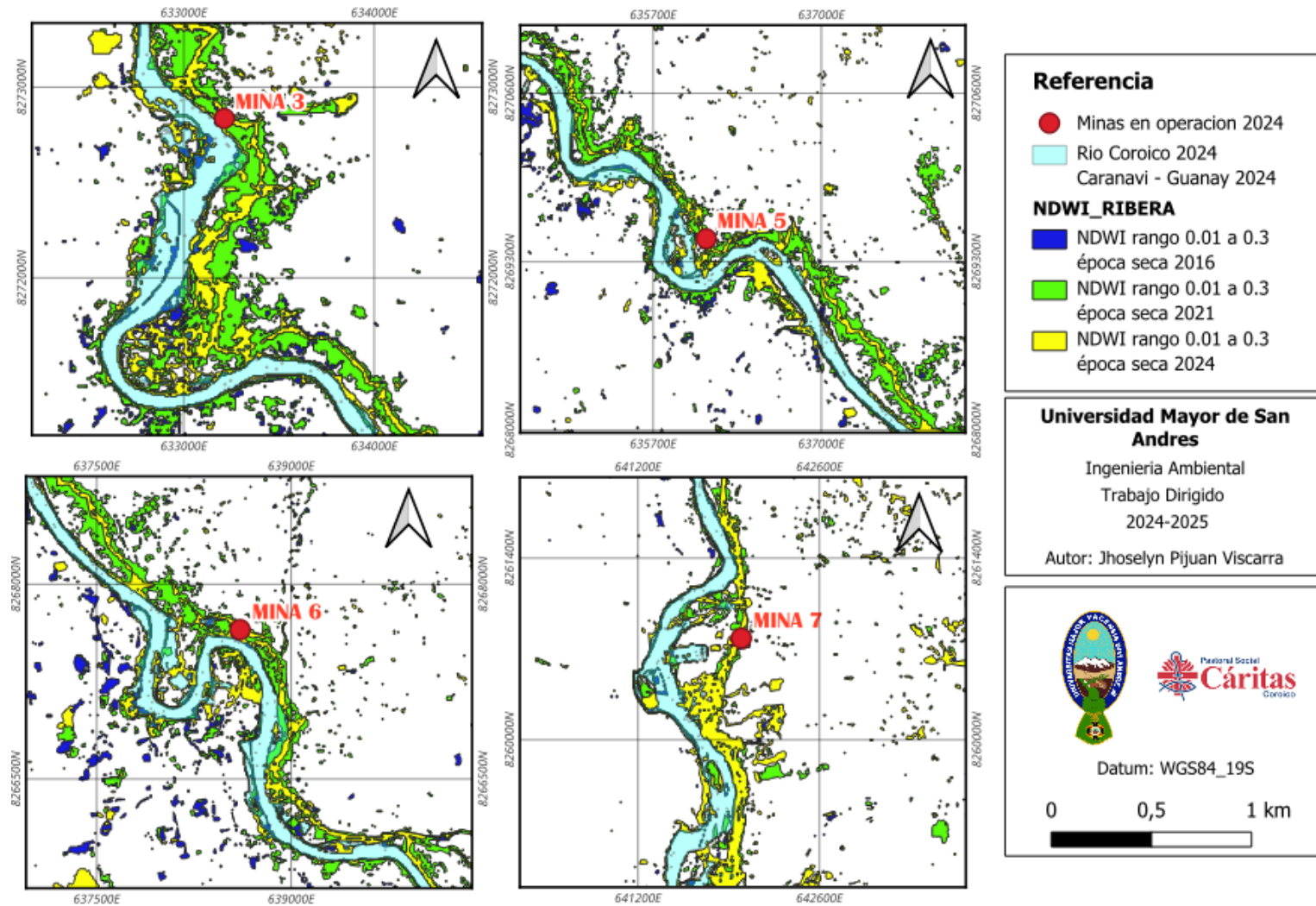
4.7 Análisis de NDWI histórico en las riberas

Por otra parte, para el análisis de las riberas se trabajó de forma similar superponiendo el NDWI solamente de las riberas de los años 2016, 2021 y 2024 también se incluyó la capa del río para el año 2024 para poder observar mejor el comportamiento de la ribera de forma histórica.

El análisis fue realizado para época seca y de lluvia los cuales se observan en la figura 16 y 17 respectivamente, también es posible observar que las riberas recibieron una clasificación de NDWI en el rango de 0.01 a 0.3 lo cual se interpreta como zona de ribera con elevada humedad, cabe mencionar que los espacios en el área blanca que tomaron el color correspondiente al NDWI de algún año son zonas con la misma humedad, pero no son ribera.

Figura 16

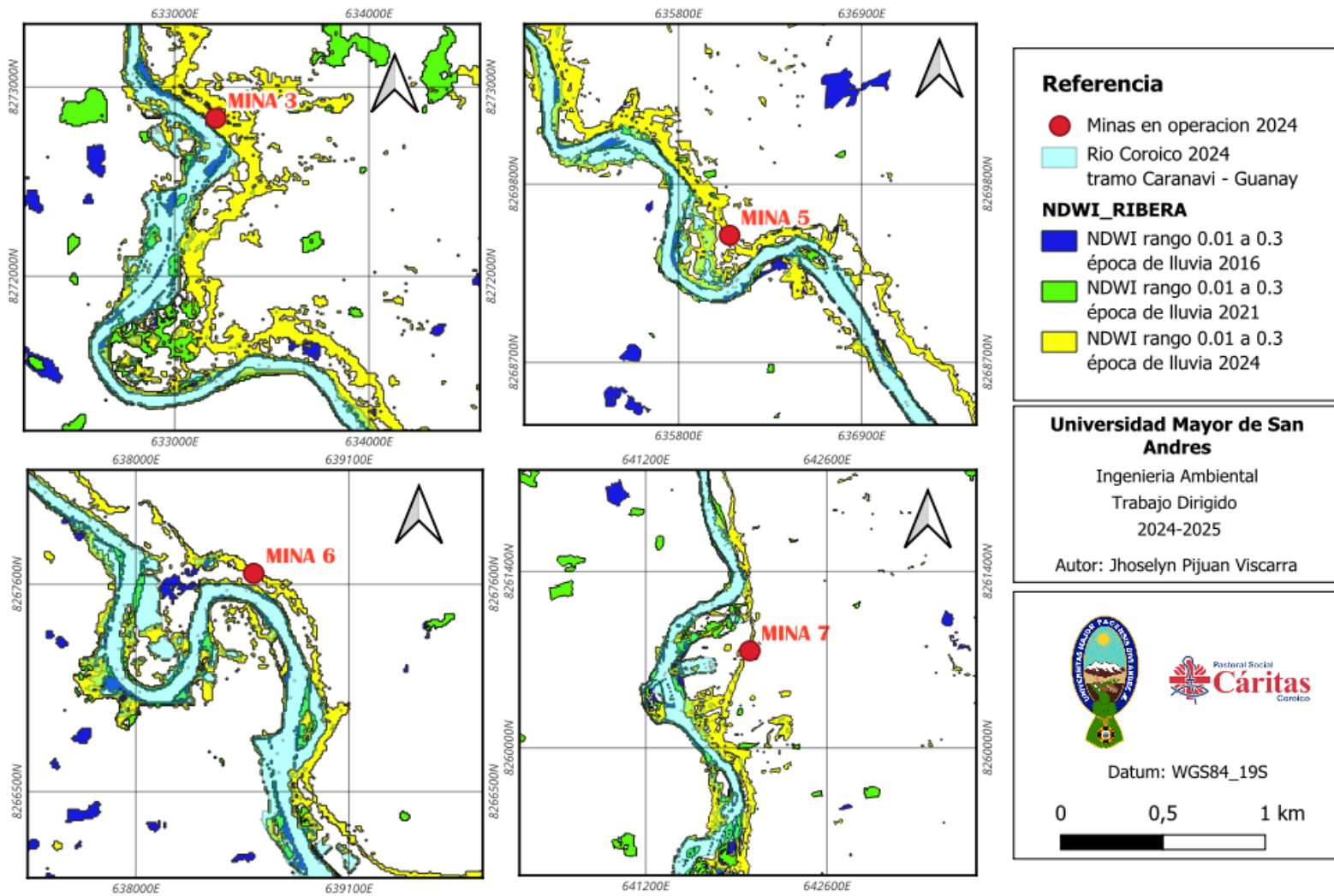
Índice diferencial de agua normalizado histórico (NDWI) - ribera época seca



Fuente. Elaboración propia

Figura 17

Índice diferencial de agua normalizado histórico (NDWI) - ribera época de lluvia



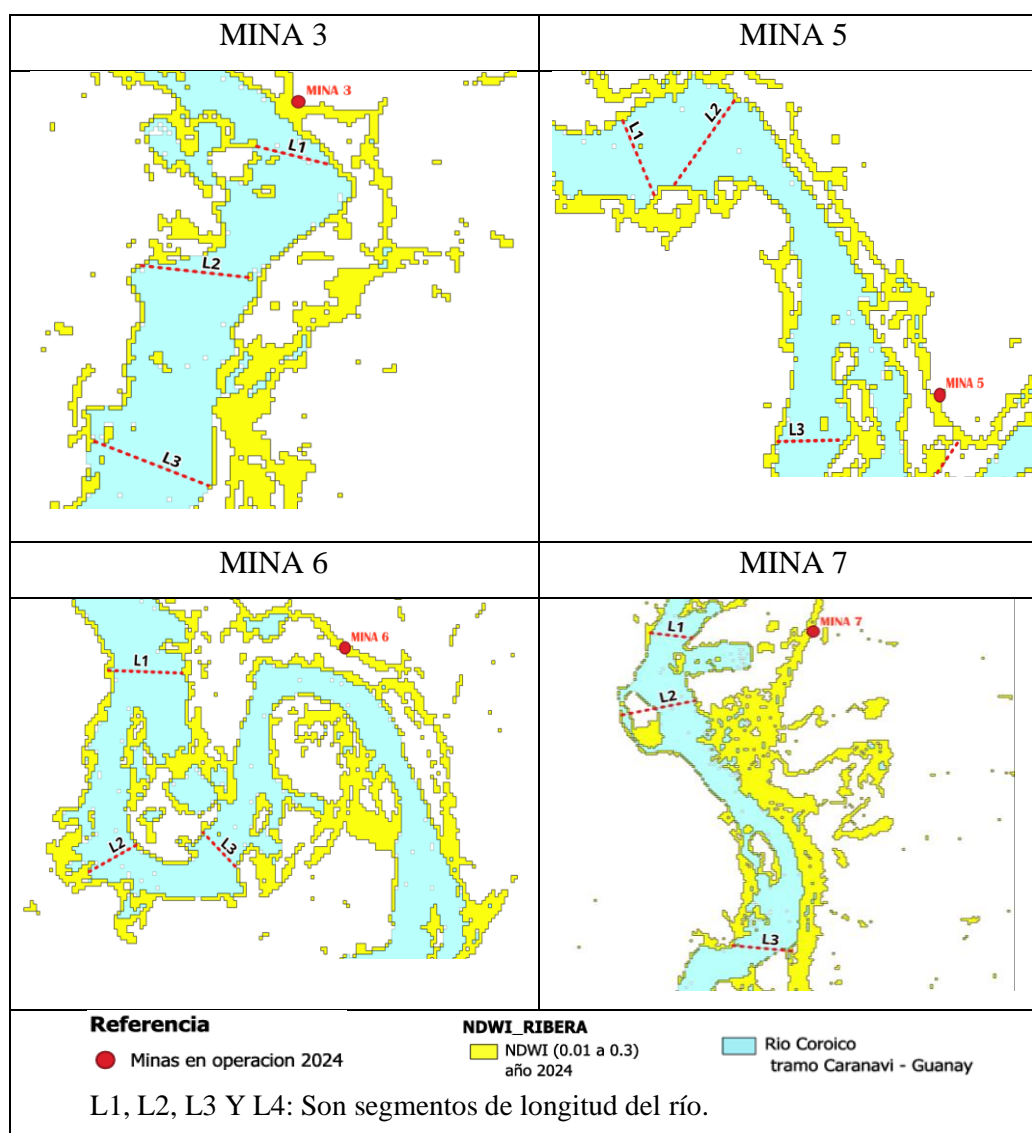
Fuente. Elaboración propia

4.8 Análisis de desplazamiento de la ribera

Para este análisis se seleccionaron diferentes puntos a lo largo del río donde se observaron cambios significativos. Se escogieron tres puntos representativos en las cuatro zonas de cambio, y en cada uno de estos puntos se realizó una medición a lo largo del tiempo, la figura 18 simplemente es un esquema de lo que se hizo el cual muestra las longitudes medidas a lo largo del cauce del río para el año 2024 como ejemplificación .

Figura 18

Longitudes de expansión de la ribera para el año 2024



Fuente. Elaboración propia

Las tablas 13,14,15 y 16 con sus correspondientes graficas 5,6,7 y 8 respectivamente muestran la evolución de las mediciones de las longitudes de expansión en puntos específicos en la zona de estudio para la época seca. En este caso se consideraron los nueve años para una mejor comprensión.

Tabla 13

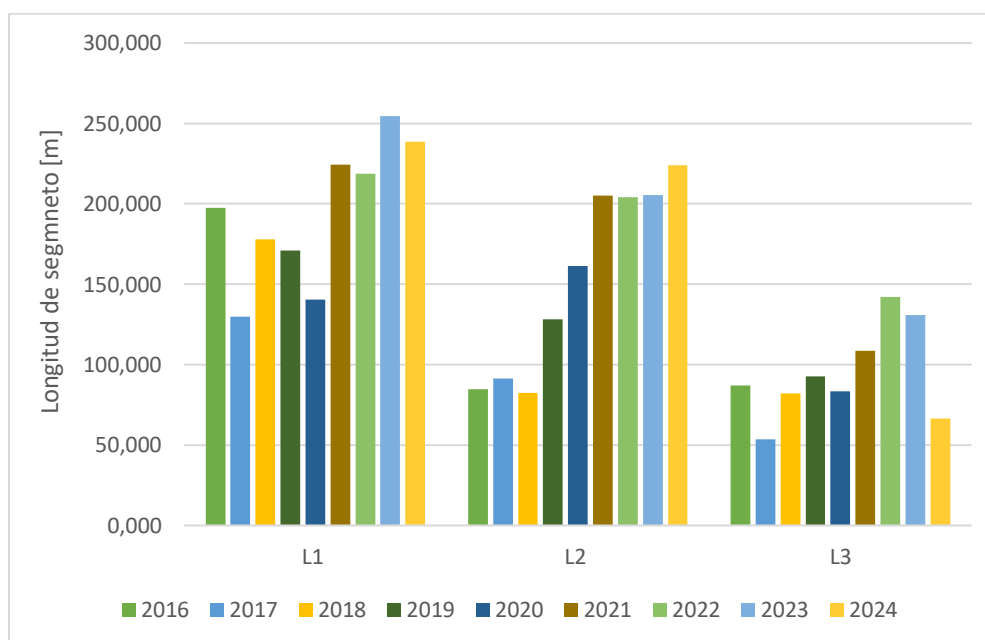
Medición de la variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 3

| Longitud [m] | AÑO | | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| L1 | 197.473 | 129.860 | 177.762 | 170.948 | 140.493 | 224.209 | 218.739 | 254.669 | 238.454 |
| L2 | 84.685 | 91.368 | 82.368 | 128.102 | 161.297 | 204.989 | 203.987 | 205.492 | 224.016 |
| L3 | 87.174 | 53.653 | 82.140 | 92.761 | 83.272 | 108.492 | 141.996 | 130.755 | 66.514 |

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 5

Variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 3



Fuente. Elaboración propia

Tabla 14

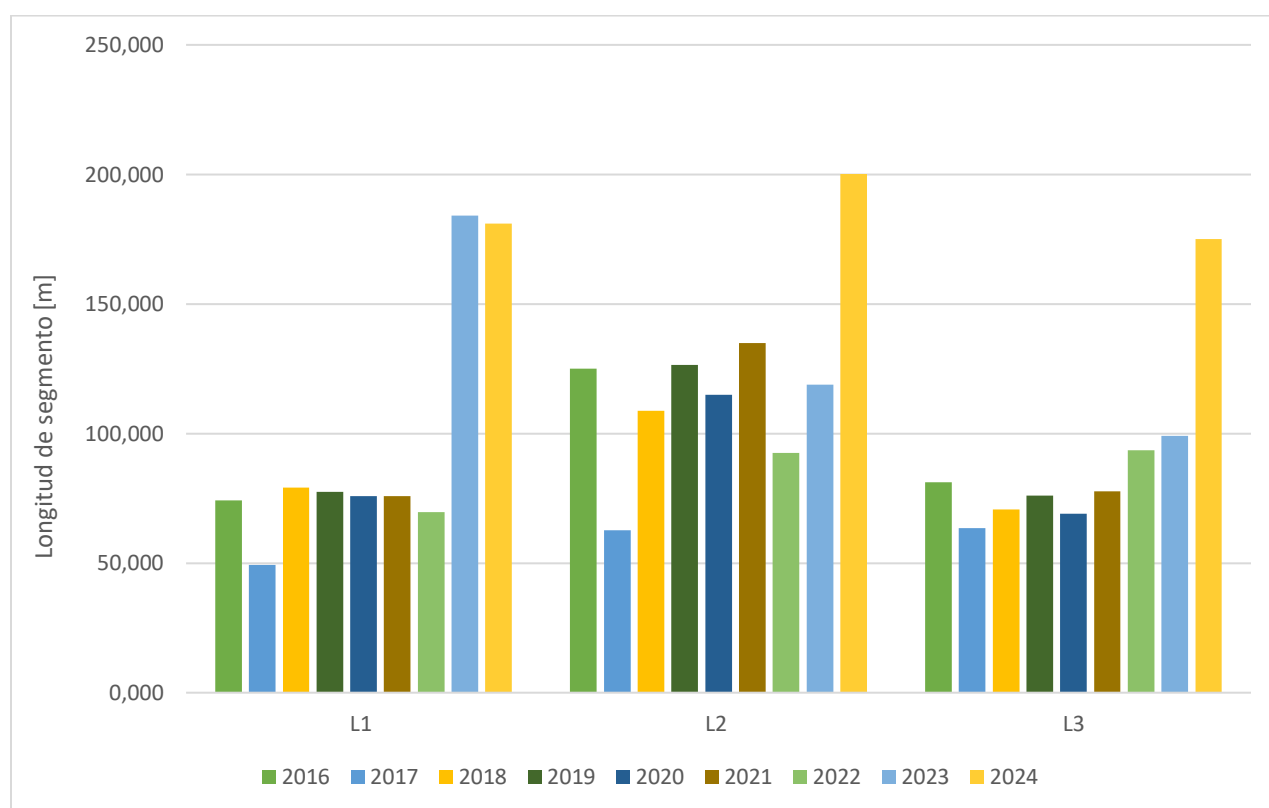
Medición de la variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 5

| Longitud [m] | AÑO | | | | | | | | |
|-----------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| L1 | 74.296 | 49.221 | 79.119 | 77.444 | 75.896 | 75.896 | 69.610 | 184.144 | 180.972 |
| L2 | 125.042 | 62.671 | 108.879 | 126.494 | 115.055 | 135.030 | 92.491 | 118.859 | 200.191 |
| L3 | 81.279 | 63.610 | 70.678 | 75.979 | 69.001 | 77.746 | 93.648 | 99.012 | 174.963 |

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 6

Variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 5



Fuente. Elaboración propia

Tabla 15

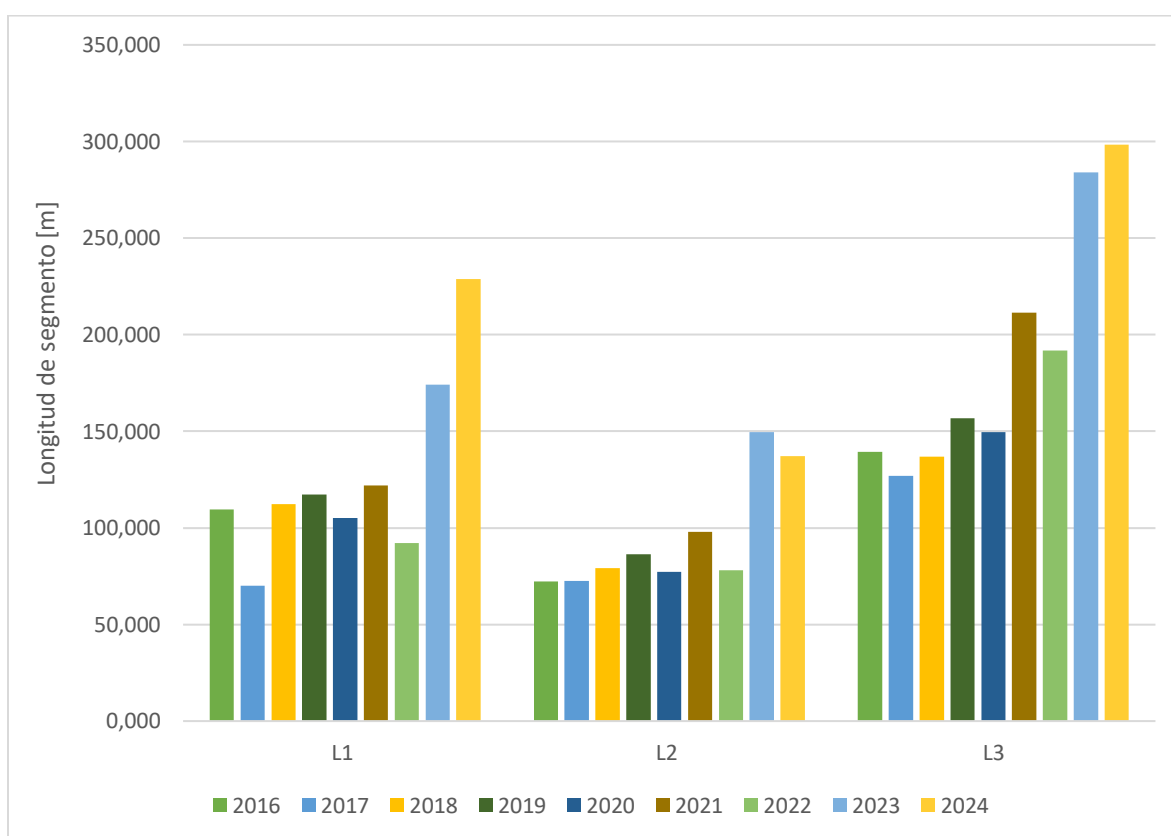
Medición de la variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 6

| Longitud [m] | AÑO | | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| L1 | 109.649 | 70.013 | 112.322 | 117.276 | 105.160 | 121.826 | 92.125 | 174.108 | 228.856 |
| L2 | 72.272 | 72.614 | 79.287 | 86.305 | 77.354 | 97.978 | 78.070 | 149.527 | 137.172 |
| L3 | 139.429 | 126.896 | 136.947 | 156.811 | 149.506 | 211.462 | 191.699 | 283.965 | 298.349 |

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 7

Variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 6



Fuente. Elaboración propia

Tabla 16

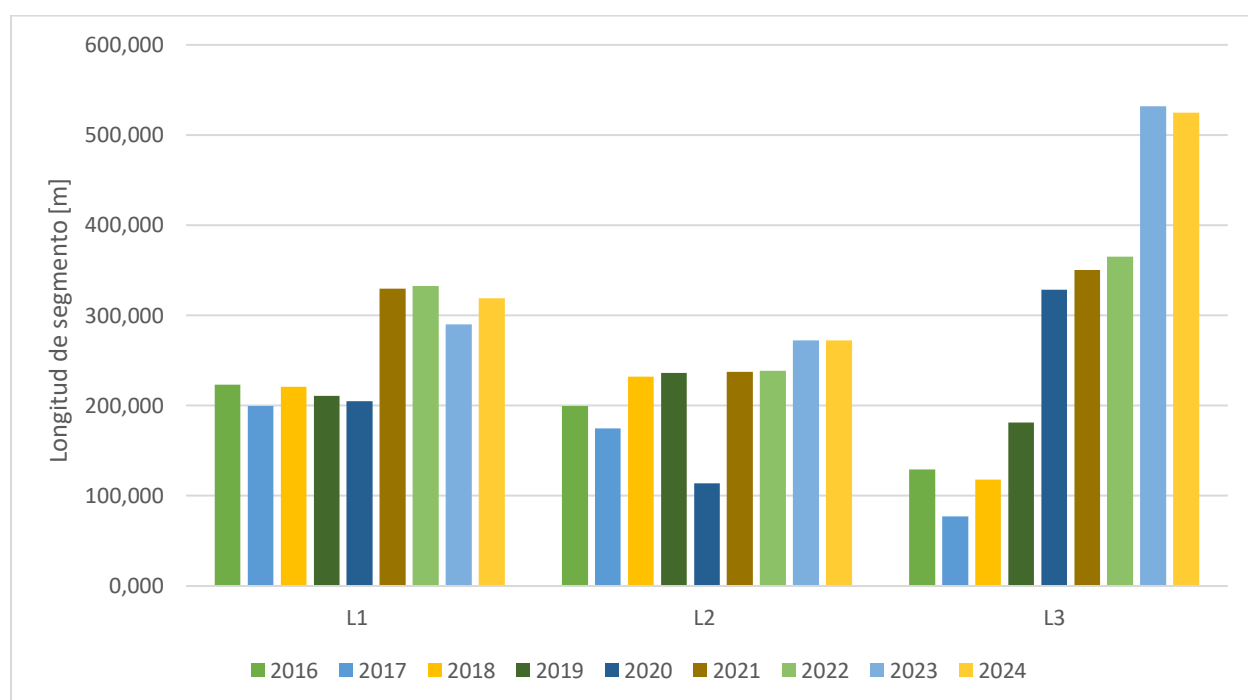
Medición de la variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 7

| Longitud [m] | AÑO | | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| L1 | 223.317 | 199.433 | 220.882 | 210.640 | 204.815 | 329.609 | 332.541 | 290.164 | 319.160 |
| L2 | 199.889 | 174.903 | 232.298 | 236.393 | 113.946 | 237.495 | 238.392 | 272.374 | 272.374 |
| L3 | 129.283 | 77.083 | 118.121 | 181.494 | 328.783 | 350.592 | 365.474 | 532.195 | 524.969 |

Fuente. Elaboración propia

Gráfico 8

Variación anual de la ribera del río en distintos puntos - Mina 7



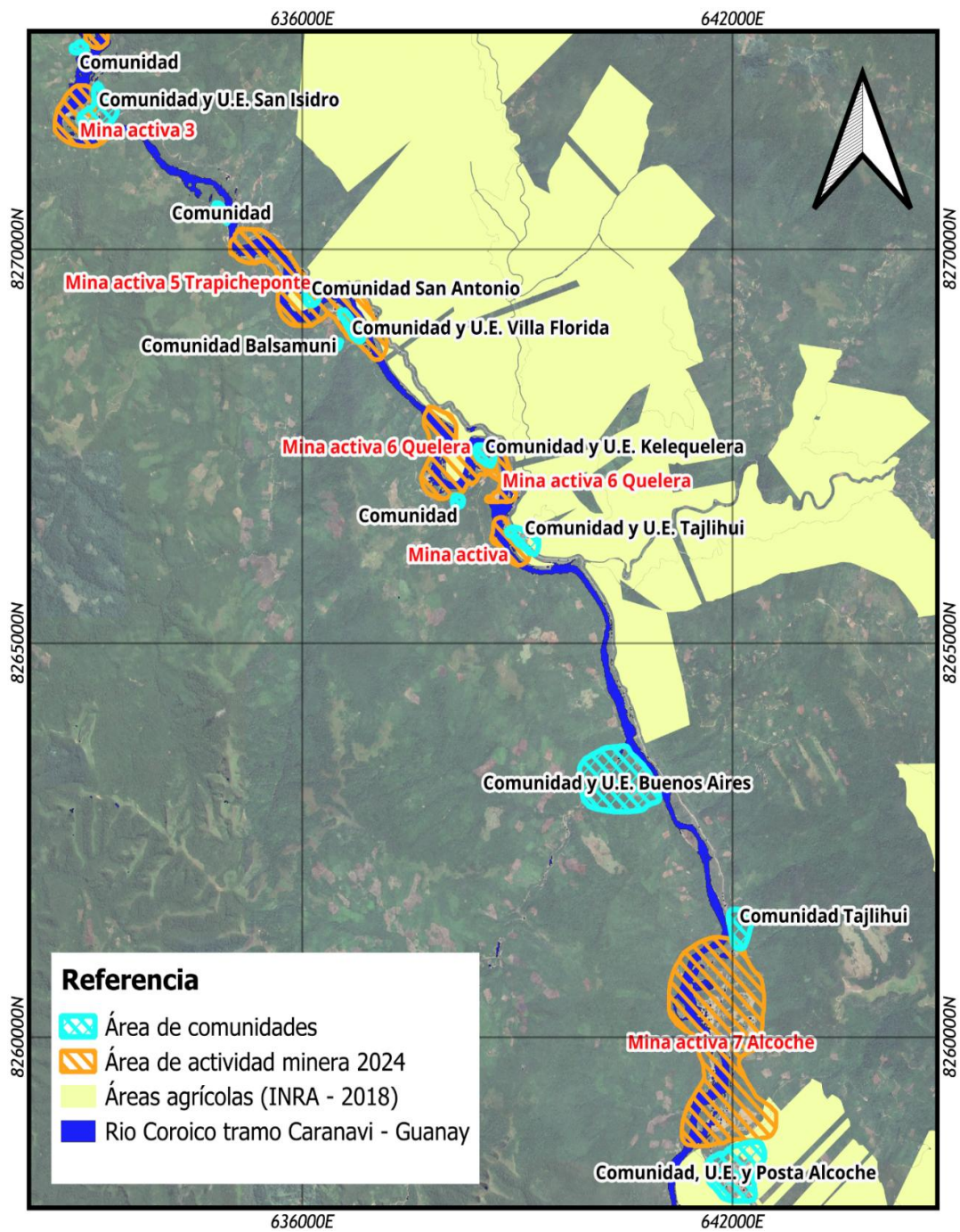
Fuente. Elaboración propia

Mediante los diagramas de barras de las gráficas 5,6,7 y 8 es posible observar que a lo largo de los años la ribera del río ha ido sufriendo desplazamientos o compresiones cambios principalmente desde el 2021 y en otros casos 2023 y en la mayoría de los casos en el 2024 de forma muy abrupta.

4.9 Análisis de zonas de influencia

Figura 19

Zonas antrópicas influenciadas por las operaciones de la actividad minera



Fuente. Elaboración propia

La figura 19 permite visualizar la proximidad entre la actividad minera, los asentamientos humanos, áreas de agricultura, Unidades Educativas y postas de salud ubicadas dentro de las principales zonas de cambio en la geomorfología del río, a través de la figura mencionada, se observa que una gran parte de las minas en operación 3,5,6 y 7 se encuentran dentro de las comunidades o muy cerca de ellas y colindan con áreas agrícolas.

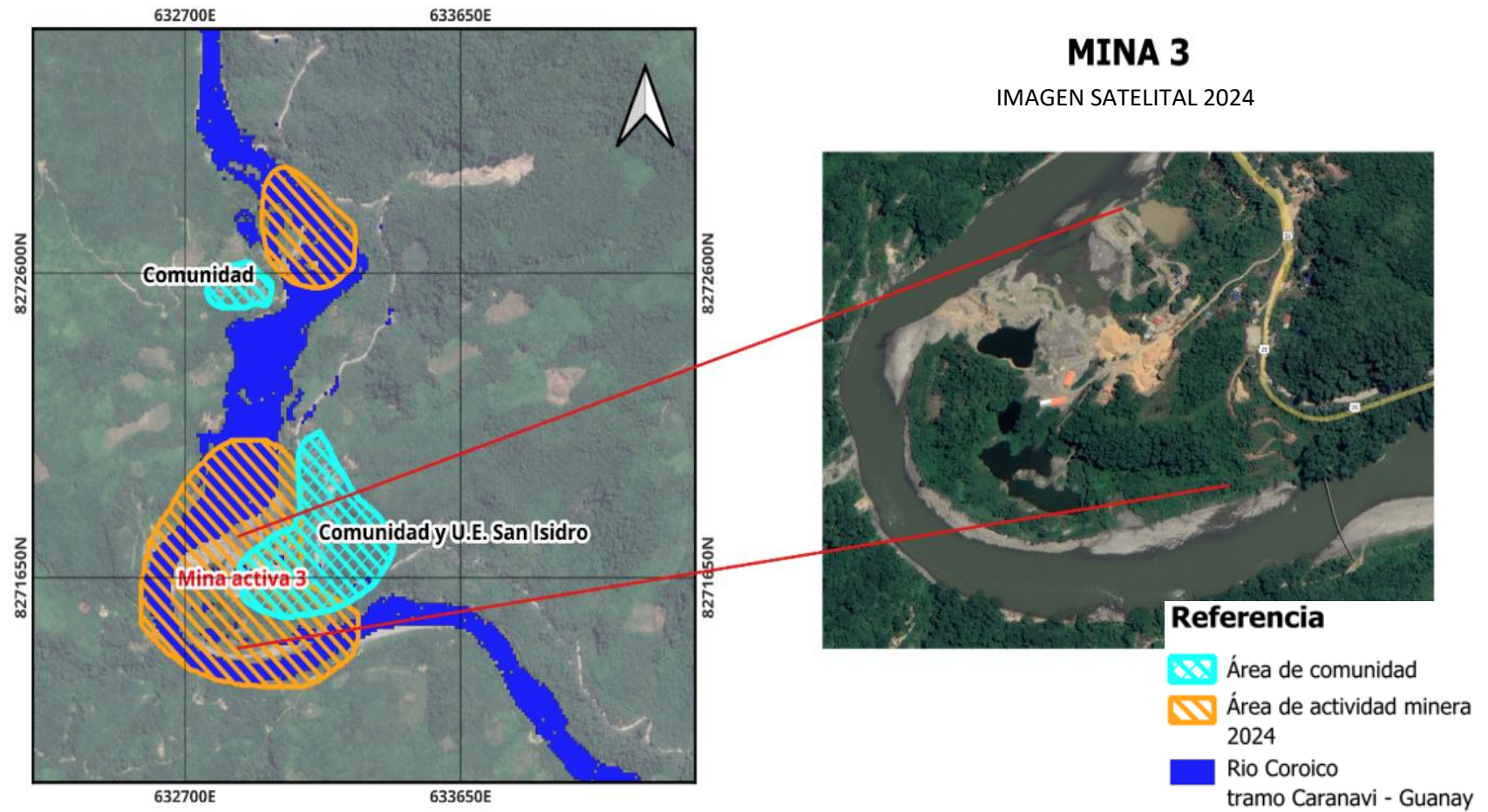
Cabe recalcar que la Figura 19 presenta una delimitación aproximada de las zonas donde se desarrolla la actividad minera y que dicha delimitación no representa una medición precisa del área ocupada por la actividad minera, ya que no se realizó un levantamiento de datos en campo. El área fue identificada mediante una evaluación visual basada en la interpretación de imágenes satelitales en QGIS, lo cual permitió trazar de forma referencial los sectores donde se evidencian procesos de extracción aurífera.

Las figuras 20, 21, 22 y 23 presentadas a continuación corresponden a ampliaciones (zoom) de la imagen general mostrada en la Figura 19, con el propósito de visualizar con mayor detalle la proximidad de la actividad minera y las comunidades. Estas imágenes se centran en las cuatro zonas principales de cambio geomorfológico previamente identificadas correspondientes a las minas 3, 5, 6 y 7, permitiendo observar con mayor claridad la disposición espacial de la actividad extractiva y su cercanía con otros elementos antrópicos del territorio.

En mencionas figuras se puede observar en el lado derecho el mapa elaborado en Qgis y en el lado izquierdo una imagen satelital de la misma zona correspondiente al año 2024 que muestra las transformaciones en el entorno natural.

Figura 20

Zona de influencia/incidencia con el medio antrópico de la mina 3



Fuente. Elaboración propia

Figura 21

Zona de influencia con el medio antrópico de la mina 5

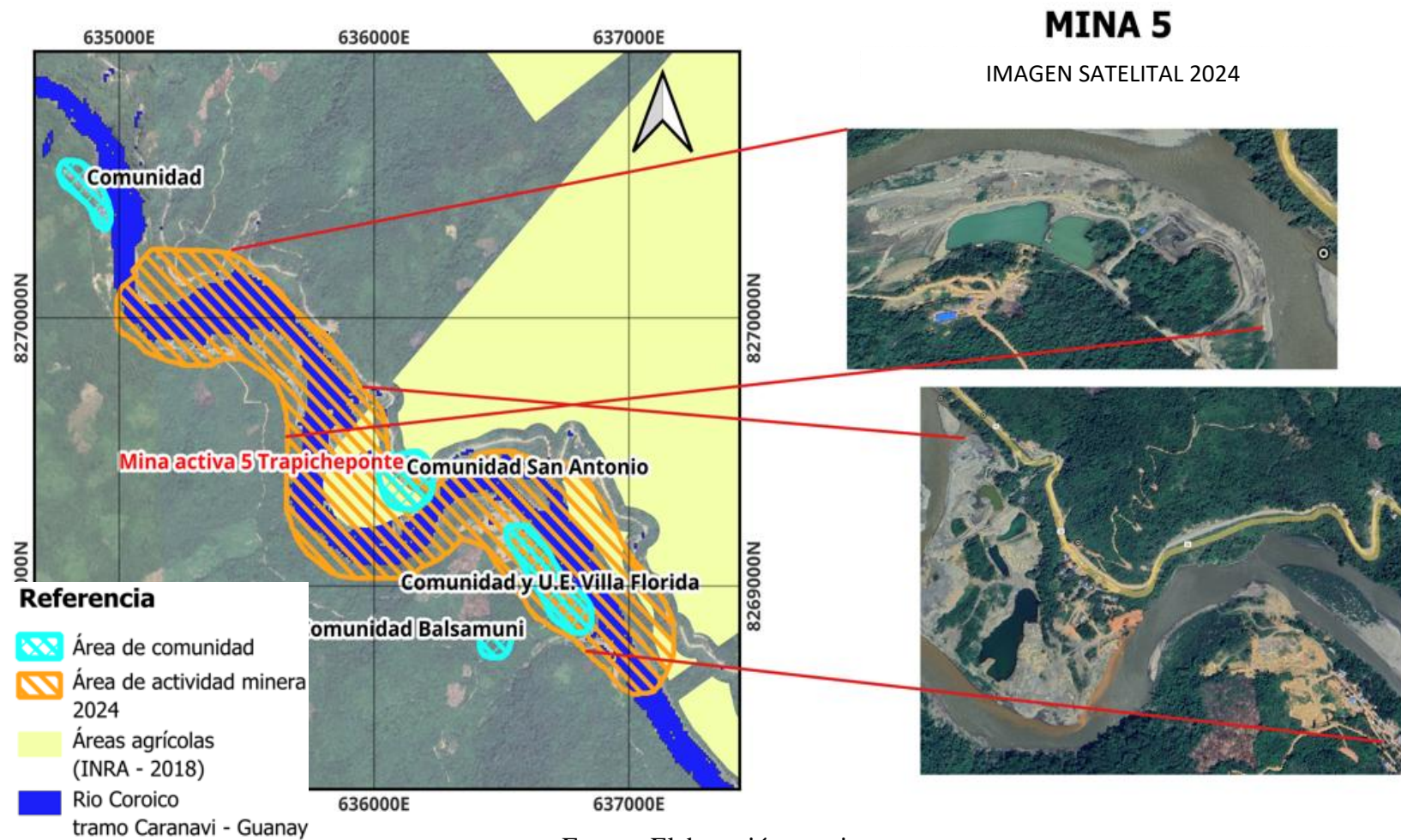
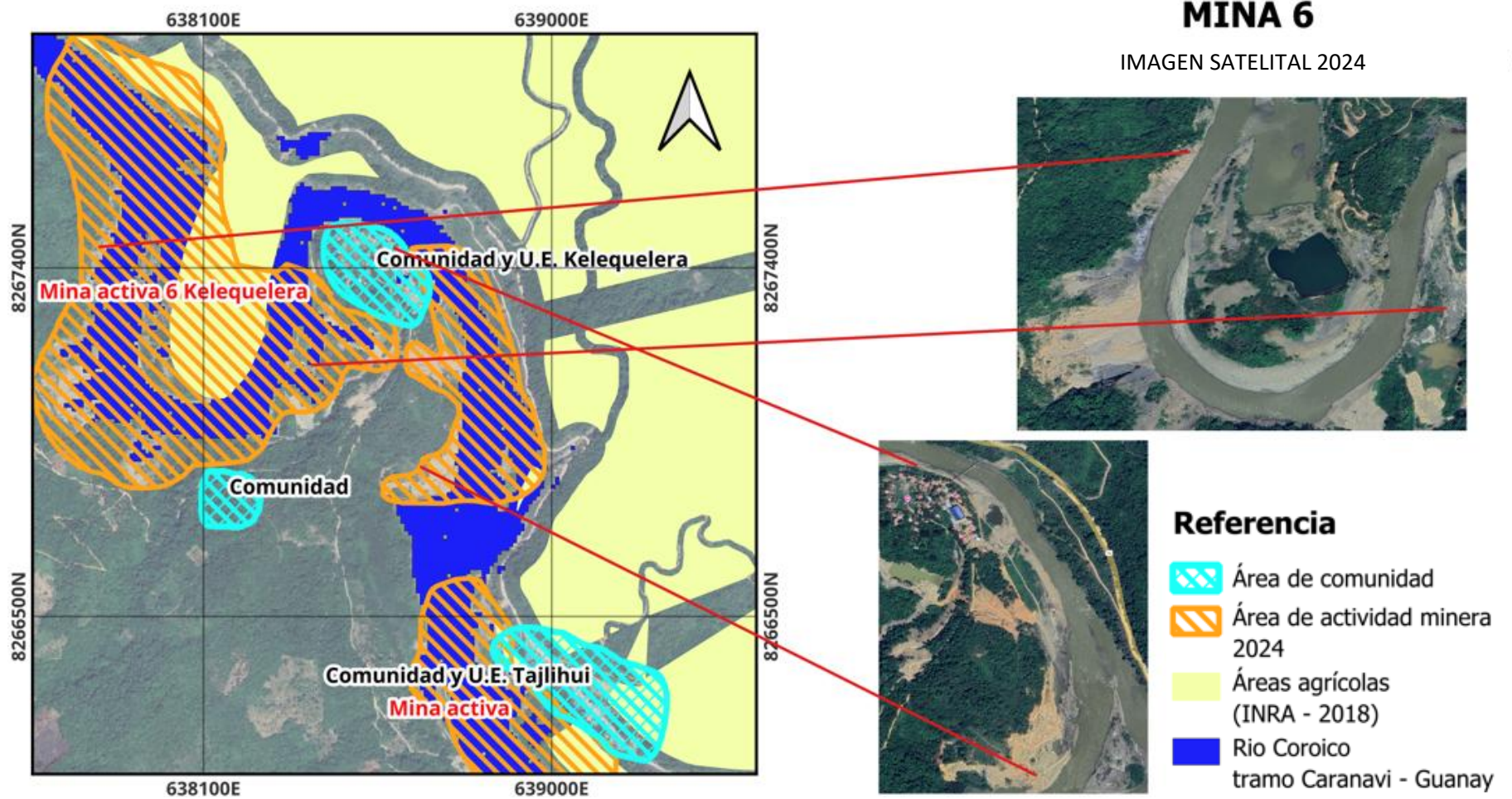


Figura 22

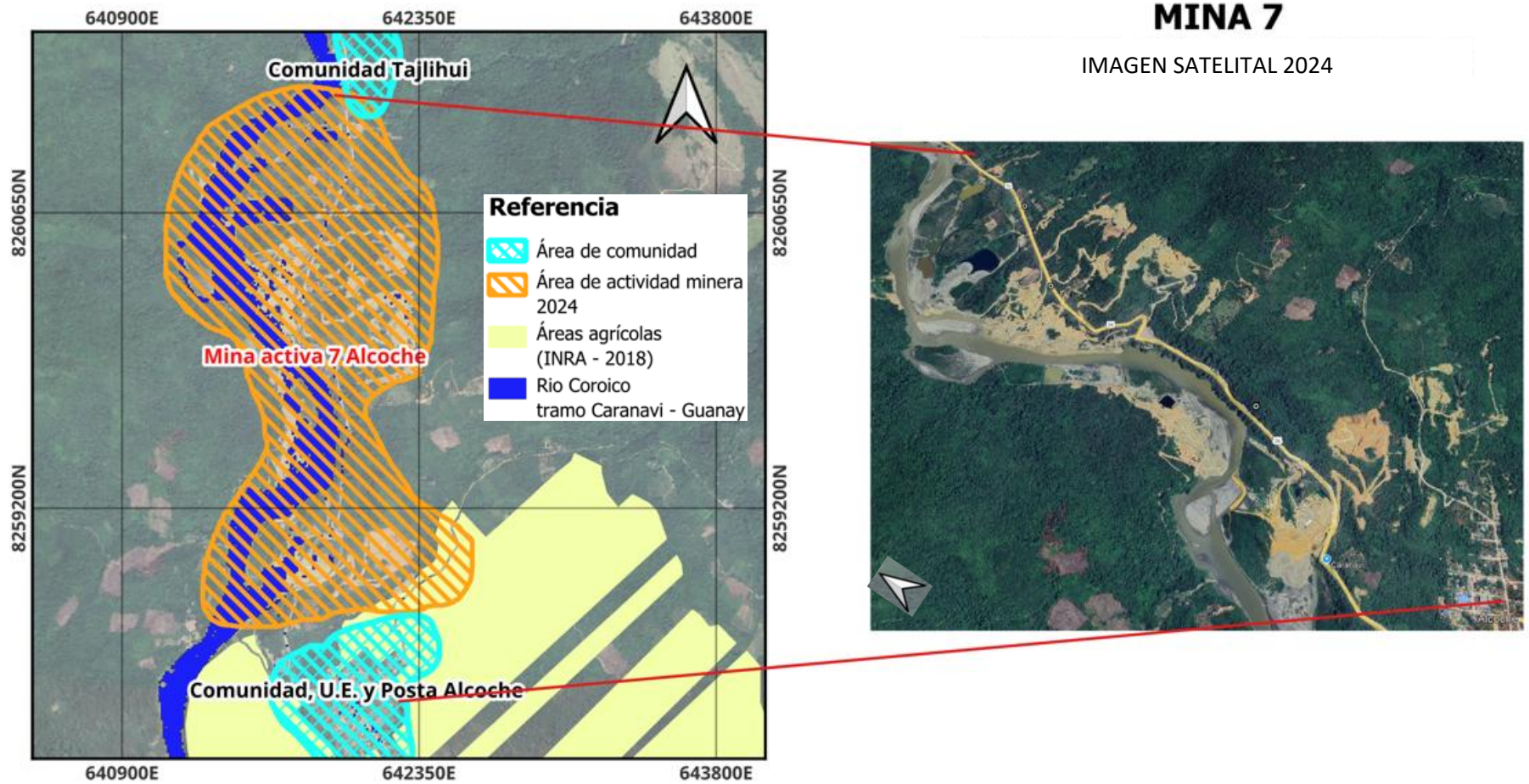
Zona de influencia con el medio antrópico de la mina 6



Fuente. Elaboración propia

Figura 23

Zona de influencia con el medio antrópico de la mina 7



Fuente. Elaboración propia

4.10 Propuesta de acciones comunitarias

La actividad minera provee de una gran cantidad de materiales necesarios en la vida cotidiana, por ejemplo, equipos tecnológicos y digitales requieren de materiales provenientes de la minería. No obstante, consigo trae impactos negativos al medio ambiente y calidad de vida de las personas. La relación entre la actividad minera y las comunidades es compleja y en muchos casos conflictiva. Lo que genera grandes debates acerca de las consecuencias ambientales y sociales que involucra la actividad (Carrillo, 2016).

Actualmente, si bien se han desarrollado diferentes técnicas y practicas hacia una minería más sostenible y responsable con el medio ambiente, es importante que las comunidades sean consideradas como actores activos por lo que es necesario promover su capacidad de organización, acceso a información técnica y legal, y el uso de herramientas comunitarias para poder responder y anticiparse a los efectos de la actividad minera.

Existen comunidades que han podido resolver conflictos mineros gracias a su organización, por ejemplo, en comunidades donde hay minería la creación de comités de vigilancia comunitaria que conozcan el tipo de actividad minera presente, las operaciones que se realiza y los posibles impactos, permiten a la población supervisar las actividades mineras, identificar irregularidades y reportarlas a su comunidad. Además, que facilitan el dialogo con otras comunidades con problemas similares, con gobiernos locales, e instituciones (Buck, 2009).

Es fundamental que los gobiernos locales trabajen de la mano con las comunidades frente a cualquier actividad minera en su territorio. Para asegurar espacios de diálogo donde se informe a la población sobre los posibles impactos ambientales, sociales y económicos que puede generar la minería, los derechos que tienen como comunidad y el papel que pueden desempeñar para proteger su entorno (Buck, 2009).

Además, los gobiernos deberían tomar la iniciativa en la definición de políticas y estándares para garantizar un desarrollo sustentable la comunidad, incluyendo la elaboración de sistemas para el seguimiento y evaluación de proyectos, y para proteger a los ciudadanos de cualquier tipo de abusos.

Las normativas que regulan la actividad minera en el país deben ser conocidas por las comunidades y transmitidas de forma clara y accesible. Muchas veces, la complejidad del lenguaje

legal o las dificultades de lectura en algunas poblaciones limitan su acceso a esta información. Por ello, es fundamental que los gobiernos locales u otras organizaciones concernientes promuevan materiales educativos como cartillas u organicen talleres participativos, que expliquen los derechos de las comunidades y las obligaciones que debe cumplir cualquier empresa minera, para de este modo, fortalecer la capacidad de vigilancia comunitaria (Buck, 2009).

Para actividades mineras a mediana y gran escala debería aplicarse un Plan de Desarrollo Sustentable de la Comunidad el cual debe aportar el marco fundamental para las relaciones entre la empresa, la comunidad, el gobierno y cualquier otra parte relevante mientras el proyecto está en operación y hasta después del cierre. (MMSD, s.a).

Es importante que las actividades mineras cuenten con una Evaluación de Impacto Social (EIS) debidamente desarrollada el cual refleje con exactitud la visión de todos los actores, sobre todo de la comunidad local. En términos ideales, la EIS debería contar con el aval de la comunidad y del gobierno (MMSD, s.a).

La actividad minera debe mostrar una relación de respeto y transparencia con la comunidad y en la toma de decisiones deben reconocer los derechos de las comunidades a tener representación y participación en los procesos que les afectan, y deben basar su interacción entre el proyecto minero y la comunidad en los valores, objetivos y aspiraciones de la población (MMSD, s.a).

Es importante considerar que en algunos casos la comunidad y la actividad minera se encuentran estrechamente vinculadas, ya que un número considerable de comunarios está afiliado a cooperativas mineras y participa directamente en la extracción de recursos. Ante esta realidad, es necesario evaluar los procesos de extracción que realiza la actividad minera mediante autoridades locales, para poder fomentar una minería más responsable con el medio ambiente. También es un necesario diversificar las actividades económicas en la región como el fomento de proyectos agrícolas, especialmente para jóvenes, mujeres y varones, que les permitan generar ingresos sin depender únicamente de una actividad tan impactante como la minería.

En ese contexto en la Tabla 17 se describen acciones dirigidas hacia las comunidades ubicadas dentro del área de estudio para fortalecer su capacidad de respuesta a la actividad minera.

Tabla 17*Acciones de fortalecimiento comunitario*

| Acción Propuesta | Objetivo | Responsable(s) |
|---|--|---|
| Creación de comités de vigilancia ambiental comunitaria | Supervisar las actividades mineras y reportar impactos o irregularidades. | Comunidades, gobiernos locales |
| Monitoreo comunitario del agua | Detectar cambios en la calidad del agua y actuar de forma preventiva. | Técnicos municipales |
| Talleres de educación y normativa ambiental | Sensibilizar sobre los efectos de la minería y promover buenas prácticas. | ONGs, instituciones educativas, directiva de la comunidad |
| Realizar acuerdos comunitarios de uso del territorio | Definir zonas sensibles, limitar uso de maquinaria y proteger cauces. | Dirigentes comunales, municipios, federaciones campesinas |
| Fomento de alternativas económicas sostenibles | Diversificar ingresos para reducir la dependencia de la minería. | ONGs de desarrollo local, gobierno local |
| Escuelas de campo en minería responsable | Mejorar las practicas mineras para reducir impactos negativos en el medio ambiente | Gobierno local, ONGs de desarrollo local |
| Fortalecimiento del Plan de Desarrollo de la Comunidad | Desarrollo de un plan que contemple de forma integral los efectos y beneficios de la minería y los objetivos de la comunidad a futuro. | Directiva de la comunidad, gobierno local, ONGs |

Fuente. Elaboración propia

CAPÍTULO V
ANÁLISIS DE
RESULTADOS

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Análisis de NDWI para el río

Según el análisis de NDWI realizado, se observa que los cambios más notables en la geomorfología del cauce del río se producen a partir del año 2021 que coincide con el auge de la actividad minera en la región, ocurrido en 2020, lo que sugiere una relación entre el crecimiento de la minería y la alteración en la forma del río.

Con el análisis de NDWI histórico para la época seca, se pudo observar en ciertas partes del río desplazamientos progresivos del cauce, en la figura 14 se observa que en el año 2016 (año en el que la actividad minera era casi inexistente en esa zona) el cauce tenía una distribución diferente en comparación con los años posteriores, llegando a observar en ciertas partes del río un cambio pronunciado en el cauce para el año 2024.

Por otra parte, en la época de lluvia se observa una situación similar a la anterior, es evidente que el cauce del río es mayor debido al incremento de precipitaciones lo que incrementa la cantidad de segmentos de agua visibles, no obstante, también se puede evidenciar un desplazamiento progresivo del cauce del río en comparación con el año 2016.

Además, se evidenció que las áreas con mayor alteración en la forma del río coinciden con la proximidad de las minas en operación, de esta forma se seleccionaron las minas 3,5,6 y 7 como las zonas principales de cambio en la geomorfología, este fenómeno es especialmente evidente en las zonas cercanas a la mina 3 y la mina 7, donde la alteración del cauce es más marcada.

5.2 Análisis de variación de superficie

En cuanto al análisis de variación de superficie ocupada por el cauce del río para la época seca existe un incremento anual del cauce, las minas 6 y 7 presentan los mayores valores de porcentaje de incremento, llegando a obtener valores de hasta el 36 %. Por otro lado, en la época de lluvias, el aumento de la superficie cubierta por agua es aún más pronunciado, con algunas zonas mostrando incrementos superiores al 50%, lo que se debe a las altas precipitaciones y el consecuente incremento del caudal del río, fenómeno esperado en este período.

Sin embargo, un aspecto particular es que, la mina 7 a pesar de ser la mina con mayor expansión, no muestra un aumento significativo en la superficie del río durante la época de lluvias, registrando apenas un 4.98% en 2021 y 14.34% en 2024.

5.3 Análisis de sinuosidad

En la evaluación realizada sobre la sinuosidad dentro del proyecto, no se observó una variación significativa en este parámetro a lo largo del período analizado. Aunque se identifican ciertos cambios, estos son mínimos, lo que indica que, pese a las modificaciones en la superficie cubierta por agua, el río sigue manteniendo su clasificación como un río sinuoso en ciertos segmentos y meándrico en otros.

Según el análisis de sinuosidad realizado y los valores obtenidos (Tabla 11,12) se determinó que las zonas correspondientes a Mina 3, Mina 5 y Mina 6 presentan valores de sinuosidad mayores a 1.5, lo que, según la clasificación de ríos en base a su sinuosidad, indica que estos sectores pertenecen a un río meándrico. En contraste, la Mina 7 registra valores de sinuosidad entre 1.05 y 1.5, clasificándose como sinuoso.

Este comportamiento se mantiene tanto en la época seca como en la época de lluvias, y aunque se observan variaciones en la sinuosidad a lo largo del tiempo, estos cambios son pequeños (gráficos 3 y 4). Se evidencia un incremento gradual en la sinuosidad, pero con valores poco significativos, lo que indica que, si bien el río sigue su proceso natural de evolución morfológica, los cambios en su forma no han sido lo suficientemente marcados como para modificar su clasificación.

Además, se observa que los valores de sinuosidad obtenidos durante la época de lluvias son ligeramente menores que los registrados en la época seca. Este fenómeno puede atribuirse al aumento del caudal durante la temporada de lluvias, que tiende a rectificar temporalmente el curso del río, reduciendo su sinuosidad aparente (González, 2017).

5.4 Análisis de NDWI para la ribera

De acuerdo con el análisis del NDWI realizado para la ribera del río, se determinó que los valores obtenidos oscilan entre 0.01 y 0.3, según los criterios establecidos por Alarcón y Rosso

(2020), quienes señalan que dichos valores corresponden a áreas con una alta disponibilidad de agua en el suelo y la vegetación ribereña.

Al analizar las figuras del comportamiento del NDWI histórico de la ribera en las cuatro zonas principales de cambio (figura 16 y 17), se observa una evolución en su distribución a lo largo del tiempo. En particular, al sobreponer la capa del río para el año 2024, se evidencia que el río ha avanzado sobre las áreas de ribera previamente identificadas en años anteriores, especialmente aquellas anteriores a 2022. Este comportamiento sugiere una expansión del cauce, lo que podría estar asociado a dinámicas de erosión y sedimentación. Además, esta misma tendencia de comportamiento se repite tanto en la época seca como en la época de lluvia, lo que indica que la expansión de la ribera no está únicamente influenciada por las variaciones estacionales, sino que podría estar respondiendo a factores más amplios de cambio en el cauce.

5.5 Análisis de expansión de la ribera

El análisis histórico de la longitud de la ribera muestra que, en general, existe una variabilidad en su comportamiento en algunos casos, se observa una expansión y en otros una compresión. Sin embargo, la tendencia más destacada es la expansión de la ribera en la mayoría de los puntos analizados. Este comportamiento sugiere que, con el paso del tiempo, el río ha ido abarcando espacios que anteriormente eran áreas de ribera, lo que podría indicar un cambio progresivo en la dinámica del cauce fluvial.

En las gráficas 5, 6, 7 y 8, que muestran el comportamiento de expansión de la ribera a lo largo de los años, se observa que, en la mayoría de los casos, el incremento más notable en la expansión ocurre a partir del año 2021. Este dato resulta relevante, ya que coincide con el auge de la minería en la región, el cual se intensificó a partir de 2020. Este patrón sugiere que la expansión de la ribera podría estar relacionada con las actividades antrópicas como la minería.

5.6 Análisis de zonas antrópicas influenciadas por la actividad minera

La actividad minera de la Mina 5 (figura 21) y 6 (figura 22) abarcan áreas dentro de dos comunidades, además de superponerse con zonas agrícolas, en las imágenes satelitales, se pueden identificar piscinas construidas por mencionadas actividades mineras, ubicadas a pocos metros de

las viviendas. También es evidente una gran deforestación en las riberas del río, especialmente cerca del núcleo de las comunidades.

Un caso más marcado es el de la Mina 7 (figura 23), la cual tiene la mayor extensión de actividad minera y se encuentra muy cerca de la comunidad Alcoche (mayor población del área de estudio), en el área se aprecia una notable deforestación no solo en las riberas del río, sino también en el bosque posterior a las riberas, además en zonas próximas a la comunidad existen construcciones de varias piscinas que son parte del proceso de la actividad minera.

El espacio ocupado por la actividad minera muestra un patrón progresivo, ya que cada año se expande, abarcando más espacio de la comunidad colindante y generando un incremento en la deforestación de las riberas del río y del bosque colindante.

Además, en todas las imágenes satelitales de las zonas principales de cambio (figuras 20, 21, 22 y 23) se logra observar el agua turbia en el cauce del río, cuerpos de agua artificiales (piscinas para el proceso de minería) y zonas sin vegetación. Incluso en el caso de la mina 7 es posible observar deforestación y excavaciones en espacios mucho más alejados del cauce del río en especial hacia la derecha de la imagen incluso por encima de la carretera que cruza la zona lo que indica una combinación de dos tipos de actividad minera.

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En el presente apartado se exponen las conclusiones a las que se llegan a partir del cumplimiento de los objetivos específicos de la investigación.

- Se identificaron nueve minas en operación entre las poblaciones de Salcala y Santa Fe. De estas, siete se encuentran ubicadas en los meandros del río, las cuales desarrollan sus operaciones a diferentes escalas por lo que existen distintos niveles de impacto ambiental en la dinámica natural del río y sus alrededores.
- Mediante el análisis del NDWI se evidenció que la minería aluvial aurífera ha provocado cambios en la geomorfología del Río Coroico, principalmente en los segmentos del cauce en donde se ubican las minas 3,5,6 y 7, mencionadas minas desarrollan operaciones a mayor escala en comparación a las restantes.
- El análisis de NDWI indica que las variaciones en la forma del cauce son mayormente notables a partir del año 2021 el cual coincide con el auge de la actividad minera aurífera en la región registrada con mayor intensidad a partir del del 2020.
- El año 2024 es el período con cambios más marcados en la forma del cauce y una pérdida considerable de vegetación de ribera y bosque adyacente. Sin embargo, este resultado no es un punto final ya que la actividad minera en la región continúa en expansión lo que puede causar mayores modificaciones en la geomorfología en los siguientes años.
- Se evidenció un incremento progresivo en la superficie ocupada por el río en las zonas con presencia de actividad minera, la mina 6 presenta el valor máximo (39 %) en época seca lo cual está relacionado con la deforestación ribereña y remoción de sedimentos. Es importante mencionar que esta variable fue evaluada en términos de superficie y no en profundidad ni volumen. Además, existe una tendencia de desplazamiento de la ribera en la mayoría de los puntos analizados.
- No se evidenció cambios marcados en la evaluación de la sinuosidad a lo largo del período de estudio, sin embargo, se identificaron variaciones de hasta el 6.93% lo cual indica que se ha producido una leve modificación en los meandros.

- En el análisis realizado de las zonas antrópicas influenciadas por las operaciones de la actividad minera se observa que una gran parte de las minas en operación 3,5,6 y 7 se encuentran dentro de las comunidades o muy cerca de ellas y colindan con áreas agrícolas. Lo que denota una débil planificación territorial.
- Mediante las imágenes satelitales se evidencio un tipo de extracción mixta, ya que algunas operaciones mineras no solo se concentran en el cauce del río, sino que también intervienen áreas de montaña ubicadas al otro lado de la carretera. Esto sugiere la coexistencia de minería aluvial (extracción de sedimentos del lecho del río) y eluvial, en la cual se remueve material directamente de las laderas, ampliando el impacto ambiental en la región.
- Los cambios geomorfológicos evaluados e identificados en la época seca son menos marcados, pero persisten en la época de lluvia pese a que esta época se caracteriza por mayores precipitaciones y menor actividad minera.

6.2 Recomendaciones

- Al Gobierno Municipal se recomienda implementar mecanismos de seguimiento y control sobre las actividades mineras dentro de su jurisdicción, con el fin de contar con información actualizada respecto al número de operaciones activas y su situación legal.
- Se sugiere articular acciones coordinadas entre el Gobierno Municipal e instituciones competentes nacionales concernientes a la actividad minería como la Autoridad Jurisdiccional Minera (AJAM), Ministerio de Minería y Metalurgia, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, entre otras para fortalecer los procesos de regularización conforme al marco normativo vigente.
- Se recomienda que las autoridades locales y regionales reforzar los mecanismos de planificación territorial, buscando una convivencia más segura entre las comunidades y las actividades mineras. Es importante establecer una distancia adecuada entre ambas, ya que en algunos lugares se ha visto que la minería ha llegado a superponerse a los asentamientos humanos. Esto podría evitar riesgos ambientales y sociales a futuro, y ayudaría a gestionar de mejor manera el crecimiento de estas actividades.
- En la cuenca del Río Coroico se recomienda fomentar estudios similares o complementarios al presente proyecto con un enfoque en el aspecto químico, biológico y social, además, de realizar evaluaciones periódicas del tramo estudiado.
- Para futuras investigaciones que involucren el uso de Sistemas de Información Geográfica y análisis multitemporal, se recomienda el uso de Google Earth Engine, ya que es una plataforma potente basada en la nube que permite el acceso a grandes volúmenes de datos satelitales y facilita el procesamiento a gran escala.
- Se recomienda el aprovechamiento de la Plataforma Interinstitucional de la Cuenca Coroico (PIC), promovida por Cáritas Coroico, como un mecanismo de resolución de conflictos y órgano participativo de toma de decisiones ya que puede desempeñar un papel clave en la planificación y gestión integral de la cuenca.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Noticias Fides. (2024). Guanay con 45 comunidades azotadas por las riadas y 350 desplomadas. <https://www.noticiasfides.com/nacional/sociedad/guanay-45-comunidades-azotadas-por-las-riadas-y-350-viviendas-desplomadas>
- Agencia Nacional de Noticias Ambientales Bolivia. (2023). Cáritas moviliza a cinco municipios para salvar la cuenca del Río Coroico. ANA. <https://anabolivia.org/caritas-moviliza-a-cinco-municipios-para-salvar-la-cuenca-del-río-coroico/>
- Alarcon, D., Rozo, M. (2020). Análisis multitemporal de la transformación del bosque tropical que influye en la desertificación del municipio de Agua de Dios. Universidad de La Salle Bogota.
- Aliaga, R. (2024). Guanay bajo el agua, son más de 7.400 familias afectadas. Periódico La Razón. <https://www.la-razon.com/sociedad/2024/02/27/guanay-bajo-el-agua-son-mas-de-7-400-familias-afectadas/#>
- Bahadur Kshetri, T. (2018). “NDVI, NDBI & NDWI Calculation Using Landsat 7, 8”. Publicado en linkedin. <https://www.linkedin.com/pulse/ndvi-ndbi-ndwi-calculation-usinglandsat-7-8-tek-bahadur-kshetri/>
- Buck, A., Zorrilla, C., Palmer, P. y Pellow, D. (2009). Protegiendo a su comunidad contra las empresas mineras y otras industrias extractivistas. https://www.flacsoandes.edu.ec/sites/default/files/agora/files/1314997227.dtflacso_2009_zorrilla.pdf
- Bustamante, J., Mercado, K. (2020). Modelación espacio-temporal del complejo cenagoso de Ayapel-Córdoba usando series de tiempo de imágenes Landsat. Universidad de Córdoba Colombia.
- Carrillo, J. (2016). Las comunidades y la minería. Geoinnova. <https://geoinnova.org/blog-territorio/las-comunidades-la-mineria/#comments>
- Centro de Documentación e Información Bolivia (CEDIB). (2019). El caso de la minería aluvial de oro en Bolivia, La destrucción de nuestros ríos y bosques. CEDIB. <https://www.cedib.org/wp-content/uploads/2022/10/PuebloSoberaniaOroAluvial-Muestra1.pdf>

- Centro de Estudios Jurídicos e Investigación Social (CEJIS). (s.a). Minería aluvial del oro en el Río Madre de Dios, impactos socioambientales y presiones al territorio indígena Multiétnico II. CEJIS.
- Centro de Información Científica Amazónica (CINCIA). (2020). Madre de Dios: imágenes satelitales muestran el impacto de 34 años de minería ilegal en ríos. El Comercio. <https://cincia.wfu.edu/en/press/el-comercio-madre-de-dios-imagenes-satelitales-muestran-el-impacto-de-34-anos-de-mineria-ilegal-en-rios/>
- Certified Cabon Standart. (s.a). Guía para la presentación y análisis de cartografía. CERCARBONO. <https://www.cercarbono.com/wp-content/uploads/Guia-presentacion-y-analisis-cartografia.pdf>
- Cruz, J. (s.a). Potenciales impactos ambientales generados por el dragado y la descarga del material dragado. Instituto Nacional de Canalizaciones, Dirección de Proyectos e Investigación, Caracas – Venezuela.
- Dethier, N., Silman, M., Leiva, D., Alqahtani, S., Fernandez, E., Pauca, P., ... & Lutz, A. (2023). A global rise in alluvial mining increases sediment load in tropical rivers. Nature. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37612396/>
- Estrada, Y., Portocarrero, C., García, P., Timana, C., Quintana, I., Pillaca, M., Castro, J., Quispe, L, Fernández, E., & Moreno, M. (2023). Influencia de la minería aurífera aluvial en la geodinámica fluvial del río Madre de Dios, Amazonía peruana, en el período 1984-2020. Proyecto River Mining.
- Faustino, J., Jiménez, F. (2000). Manejo de Cuencas Hidrográficas. Centro agrónomo tropical de investigación y enseñanza, área de cuencas y sistemas agroforestales.
- Figueredo, J., Ramon, A., Barrero, H. (2020). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal en el área de manejo "Los Números" Guisa, Granma. Revista Cubana de Ciencias Forestales (CFORES).
- Foro Económico Mundial. (2016). Cartografía de la minería en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Columbia Center on Sustainable Investmen. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_SP.pdf

- Fuentes, R. (2021). Análisis comparativo de los productos satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para la estimación de humedad y estrés hídrico en la planta de caña de azúcar. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- García, 2015. Medicina Fluvial un nuevo paradigma en la conservación y restauración del río bajo el enfoque de la geomorfología.
- García, B., (2025). El oro supera los 3.000 dólares por onza por primera vez en su historia. La Patria. <https://lapatria.bo/2025/03/14/el-oro-supera-los-3-000-dolares-por-onza-por-primera-vez-en-su-historia/>
- Gonzales, M., García, D. (2000). Restauración de Ríos y Riberas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes Madrid.
- Gutierrez, L., Haro, E., Diaz, N. (2024). Análisis Multitemporal de Distribución Geográfica Potencial del Lama Guanicoe. Universidad Nacional de Trujillo Perú.
- Madrid, H., Martinez, F., Manriquez, H. (2020). Patrones de Auto semejanza en la Sinuosidad de Ríos Chilenos. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Metallurgist. (2018). Geología de oro aluvial en Placeres. <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/geologia-aluvial-como-buscar-oro-en-rios/>
- Ministerío de Minería y Metalurgia Bolivia. (2023). Anuario estadístico. <https://mineria.gob.bo/revista/pdf/anuario2023.pdf>
- MMSD. (s.a.). Proyecto minería, minerales y desarrollo sustentable. International Institute for Environment and Development.
- Mostesdeoca, V. (2022). Aplicación de un algoritmo basado en morfología matemática a la extracción de zonas inundadas en imágenes de satélite. Universidad Politecnica de Madrid.
- Muñoz, M. (2021). Geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Quevedo, Los Ríos-Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Ollero, A., Garcia, R. (2007). Las alteraciones geomorfológicas de los ríos. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad Politécnica de Madrid.
- Ortuño, N., Flores, F. (2023). Plan director de la Cuenca del Río Coroico. Pastoral Social Caritas Diocesana de Coroico. Caritas Coroico - Bolivia.

- Otávio, J. (s.a.). Quantum GIS (QGIS). Instituto de Cartografía Aeronáutica.
https://www.icao.int/SAM/Documents/2024-RLA06901-DDS_AIM/QuantumGIS.pdf
- Pero, E., Casagrande, E., Cristobal, L., Wottitz, A. & Gasparri, N. (2020). Evaluación del déficit de bosques de ribera en Tucumán. Asociación Argentina de Ecología.
- Poveda, R. (2022). La institucionalidad y la regulación minera en los países andinos Estado Plurinacional de Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador y Perú. Naciones Unidas.
- Zaconeta. (2023). Oro en Bolivia: Asimetrías de un proceso en expansión. Plataforma energética Precio del Oro en Bolivia (BOB) del día de hoy. (s.a). Exchange-rates.org.
https://www.exchange-rates.org/es/metalespreciosos/oro/bolivia?utm_source=chatgpt.com
- Responsible Mining Foundation. (2020). La minería y los ODS actualización de la situación en 2020. Columbia Center on Sustainable Investmen.
https://www.responsibleminingfoundation.org/app/uploads/RMF_CCSI_Mining_and_SDGs_SP_Sept2020.pdf
- Revel, C., Lonjou, V., Marcq, S., Desjardins, C., Fougne, B. (2019). Sentinel – 2A and 2B absolute calibration monitoring. European Journal of Remote Sensing.
- Rodriguez, L. (2022). Efectos asociados al cambio del cauce del Río Amazonas en Colombia, con énfasis en la afectación al territorio del municipio de Puerto Nariño. Universidad Militar de Nueva Granada Bogotá.
- Rodriguez, M. (2021). Geomorfología fluvial y análisis multitemporal del río Bajaña, Los Ríos – Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Schot, G. (2023). Los factores y desafíos claves para la promoción de Minería Responsable de oro en la Cuenca del Río Coroico. Universidad Mayor de San Andres.
- Suharini, E., Hasim, M., Kurniawan, E. (2020). Google Earth Pro as a Learning Media for Mitigation and Adaptation of Landslide Disaster. International Journal of Information and Education Technology.
- Terán, T. (2021). Evaluación de los efectos ambientales de la minería aurífera a pequeña escala en el ANMIN - Apolobamba (Bolivia).

ANEXOS

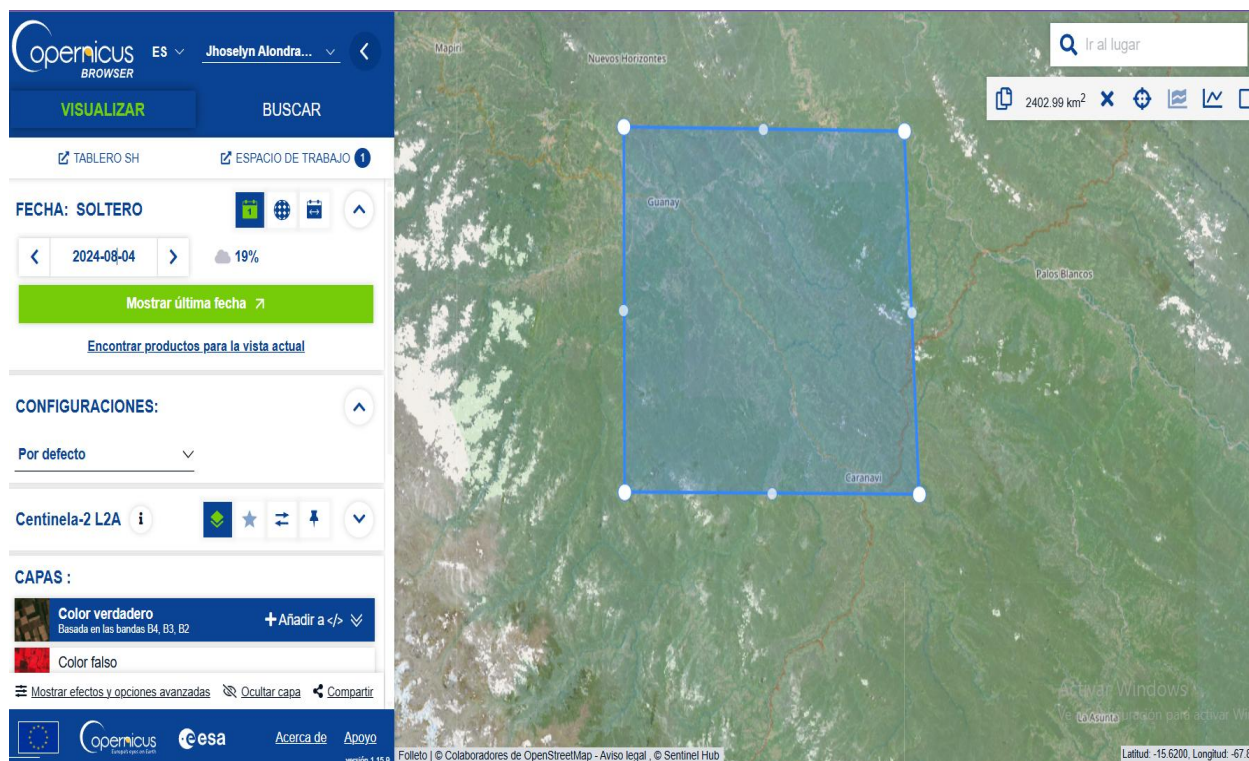
8. ANEXOS

Anexo A

Capturas de pantalla del procesamiento de imágenes satelitales en QGIS

Figura 1A.

Descarga de imágenes de la plataforma Copernicus

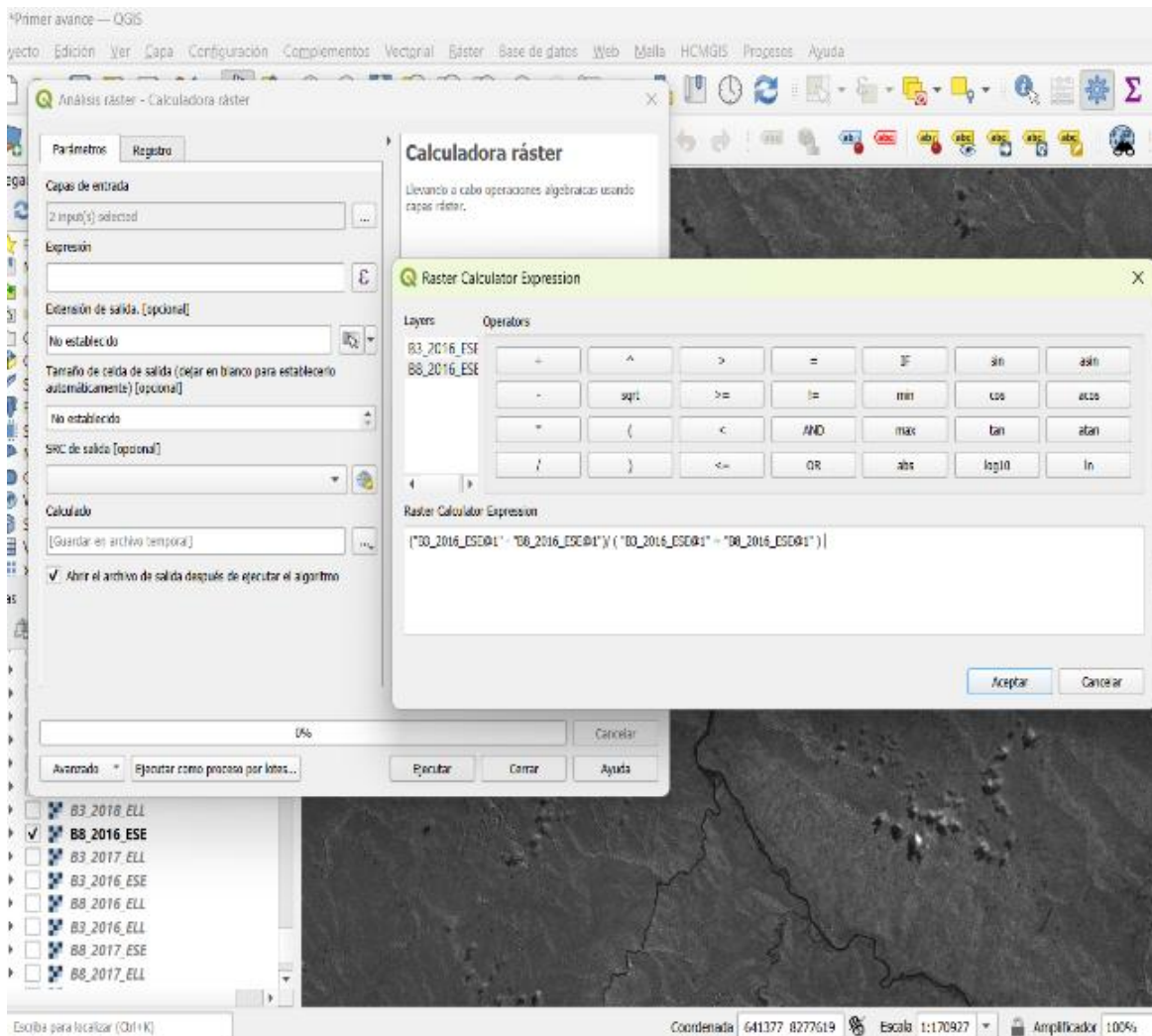


Fuente. Elaboración propia

Nota. Se muestra la interface de la plataforma Copernicus y dentro del cuadro azul el río Corico tramo Caranavi – Guanay.

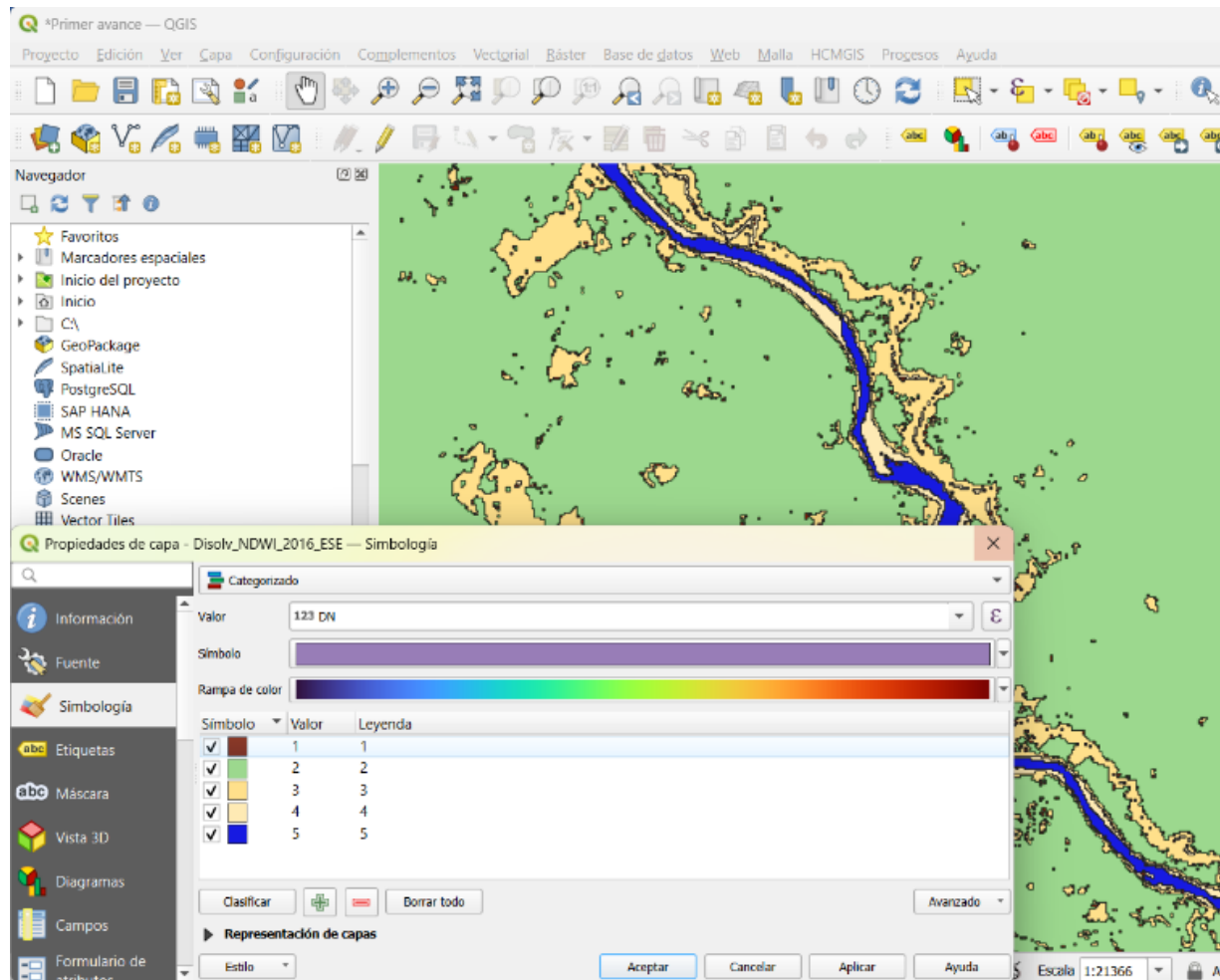
Figura 2A.

Aplicación del índice NDWI mediante la calculadora raster



Fuente. Elaboración propia

Nota. Se observa la el uso de la herramienta algebra de mapas del software QGIS mediante la aplicación de la ecuación para el cálculo de NDWI de McFeeters.

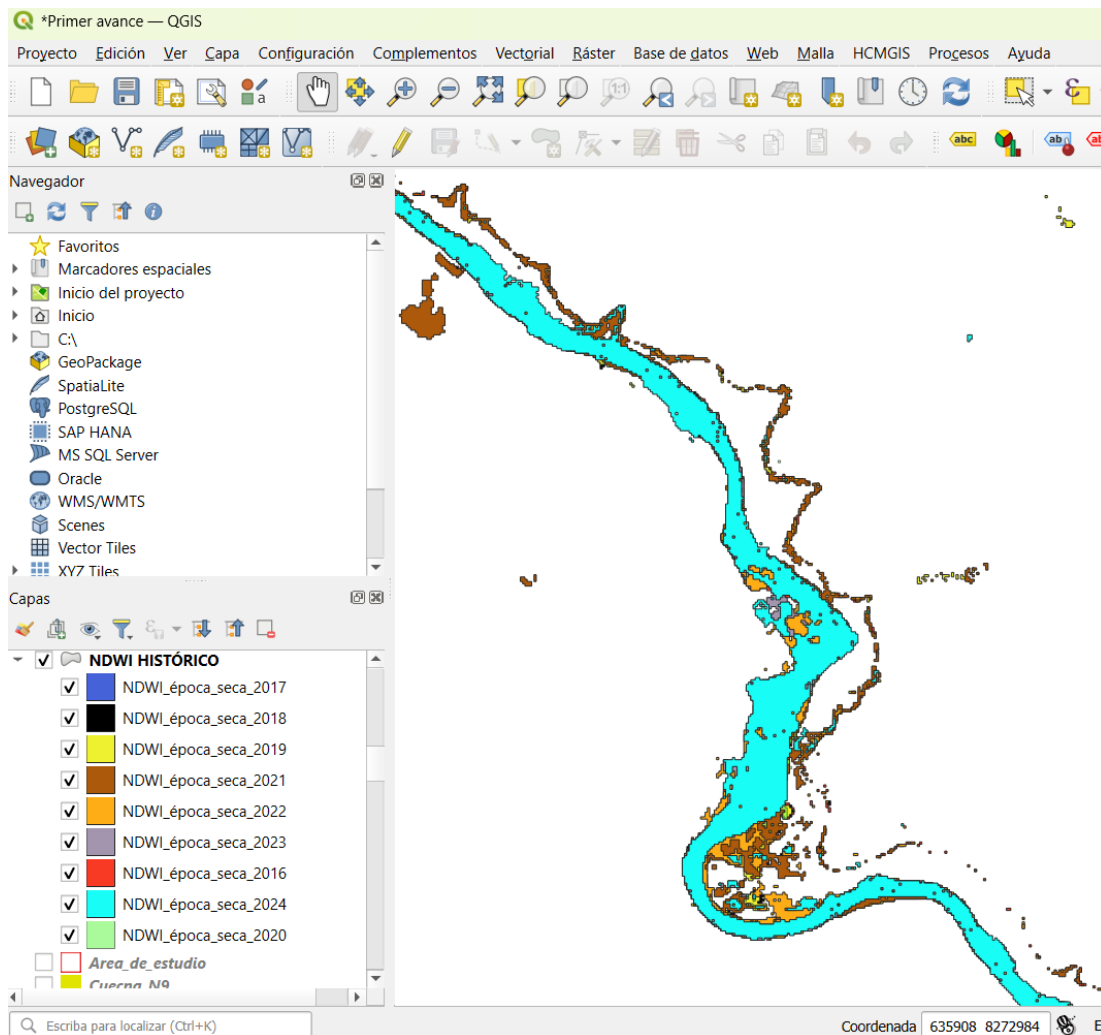
Figura 3A.*Reclasificación de valores de NDWI*

Fuente. Elaboración propia

Nota. La figura muestra la reclasificación de los valores del NDWI según los valores y datos mostrados en la Tabla 2.

Figura 4A.

Superposición de capas para el análisis multitemporal de NDWI

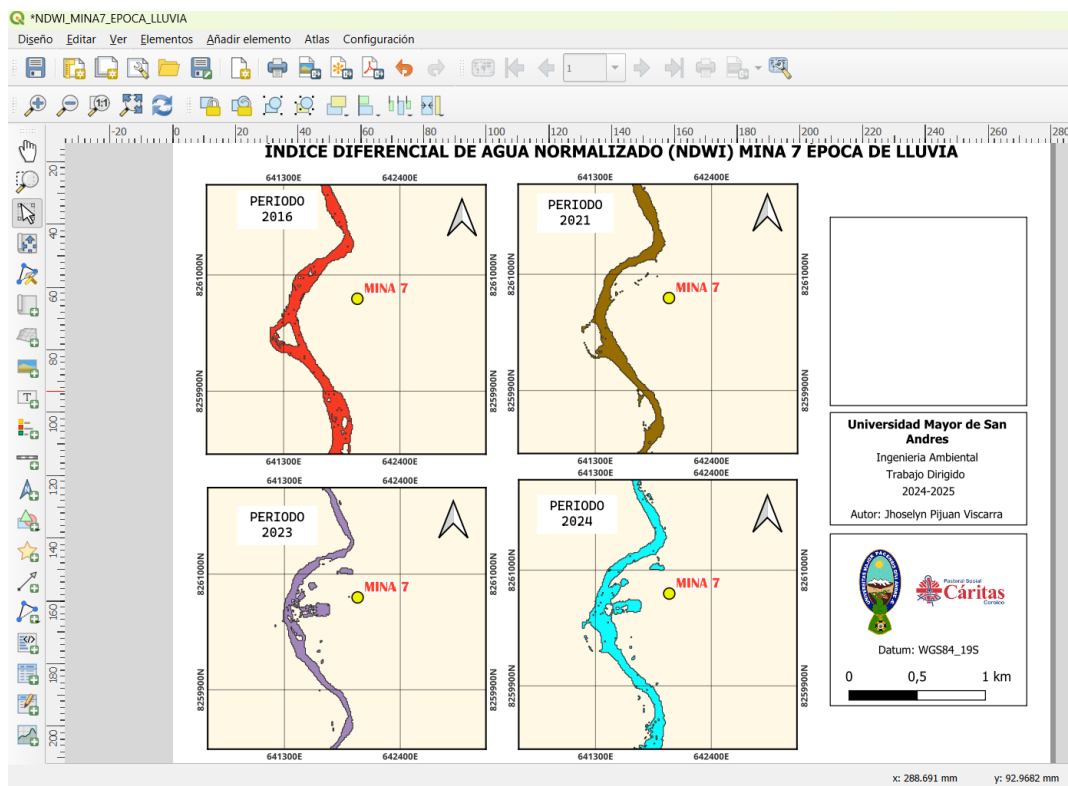


Fuente. Elaboración propia

Nota. La figura muestra la superposición de los NDWIs anuales del río (2016 a 2024) en el rango de 0.61 a 1, para realizar el análisis del NDWI histórico de la época seca.

Figura 5A.

Creación de mapas en QGIS para el análisis



Fuente. Elaboración propia

Nota. Se observa la creación de mapas para el análisis que propone el proyecto mediante la herramienta crear composición de impresión.

Anexo B

Registro fotográfico de actividades mineras

Fotografía 1B.

Actividad minera N°3 en operación año 2024



Nota. Se observa operaciones de excavación, deforestación y creación de piscinas para extracción de oro realizadas por la actividad minera 3 además del empleo de maquinaria pesada, Caritas Coroico, 2024

Fotografía B2.

Actividad minera N°6 en operación año 2024



Nota. Se observa actividades de excavación, desforestación, creación de desarrolladas por la mina 3, Caritas Coroico, 2024.

Fotografía B3.

Actividad minera N°6 en operación año 2024



Nota. La figura muestra que la comunidad de Kelequelera se encuentra adyacente a las operaciones realizadas por la mina 3, Caritas Coroico, 2024.

Fotografía 4B

Actividad minera N°7 en operación año 2024



Nota. La figura muestra remoción de sedimentos, corte de taludes y acumulación de sedimentos realizados por la minería aluvial, Caritas Coroico, 2024.

Fotografía B6

Uso de maquinaria por parte de la Actividad minera



Nota. Se observa el empleo de maquinaria pesada como excavadoras y volquetas trabajando en el lecho y las márgenes del río, Caritas Coroico, 2024.

Fotografía B7

Actividad minera N°9 en operación año 2024



Nota. Se observa el corte de la montaña adyacente al río y remoción de sedimentos todo realizado muy próximo a viviendas, Caritas Coroico, 2024

Fotografía B8

Expansión de la actividad de extracción de oro



Nota. La actividad no se desarrolla a pequeña escala ya que se observa piscinas artificiales probablemente usada para el lavado de sedimentos, además de concentración de maquinaria y operaciones que influyen en la geomorfología del río, Caritas Coroico, 2024.

Fotografía B9

Reconocimiento de actividades mineras



Nota. Identificación de actividades mineras desde la carretera Caranavi – Guanay realizada con técnicos de Caritas Coroico en noviembre 2024, esta actividad permitió el reconocimiento y georreferenciación de 9 minas activas, todo se desarrolló de manera discreta desde la carretera para evitar posibles conflictos o susceptibilidades por parte de la actividad minera, Caritas Coroico, 2024.

Anexo C

Artículos normativos relevantes sobre la actividad minera en Bolivia

1) Disposiciones de la Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia sobre los recursos naturales

Art. 349. I. Los recursos naturales son de propiedad y dominio directo, indivisible e imprescriptible del pueblo boliviano, y corresponderá al Estado su administración en función del interés colectivo.

Art. 348. II. Los recursos naturales son de carácter estratégico y de interés público para el desarrollo del país.

Art. 369. I. El Estado será responsable de las riquezas mineralógicas que se encuentren en el suelo y subsuelo cualquiera sea su origen y su aplicación será regulada por la Ley. Se reconoce como actores productivos a la industria minera estatal, industria minera privada y sociedades cooperativas.

Art. 370. I. El Estado otorgará derechos mineros en toda la cadena productiva, suscribirá contratos mineros con personas individuales y colectivas previo cumplimiento de las normas establecidas en la ley.

2) Ley N°1333 del Medio Ambiente

Art. 70. La explotación de los recursos minerales debe desarrollarse considerando el aprovechamiento integral de las materias primas, el tratamiento de materiales de desecho, la disposición segura de colas, relaves y desmontes, el uso eficiente de energía y el aprovechamiento racional de los yacimientos.

Art. 72. El Ministerio de Minería y Metalurgia, en coordinación con la Secretaría Nacional del Medio Ambiente, establecerá las normas, técnicas correspondientes que determinarán los límites permisibles para las diferentes acciones y efectos de las actividades mineras.

3) Ley N°535 de Minería y Metalurgia

Art. 2. I. Los recursos minerales, cualquiera sea su origen o forma de presentación existentes en el suelo y subsuelo del territorio del Estado Plurinacional de Bolivia, son de propiedad y dominio directo, indivisible e imprescriptible del pueblo boliviano; su administración corresponde al Estado con sujeción a lo previsto en la presente Ley.

Art. 2. II. Ninguna persona natural o colectiva, aun siendo propietario del suelo, podrá invocar la propiedad sobre los recursos minerales que se encuentren en el suelo y subsuelo.

Art. 5. Son principios de la presente Ley:

e. Responsabilidad Social en el aprovechamiento de recursos mineros en el marco del desarrollo sustentable, orientado a mejorar la calidad de vida de las y los bolivianos.

g. Reciprocidad con la Madre Tierra. El desarrollo de las actividades mineras deberá regirse en el marco de lo establecido en la Constitución Política del Estado, la Ley N° 300 de 15 de octubre de 2012, Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien, y otra normativa legal aplicable.

h. Protección a Naciones y Pueblos Indígena Originarios en situación de Alta Vulnerabilidad. El Desarrollo de las actividades mineras deberá considerar los cuidados de protección a las naciones y pueblos indígena originarios en situación de alta vulnerabilidad, cuando corresponda.

Art. 39. I. La Autoridad Jurisdiccional Administrativa Minera–AJAM, como entidad autárquica bajo tuición del Ministerio de Minería y Metalurgia, con personalidad jurídica, patrimonio propio, autonomía administrativa, técnica, económica y financiera, es la encargada de la dirección, administración superior, control y fiscalización de la actividad minera en todo el territorio del Estado.

Art. 171. Las actividades aisladas o integradas entre sí de concentración, beneficio, fundición y/o refinación de minerales y metales requerirán Licencia de Operación otorgada por la AJAM.

Art. 172. Para la obtención de la Licencia de Operación, es requisito la licencia ambiental.

Art. 218. I. La Licencia Ambiental para las actividades, obras o proyectos mineros, será otorgada por la Autoridad ambiental competente de acuerdo a la Ley N° 1333 de Medio Ambiente, de fecha 27 de abril de 1992, reglamentos generales, reglamento sectorial y la presente Ley.

Art. 219. Son responsables del cumplimiento de las normas ambientales, los titulares de derechos mineros bajo cualquiera de las modalidades previstas en la presente Ley, cuando realicen actividades mineras, a su propio nombre, o los operadores mineros cuando en virtud de un contrato realicen actividades mineras, así como los titulares de Licencias de Operación

Art. 220. Los actores productivos mineros podrán realizar actividades mineras en áreas protegidas y forestales previo cumplimiento de la normativa ambiental y conexas específicas, y cuando dichas actividades no afecten el cumplimiento de los objetivos de protección del área.

Art. 222. El Ministerio de Minería y Metalurgia, precautelará el cumplimiento de las normas ambientales, en el ámbito de su competencia.

Art. 207. I. De acuerdo con el numeral 15 del Artículo 30 y Artículo 403 de la Constitución Política del Estado, se garantiza el derecho de consulta previa, libre e informada realizada por el Estado a las naciones y pueblos indígena originario campesinos, comunidades interculturales y pueblo afroboliviano, como derecho colectivo y fundamental de carácter obligatorio, a realizarse respecto de toda solicitud bajo la presente Ley, para la suscripción de un contrato administrativo minero susceptible de afectar directamente sus derechos colectivos.

4) Reglamento Ambiental para Actividades Mineras (RAAM)

Art. 3. Los Gobiernos Municipales, dentro del ámbito de su jurisdicción territorial, controlarán y vigilarán el impacto ambiental de las actividades mineras, de conformidad con lo dispuesto por la Ley del Medio Ambiente, sus reglamentos y el presente reglamento.

Art. 5. En cada una de sus operaciones o concesiones mineras, los concesionarios u operadores mineros deben contar con una licencia ambiental para la realización de actividades mineras, conforme a lo establecido en la Ley del Medio Ambiente, sus reglamentos, el Código de Minería y el presente reglamento.



20250722148

**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-2459/2025
La Paz, 29 de julio de 2025**

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **23 de julio de 2025**, por **JHOSELYN ALONDRA PIJUAN VISCARRA** con **C.I. N° 5959625 LP**, con número de trámite **DA 1098/2025**, señala la pretensión de inscripción del Trabajo Dirigido titulado **"ALTERACIONES EN LA GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL DEL CAUCE NATURAL DEL RÍO CORICO (TRAMO CARANAVI - GUANAY) COMO EFECTO DE LA MINERÍA ALUVIAL AURÍFERA"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO:

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "*Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración*".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "*Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión*". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "*la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios*"

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "*...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial*"

Que, el artículo 4, inciso e) de la Ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "*... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...*", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes



de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO:

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Trabajo Dirigido titulado "**ALTERACIONES EN LA GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL DEL CAUCE NATURAL DEL RÍO COROICO (TRAMO CARANAVI - GUANAY) COMO EFECTO DE LA MINERÍA ALUVIAL AURÍFERA**" a favor de la autora y titular: **JHOSELYN ALONDRÁ PIJUAN VISCARRA** con **C.I. N° 5959625 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/LM


Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI

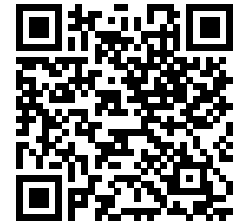
CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO

DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS

LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



NUArj1Mq8Hj27K

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



"2025 BICENTENARIO DE BOLIVIA"



Jhoselyn Alondra Pijuan Viscarra

pijuanvis@gmail.com

cel. 67093354