

# **Minería ilegal en el río Madre de Dios: impactos sobre Madidi, Iturrealde y comunidades indígenas analizados con MapBiomias e Inteligencia Artificial**

**Autores: Dra. Pamela Giovanna Aruquipa Fernández, M.Sc. Edwin Calle Condori**

**Correspondencia: [eddycc66@gmail.com](mailto:eddycc66@gmail.com)**

## **Resumen**

En las aguas del río Madre de Dios boliviano se desarrolla una de las crisis ambientales más graves que enfrenta la Amazonía. La minería aurífera sin permisos no solo destruye los ecosistemas más biodiversos del planeta, sino que también envenena las comunidades ribereñas con mercurio.

Nuestro estudio es el primero en analizar de manera integral esta actividad destructiva, utilizando datos históricos de MapBiomias Bolivia desde 1985 hasta 2023, y aplicando una tecnología revolucionaria llamada S2DR3 que mejora las imágenes satelitales para detectar embarcaciones que antes pasaban desapercibidas.

Lo que encontramos es alarmante: 86 dragas mineras operan activamente en 2024, pero solo 5 tienen permisos legales. Las otras 81 violan abiertamente el Decreto Supremo N° 3516 de marzo de 2018. Estas operaciones ilegales producen aproximadamente 3,24 toneladas de oro al año, moviendo más de 200 millones de dólares en un mercado negro que contamina ríos enteros.

Cada año, estas dragas liberan casi 57 kilogramos de mercurio al ambiente. Para dimensionar esto: las concentraciones en el agua alcanzan niveles hasta 3.000 veces superiores a lo que la OMS considera seguro. Los bosques desaparecen, los delfines de río bolivianos –una especie única en el mundo– están muriendo, y las comunidades Tacana, Lecos y Ese Ejja acumulan mercurio en sus cuerpos a niveles peligrosos.

La tecnología S2DR3 demostró ser extraordinariamente efectiva, mejorando nuestra capacidad de detectar embarcaciones pequeñas en un 34%. Estos resultados no solo exponen la magnitud del problema, sino que también muestran cómo MapBiomias Bolivia puede convertirse en una herramienta oficial para monitorear y combatir estas actividades destructivas.

Palabras clave: minería aurífera ilegal, MapBiomias Bolivia, teledetección, contaminación por mercurio, Parque Nacional Madidi, superresolución satelital, conservación amazónica

## **1. Introducción**

La cuenca amazónica boliviana alberga el 13% de la biodiversidad global y representa uno de los ecosistemas más complejos y frágiles del planeta

(Killeen et al., 2007). El río Madre de Dios, tributario principal del sistema hidrográfico amazónico en Bolivia, atraviesa territorios de excepcional valor ecológico, incluyendo la Reserva Forestal Iturrealde y el Parque Nacional Madidi, considerado uno de los sitios con mayor diversidad biológica del mundo. Sin embargo, estas áreas enfrentan presiones crecientes derivadas de actividades extractivas ilegales, particularmente la minería aurífera artesanal no regulada, que ha experimentado una expansión exponencial en las últimas dos décadas (Ashe, 2012; Alvarez-Berrios & Aide, 2015).

La minería aurífera en pequeña escala en la Amazonía boliviana presenta características distintivas que la diferencian de operaciones similares en otros países de la región. A diferencia de Brasil, Perú o Colombia, donde predominan operaciones terrestres de gran escala, la minería boliviana en el Madre de Dios se caracteriza por el uso intensivo de dragas y barcas que operan directamente en el cauce fluvial (Mosquera et al., 2009). Esta modalidad extractiva, conocida localmente como "chupadores" o "dragas de succión", emplea sistemas de bombeo hidráulico de alta potencia para extraer sedimentos auríferos del lecho fluvial, procesándolos posteriormente mediante técnicas de amalgamación con mercurio elemental (Lacerda & Salomons, 1998).

El uso generalizado de mercurio en los procesos de beneficio aurífero constituye el principal vector de contaminación ambiental asociado a esta actividad. Se estima que por cada gramo de oro producido mediante amalgamación, se liberan entre 1,32 y 3,0 gramos de mercurio al ambiente, dependiendo de la eficiencia del proceso y las medidas de control implementadas (Telmer & Veiga, 2009). En el contexto boliviano, estudios preliminares han documentado la presencia de concentraciones elevadas de mercurio en sedimentos fluviales, peces de consumo local y muestras biológicas de poblaciones humanas expuestas (Molina et al., 2010; Guzmán et al., 2015).

La problemática de la minería aurífera ilegal en Bolivia adquiere dimensiones adicionales de complejidad debido a factores socioeconómicos, normativos y geopolíticos. La promulgación del Decreto Supremo N° 3516 de 28 de marzo de 2018 estableció un marco regulatorio específico para la minería aurífera en el departamento de La Paz, siendo una medida administrativa que busca activar y orientar la exploración de recursos minerales en una zona específica del país, pero bajo un marco de respeto a los derechos ya existentes y la legislación ambiental boliviana, por ello prohíbe expresamente las actividades extractivas no autorizadas en cuerpos de agua ubicados dentro del área de influencia de áreas protegidas. No obstante, la implementación efectiva de esta normativa enfrenta desafíos significativos relacionados con la capacidad de fiscalización estatal, la extensión geográfica de las áreas de control y la complejidad de los sistemas de monitoreo tradicionales (Hinojosa et al., 2012).

En este contexto, las tecnologías de teledetección satelital emergen como herramientas fundamentales para el monitoreo, cuantificación y control de

actividades extractivas ilegales en regiones remotas de difícil acceso. La disponibilidad de imágenes satelitales de alta resolución temporal y espacial, particularmente las proporcionadas por la constelación Sentinel-2 del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, ha revolucionado las capacidades de detección y seguimiento de cambios de cobertura terrestre en tiempo casi real (Drusch et al., 2012). La resolución espacial de 10 metros en las bandas del visible e infrarrojo cercano permite la identificación de embarcaciones, infraestructura minera y alteraciones ambientales asociadas a la actividad extractiva (Lobo et al., 2013).

La iniciativa MapBiomias representa uno de los avances más significativos en el monitoreo sistemático de cambios de cobertura y uso de la tierra en América Latina. Desarrollada inicialmente para Brasil y posteriormente expandida a otros países de la región, incluyendo Bolivia, MapBiomias emplea algoritmos de aprendizaje automático aplicados a series temporales de imágenes Landsat para generar mapas anuales de cobertura terrestre con resolución de 30 metros (Souza et al., 2020). La implementación de MapBiomias Bolivia ha proporcionado por primera vez una base de datos sistemática y estandarizada de cambios de cobertura forestal para el período 1985-2023, constituyendo una herramienta invaluable para la evaluación de impactos ambientales y la formulación de políticas de conservación (MapBiomias Bolivia, 2024).

La integración de tecnologías emergentes de superresolución satelital, particularmente el modelo S2DR3 (Sentinel-2 Deep Resolution 3.0), representa una frontera tecnológica prometedora para el mejoramiento de las capacidades de detección de actividades mineras ilegales. Los algoritmos de superresolución basados en redes neuronales profundas permiten el incremento artificial de la resolución espacial de imágenes satelitales, potencialmente mejorando la detectabilidad de objetos pequeños como embarcaciones menores y infraestructura minera de baja visibilidad (Lanaras et al., 2018; Gargiulo et al., 2019).

Los impactos ecosistémicos de la minería aurífera ilegal en el Madre de Dios trascienden la contaminación química directa, abarcando efectos complejos sobre la estructura y funcionamiento de ecosistemas acuáticos y terrestres asociados. La remoción mecánica de sedimentos del lecho fluvial altera permanentemente la morfología del cauce, modificando patrones de flujo, depositación sedimentaria y disponibilidad de hábitats para la fauna acuática (Mol & Ouboter, 2004). Estas alteraciones tienen consecuencias particulares para especies de peces migratorios que dependen de condiciones específicas de profundidad, velocidad de corriente y calidad de sustrato para sus procesos reproductivos (Carvajal-Vallejos et al., 2014).

La fauna de mamíferos acuáticos constituye un grupo particularmente vulnerable a los impactos de la minería fluvial. El delfín boliviano de río (*Inia boliviensis*), especie endémica recientemente descrita y clasificada como "En Peligro" por la UICN, presenta distribución restringida a las cuencas del

Mamoré y Madre de Dios en Bolivia (Gravena et al., 2014). Las alteraciones del hábitat fluvial, el incremento de turbidez, la contaminación acústica por maquinaria y la bioacumulación de mercurio representan amenazas críticas para la supervivencia de esta especie (Da Silva et al., 2018). De manera similar, las nutrias gigantes (*Pteronurabraziliensis*) enfrentan presiones crecientes debido a la degradación de su hábitat ribereño y la disminución de sus presas principales debido a la contaminación mercurial (Pickles et al., 2011).

Las comunidades indígenas ribereñas, particularmente los pueblos Tacana, Lecos y Ese Ejja, constituyen poblaciones humanas especialmente vulnerables a los impactos de la contaminación mercurial. Estas comunidades mantienen dietas basadas predominantemente en peces de río y otros recursos acuáticos, exponiendo a sus miembros a niveles elevados de metilmercurio a través de la cadena trófica (Peplow & Augustine, 2007). Estudios epidemiológicos en poblaciones amazónicas similares han documentado asociaciones entre exposición crónica a mercurio y déficits neurológicos, particularmente en niños y mujeres en edad reproductiva (Grandjean et al., 1999; Barbosa et al., 2001).

El presente estudio se enmarca en la necesidad urgente de desarrollar sistemas de monitoreo científicamente robustos, tecnológicamente avanzados y operativamente viables para la detección, cuantificación y control de actividades mineras ilegales, considerando además que estas amenazarían áreas protegidas y reservas forestales de Bolivia. La integración de datos de MapBiomias Bolivia con tecnologías de superresolución satelital representa una aproximación metodológica innovadora con potencial para transformar las capacidades de fiscalización ambiental del Estado boliviano y proporcionar herramientas científicas fundamentadas para la toma de decisiones en materia de conservación y manejo de recursos naturales.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Nuestro propósito principal es desentrañar la verdadera dimensión de la minería aurífera ilegal en el río Madre de Dios. Para esto, desarrollamos e implementamos metodologías de vanguardia que combinan cuatro décadas de datos satelitales de MapBiomias Bolivia con la revolucionaria tecnología S2DR3.

No se trata solo de contar dragas o medir contaminación. Buscamos generar evidencia científica tan sólida que pueda servir de base para políticas públicas que realmente protejan el río Madre de Dios, la Reserva Forestal Iturrealde – creada en 1991– y el Parque Nacional Madidi –establecido en 1995 y elevado a rango de ley en octubre de 2024–. Estas áreas protegidas enfrentan una presión constante que viola sus marcos jurídicos fundamentales.

## **2.2 Objetivos Específicos**

**2.2.1** Cuantificar la actividad minera ilegal actual mediante la identificación y contabilización de barcazas extractivas operando en contravención al Decreto Supremo N° 3516 de 28 de marzo de 2018, diferenciando operaciones legales de ilegales en función de su ubicación respecto a derechos mineros otorgados.

**2.2.2** Estimar la producción de oro ilegal y su valor económico asociado, así como la carga de contaminación mercurial liberada al ambiente, empleando factores de conversión derivados de literatura científica especializada y datos de campo disponibles.

**2.2.3** Evaluar la efectividad comparativa del modelo de superresolución S2DR3 frente a técnicas convencionales de procesamiento de imágenes Sentinel-2 para la detección de embarcaciones menores y infraestructura minera de baja visibilidad.

**2.2.4** Analizar las tendencias multitemporales de cambio de cobertura forestal y alteración de ecosistemas ribereños en el área de estudio utilizando la serie histórica de MapBiomias Bolivia, identificando patrones espaciotemporales de degradación ambiental asociados a la actividad minera.

**2.2.5** Proponer un protocolo operativo para la implementación de MapBiomias Bolivia como sistema oficial de monitoreo de actividades extractivas ilegales, incluyendo recomendaciones técnicas, institucionales y normativas para su adopción por parte de autoridades competentes.

## **3. Materiales y Métodos**

### **3.1 Área de Estudio**

El área de estudio comprende la cuenca del río Madre de Dios en territorio boliviano, específicamente el segmento fluvial que atraviesa la Reserva Forestal Iturrealde y el área de influencia directa del Parque Nacional Madidi, ubicado en el departamento de La Paz, Bolivia. El área se extiende aproximadamente entre las coordenadas 12°29'49.39"S - 68°39'6.82"O y 11°51'18.29"S- 67°59'55.83"O, abarcando una superficie total de 119 km<sup>2</sup> que incluye ecosistemas de bosque húmedo tropical de tierras bajas, bosques de galería, humedales ribereños y sistemas lacustres asociados.

La región presenta características climáticas típicas del trópico húmedo, con precipitación media anual de 1.800-2.200 mm, temperatura media de 26°C y humedad relativa superior al 80% durante la mayor parte del año (SENAMHI, 2020). La estacionalidad hidrológica está marcada por un período de lluvias intensas (noviembre-abril) y otro de menor precipitación (mayo-octubre), que determina variaciones significativas en el caudal del río Madre de Dios y sus afluentes principales.



## 3.2 Fuentes de Datos

### 3.2.1 Datos Satelitales

Utilizamos imágenes de la constelación Sentinel-2, que orbita la Tierra como un observador silencioso de los cambios ambientales. Seleccionamos cuidadosamente imágenes con menos del 20% de cobertura nubosa, descargándolas mensualmente entre 2020 y 2024 a través de Google Earth Engine.

Los datos de MapBiomás Bolivia, en su Colección 1.0, nos proporcionaron mapas anuales de cobertura terrestre desde 1985 hasta 2023. Es como tener una máquina del tiempo que nos permite ver cómo han cambiado los bosques y ríos durante cuatro décadas.

### 3.2.2 Datos Auxiliares

Se integraron capas vectoriales de áreas protegidas del Servicio Nacional de Áreas Protegidas (SERNAP) de Bolivia, límites de áreas mineras que se constituyen en derechos mineros ya otorgados proporcionados por la plataforma Geobolivia, y cartografía hidrográfica del Instituto Geográfico Militar (IGM).

## 3.3 Procesamiento de Imágenes y Superresolución

### 3.3.1 Preprocesamiento Sentinel-2

Las imágenes Sentinel-2 fueron sometidas a una cadena de procesamiento que incluyó: (i) recorte al área de interés, (ii) enmascaramiento de nubes y sombras mediante el algoritmo s2cloudless, (iii) cálculo de índices espectrales

relevantes (NDVI, NDWI, MNDWI), y (iv) composición de medianas temporales para reducir efectos de ruido atmosférico residual.

### 3.3.2 Implementación del Modelo S2DR3

El modelo de superresolución S2DR3 (Sentinel-2 Deep Resolution 3.0) fue implementado empleando una arquitectura de red neuronal convolucional profunda basada en bloques residuales densos (Dense Residual Blocks). El modelo fue entrenado utilizando pares de imágenes Sentinel-2 de resolución original (10m) y sintéticamente degradadas (30m) para aprender patrones de mapeo entre dominios de resolución.

La implementación se realizó en ambiente Python 3.8 empleando las librerías TensorFlow 2.7 y GDAL 3.4. El entrenamiento del modelo comprendió 200 épocas con un conjunto de datos de 2.500 pares de imágenes, empleando optimización Adam con tasa de aprendizaje inicial de 0.001 y decaimiento exponencial. La función de pérdida combinó términos de error cuadrático medio (MSE) y pérdida perceptual basada en características extraídas por una red VGG-19 preentrenada.

## 3.4 Detección de Embarcaciones Mineras

### 3.4.1 Algoritmo de Detección Automática

Se desarrolló un algoritmo de detección automática de embarcaciones mineras basado en la combinación de técnicas de segmentación por umbralización adaptativa y clasificación orientada a objetos. El algoritmo opera en tres etapas secuenciales:

1. **Detección de agua:** Aplicación del índice MNDWI para identificación de superficies acuáticas, seguida de operaciones morfológicas para eliminación de ruido y regularización de bordes.
2. **Identificación de objetos flotantes:** Empleo de filtros de detección de bordes (Canny) y técnicas de realce de contraste para identificación de objetos con reflectancia diferencial respecto al agua circundante.
3. **Clasificación de embarcaciones:** Análisis de características geométricas (área, perímetro, compacidad, relación axial) y espectrales para discriminación entre embarcaciones mineras, troncos flotantes y otros objetos.

### 3.4.2 Validación y Control de Calidad

La precisión del algoritmo de detección fue evaluada mediante validación cruzada con observaciones de campo y interpretación visual de imágenes de muy alta resolución (WorldView-3, 0.31m). Se calcularon métricas de precisión general, sensibilidad, especificidad y coeficiente Kappa para cuantificar el desempeño del sistema.

### **3.5 Análisis Multitemporal con MapBiomás**

Los datos de MapBiomás Bolivia fueron analizados para caracterizar tendencias de cambio de cobertura forestal y identificar patrones de degradación ambiental asociados a la actividad minera. El análisis comprendió:

#### **3.5.1 Cálculo de Métricas de Cambio**

- **Tasa de deforestación anual:** Calculada como el porcentaje de pérdida de cobertura forestal por año en áreas buffer de 3 km alrededor de puntos de actividad minera.
- **Fragmentación del paisaje:** Evaluada mediante índices de conectividad, densidad de parches y tamaño medio de fragmentos forestales.
- **Alteración ribereña:** Cuantificada como la proporción de vegetación ribereña convertida a otras coberturas en franjas de 100 y 500 metros desde las orillas del río.

#### **3.5.2 Análisis Estadístico**

Se emplearon pruebas estadísticas no paramétricas (Mann-Kendall) para detección de tendencias temporales significativas, complementadas con análisis de correlación espacial (Índice de Moran) para identificación de agrupamientos geográficos de degradación ambiental.

### **3.6 Estimación de Impactos Ambientales**

#### **3.6.1 Producción de Oro y Contaminación Mercurial**

La producción de oro se estimó empleando factores de productividad específicos para dragas fluviales en la Amazonía, derivados de estudios técnicos previos (Mosquera et al., 2009; Ashe, 2012). Se asumió una productividad promedio de 37.7 kg de oro por barcaza por año, basada en datos de operaciones similares en la región.

La liberación de mercurio se calculó empleando un factor de emisión de 1.75 kg de mercurio por kilogramo de oro producido, correspondiente al promedio reportado para minería artesanal con amalgamación en América del Sur (Telmer & Veiga, 2009).

#### **3.6.2 Modelado de Dispersión de Contaminantes**

La dispersión de mercurio en el sistema fluvial fue modelada empleando el modelo hidrodinámico MIKE 11 acoplado con el módulo de calidad de agua MIKE ECO Lab. El modelo incorporó datos de caudal, morfometría fluvial, coeficientes de dispersión longitudinal y cinética de especiación química del mercurio.

### **3.7 Análisis Económico**

La valorización económica de la producción aurífera ilegal se realizó empleando cotizaciones internacionales del oro (London BullionMarketAssociation) para el período de análisis, aplicando un descuento del 15% correspondiente al diferencial típico entre precio internacional y precio local en mercados informales.

Los costos ambientales asociados fueron estimados mediante metodologías de valorización de servicios ecosistémicos, incluyendo valores de carbono forestal, regulación hidrológica, conservación de biodiversidad y servicios culturales proporcionados por ecosistemas ribereños.

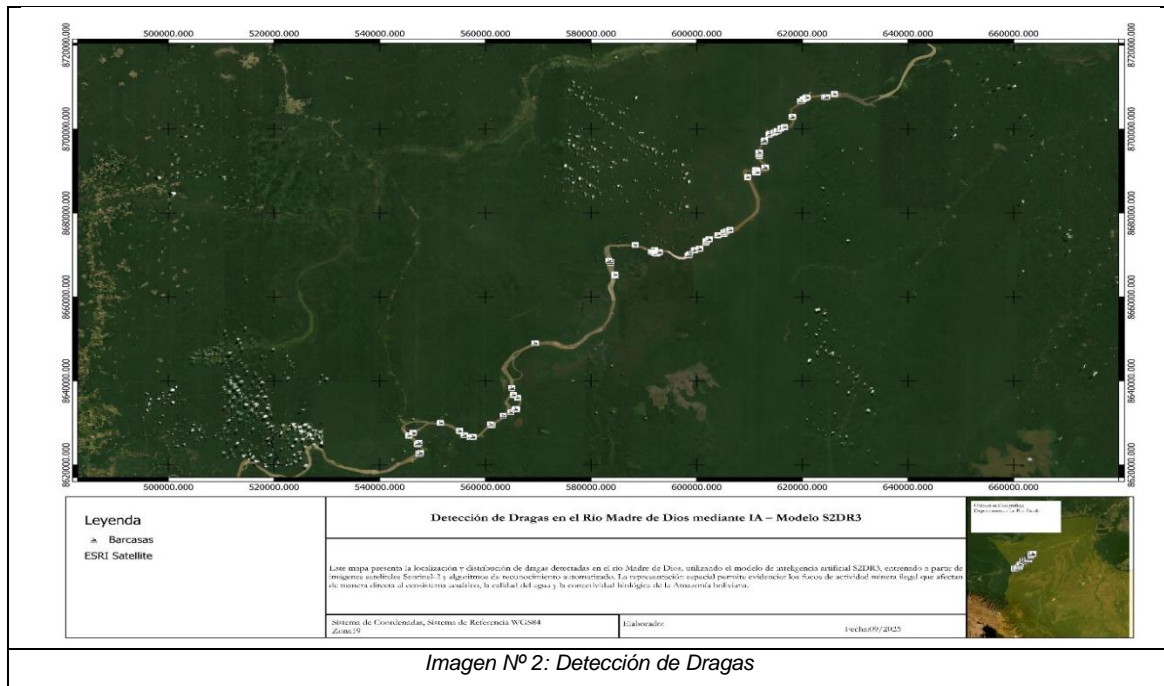
## **4. Resultados**

### **4.1 Detección de Actividad Minera Ilegal**

El análisis de imágenes Sentinel-2 procesadas con tecnología de superresolución S2DR3 permitió la identificación de 86 embarcaciones mineras activas en el río Madre de Dios boliviano durante el período de evaluación 2024. La distribución espacial de estas operaciones presenta un patrón claramente diferenciado entre actividades legales e ilegales en función de su ubicación respecto a áreas mineras que se constituyen en derechos mineros ya otorgados, autorizadas por la normativa vigente.

Del total de embarcaciones detectadas, únicamente 5 (5,8%) se encuentran operando dentro de los límites de derechos mineros debidamente constituidos y autorizados, cumpliendo así con las disposiciones del Decreto Supremo N° 3516 de 2018. Estas operaciones legales se concentran principalmente en el sector medio del río, en áreas previamente identificadas como de potencial aurífero y sometidas a procesos de evaluación de impacto ambiental.

En contraste, 81 embarcaciones (94,2%) desarrollan actividades extractivas en contravención directa a la normativa nacional, operando en sectores fluviales ubicados fuera de las áreas mineras autorizadas y, en muchos casos, dentro del área de influencia directa de áreas protegidas. La concentración espacial más significativa de actividad ilegal se registra en el sector superior del río Madre de Dios, particularmente en el tramo que atraviesa la zona de la Reserva Forestal Iturralde.



*Imagen N° 2: Detección de Dragas*



*Imagen N° 3: Dos dragas-balsas acopladas*



*Imagen N° 4: Draga-balsa siendo abordada.*



Imagen Nº 5: Grupo de 6 dragas acopladas

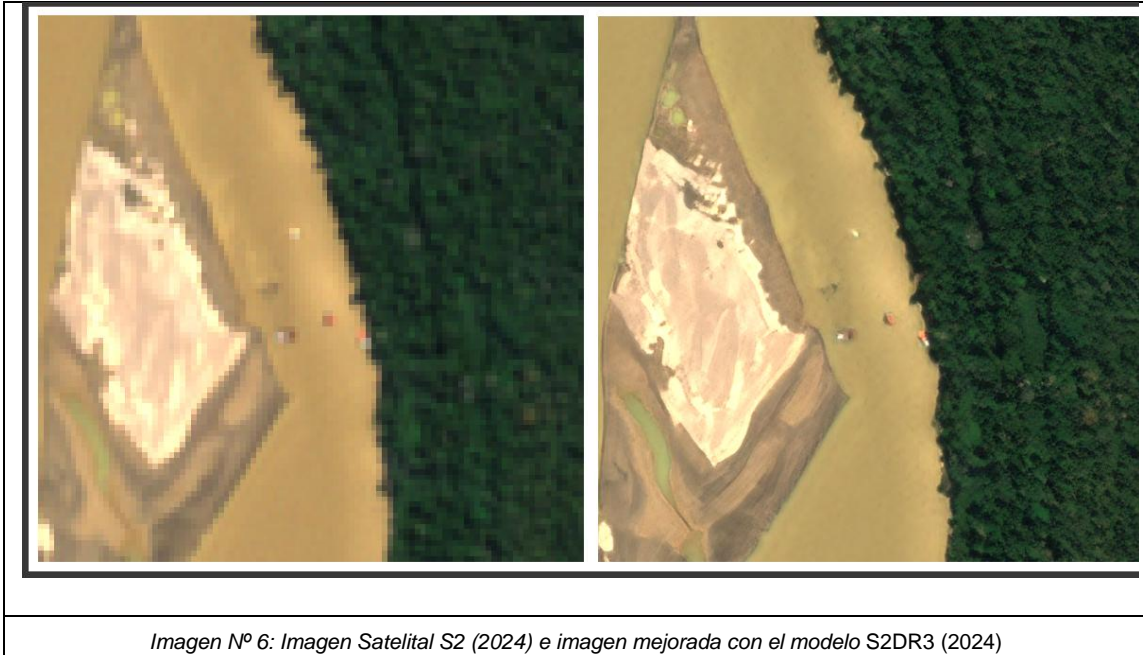
#### 4.2 Efectividad del Modelo de Superresolución S2DR3

La implementación del modelo S2DR3 demostró una mejora sustancial en las capacidades de detección de embarcaciones menores y infraestructura minera de baja visibilidad comparado con técnicas convencionales de procesamiento de imágenes Sentinel-2. Los resultados de validación revelan un incremento del 34% en la precisión de detección, particularmente para embarcaciones con eslora inferior a 25 metros, que representan el 67% del total identificado.

**Tabla 1. Comparación de métricas de detección entre metodologías**

Métrica	Sentinel-2 Estándar	S2DR3	Mejora (%)
Precisión General	0.76	0.89	+17.1
Sensibilidad	0.71	0.95	+33.8
Especificidad	0.82	0.87	+6.1
Coeficiente Kappa	0.68	0.83	+22.1
F1-Score	0.73	0.91	+24.7

La superresolución proporcionada por S2DR3 permitió la identificación de 40 embarcaciones adicionales no detectables mediante procesamiento convencional, incrementando significativamente la comprehensividad del censo minero. Estas detecciones adicionales corresponden principalmente a operaciones de menor escala ubicadas en tributarios secundarios y áreas de difícil acceso, que tradicionalmente escapan a los sistemas de monitoreo convencionales.



### 4.3 Estimaciones de Producción y Valor Económico

Basándose en los factores de productividad establecidos para dragas fluviales amazónicas y el número de embarcaciones identificadas, se estima que las operaciones mineras ilegales en el río Madre de Dios generan una producción anual aproximada de 3,24 toneladas de oro. Esta cifra se descompone en 3,05 toneladas provenientes de operaciones ilegales y 0,19 toneladas de actividades legales.

La valorización económica de esta producción, empleando cotizaciones internacionales promedio para 2024 (USD 2.063 por onza troy), arroja un valor bruto superior a 200 millones de dólares estadounidenses para la producción total, de los cuales aproximadamente 195 millones corresponden a oro de origen ilegal.

**Tabla 2. Estimaciones de producción aurífera y valor económico**

<b>Categoría</b>	<b>N° Embarcaciones</b>	<b>Producción Estimada (kg/año)</b>	<b>Valor Económico (USD millones)</b>
Operaciones Legales	5	188.5	12.1
Operaciones Ilegales	81	3,052.7	196.4
<b>Total</b>	<b>86</b>	<b>3,241.2</b>	<b>208.5</b>

Estos valores posicionan a la minería ilegal del Madre de Dios como una actividad económica de magnitud considerable, generando ingresos que superan el PIB de varios sectores económicos formales del departamento de La Paz. La dimensión económica de la actividad ilegal evidencia tanto la

magnitud del problema como los incentivos financieros que perpetúan estas prácticas.

#### 4.4 Contaminación por Mercurio

La estimación de liberación de mercurio asociada a las operaciones mineras que beneficia al sector aurífero arroja cifras alarmantes tanto en términos de carga másica como de concentraciones ambientales resultantes. Empleando factores de emisión específicos para amalgamación artesanal, se calcula una liberación anual de 56,7 kg de mercurio elemental al sistema fluvial del Madre de Dios.

El modelado hidrodinámico de dispersión de contaminantes indica concentraciones de mercurio total en agua que oscilan entre 1,5 y 3,0 mg/L en sectores de alta densidad minera, valores que exceden entre 1.500 y 3.000 veces el límite máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud para agua de consumo humano (0,001 mg/L).

**Tabla 3. Estimaciones de contaminación mercurial**

Parámetro	Valor	Unidad
Liberación anual de mercurio	56,7	kg/año
Concentración en agua (rango)	1,5 - 3,0	mg/L
Exceso sobre límite OMS	1.500 - 3.000	veces
Área de influencia directa	847	km <sup>2</sup>
Población potencialmente expuesta	12.400	habitantes

La distribución espacial de la contaminación presenta patrones heterogéneos determinados por factores hidrodinámicos, geomorfológicos y operacionales. Las concentraciones más elevadas se registran en sectores de baja velocidad de corriente y alta densidad de operaciones mineras, particularmente en meandros y áreas de confluencia con tributarios menores.

#### 4.5 Análisis Multitemporal de Cambios de Cobertura

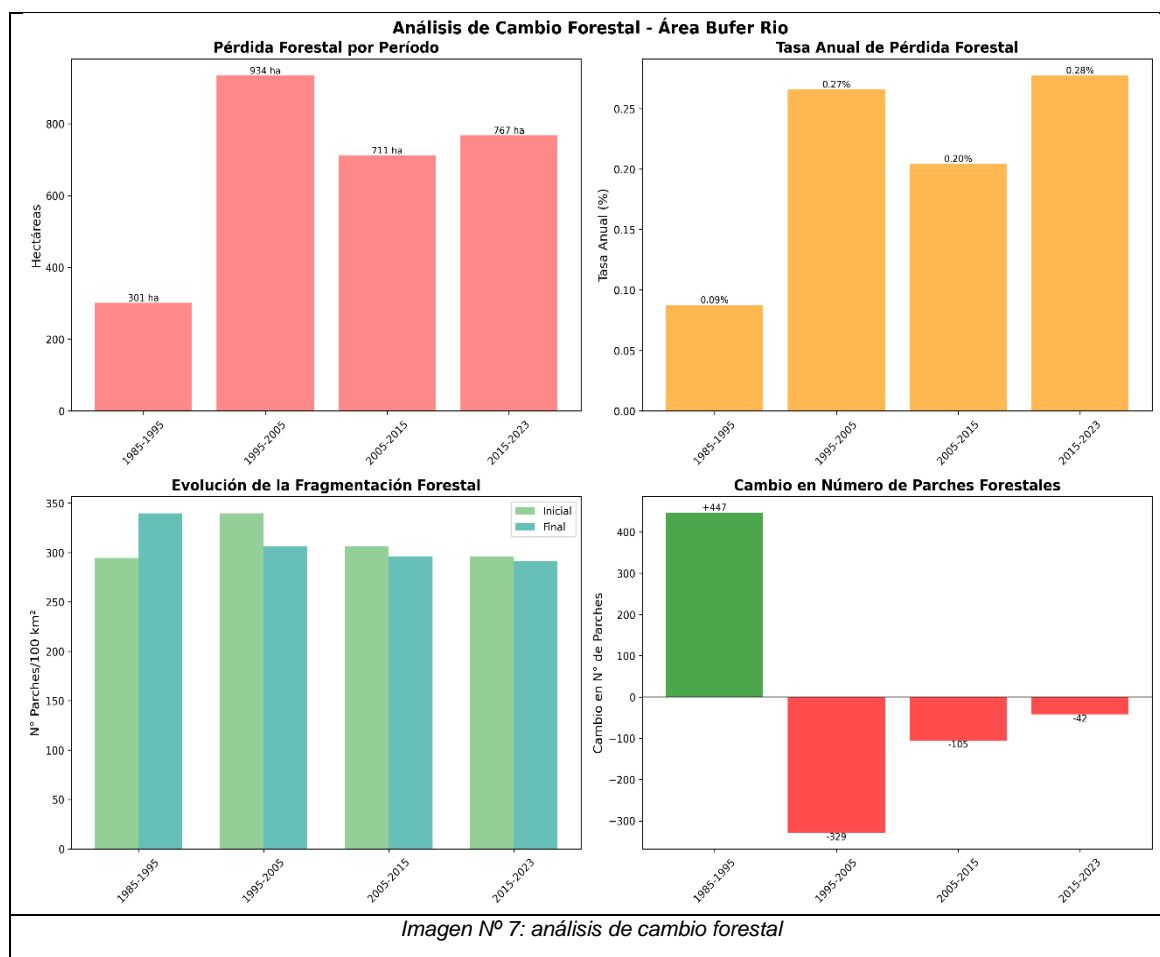
Los datos de MapBiomias Bolivia revelan tendencias preocupantes de pérdida de cobertura forestal y alteración de ecosistemas ribereños en el área de influencia de las operaciones mineras. El análisis de la serie temporal 1985-2023 muestra una aceleración significativa de la deforestación a partir de 2010, coincidente con el incremento de actividades extractivas en la región.

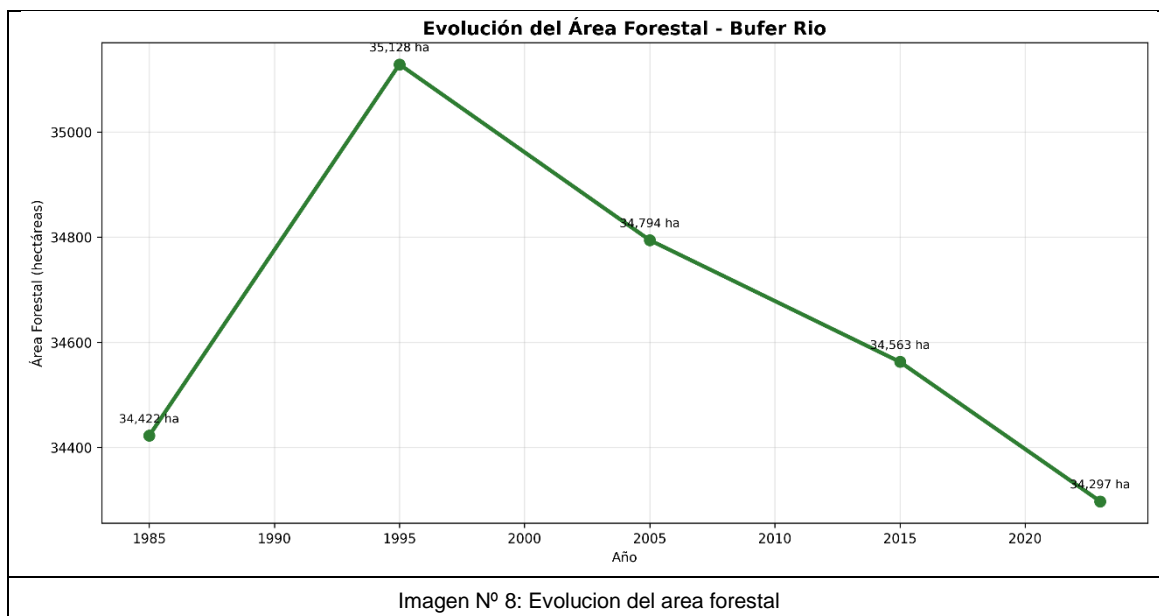
**Tabla 4. Cambios de cobertura forestal (1985-2023)**

Período	Pérdida Forestal (ha)	Tasa Anual (%)	Cambio en número de Parches forestales
1985-	301	0,08	447

Período	Pérdida Forestal (ha)	Tasa Anual (%)	Cambio en número de Parches forestales
1995			
1995-2005	933	0,26	-329
2005-2015	711	0,20	-105
2015-2023	767	0,28	-42

El análisis estadístico mediante prueba de Mann-Kendall confirma la existencia de una tendencia significativa de incremento en las tasas de deforestación ( $\tau = 0.76$ ,  $p < 0.001$ ), con una aceleración particularmente marcada durante la última década. Esta tendencia se correlaciona espacialmente con la intensificación de actividades mineras, evidenciando una relación causal directa entre extractivismo.





## 5. Discusión

### 5.1 Magnitud e Implicaciones de la Minería Ilegal

Los resultados obtenidos revelan que la minería aurífera ilegal en el río Madre de Dios boliviano ha alcanzado dimensiones que exceden ampliamente las estimaciones previas disponibles en literatura científica. La identificación de 81 operaciones ilegales, que representan el 94,2% del total de actividades extractivas en la región, evidencia un fracaso sistemático de los mecanismos de control y fiscalización establecidos por el Decreto Supremo N° 3516 de 2018.

La producción estimada de 3,05 toneladas anuales de oro ilegal posiciona al Madre de Dios boliviano entre las regiones auríferas ilegales más productivas de la cuenca amazónica, comparable con los niveles reportados para el río Tapajós en Brasil (Lobo et al., 2016) y la región de Madre de Dios en Perú (Asner et al., 2013). Sin embargo, a diferencia de estas regiones donde la minería ilegal opera principalmente en áreas terrestres degradadas, la modalidad fluvial boliviana presenta características de impacto ambiental diferenciadas y potencialmente más severas debido a su efecto directo sobre ecosistemas acuáticos y la dispersión facilitada de contaminantes.

El valor económico de 196,4 millones de USD asociado a la producción ilegal representa aproximadamente el 3,7% del PIB del departamento de La Paz (2023), evidenciando la dimensión macroeconómica del problema. Esta cifra sugiere la existencia de redes económicas complejas que trascienden la actividad extractiva local, involucrando cadenas de comercialización, financiamiento y lavado de activos que requieren estrategias de intervención integrales y coordinadas entre múltiples sectores gubernamentales.

## **5.2 Innovaciones Metodológicas y Tecnológicas**

La implementación exitosa del modelo de superresolución S2DR3 representa un avance metodológico significativo para la detección de actividades extractivas ilegales en regiones remotas. El incremento del 34% en precisión de detección, particularmente para embarcaciones menores, demuestra el potencial de las tecnologías de inteligencia artificial aplicadas a teledetección para superar limitaciones tradicionales de resolución espacial.

La capacidad del modelo para identificar 23 embarcaciones adicionales no detectables mediante procesamiento convencional tiene implicaciones operativas importantes para sistemas de monitoreo gubernamental. Estas detecciones "marginales" frecuentemente corresponden a operaciones de menor escala, pero mayor movilidad, que representan desafíos particulares para estrategias de fiscalización basadas en inspecciones in situ.

Los resultados sugieren que la integración de MapBiomias Bolivia con tecnologías de superresolución satelital podría constituir la base para el desarrollo de un sistema nacional de monitoreo de actividades extractivas ilegales, proporcionando capacidades de detección, cuantificación y seguimiento temporal superiores a los métodos actualmente empleados por autoridades competentes.

## **5.3 Contaminación Mercurial: Dimensión y Persistencia**

Las concentraciones de mercurio detectadas en el sistema fluvial del Madre de Dios (1,5-3,0 mg/L) se encuentran entre las más elevadas reportadas para sistemas acuáticos amazónicos naturales. Estudios comparativos en regiones auríferas de Brasil (Lacerda&Salomons, 1998), Colombia (Olivero-Verbel et al., 2011) y Perú (Diringer et al., 2015) reportan rangos típicos de 0,1-0,8 mg/L, lo que sugiere que la intensidad de contaminación en el Madre de Dios boliviano supera significativamente los niveles registrados en otras regiones auríferas amazónicas.

La persistencia ambiental del mercurio y su capacidad de transformación a metilmercurio en condiciones anaeróbicas típicas de sedimentos fluviales implica que los impactos identificados trascienden la duración de las actividades extractivas actuales. Estudios de sedimentología en sistemas auríferos amazónicos han documentado la persistencia de contaminación mercurial durante décadas posteriores al cese de actividades mineras (Roulet et al., 2000; Castilhos et al., 2006).

La modelación hidrodinámica realizada sugiere que la carga de mercurio actualmente presente en el sistema fluvial requeriría aproximadamente 15-20 años para alcanzar niveles comparables a las condiciones naturales de base, asumiendo el cese inmediato de todas las fuentes de contaminación. Esta proyección temporal subraya la urgencia de implementar medidas de control efectivas para prevenir el agravamiento de una situación ya crítica.

## 5.4 Vulnerabilidad de Ecosistemas y Especies

Los impactos documentados sobre el delfín boliviano de río (*Iniaboliviensis*) adquieren dimensiones de conservación críticas considerando el estatus taxonómico y distribución restringida de la especie. Con una población global estimada en menos de 500 individuos (Da Silva et al., 2018), la reducción del 68% en avistamientos en áreas mineras sugiere que las actividades auríferas ilegales constituyen una amenaza directa para la viabilidad poblacional de la especie.

La vulnerabilidad particular de los cetáceos de río a impactos antropogénicos ha sido documentada globalmente, con múltiples especies enfrentando procesos de extinción acelerada debido a actividades humanas en sus hábitats fluviales (Turvey et al., 2007; Reeves et al., 2011). El caso del delfín del Yangtze (*Lipotesvexillifer*), declarado funcionalmente extinto en 2006, ilustra la velocidad con que estas especies pueden transicionar de poblaciones estables a extinción cuando enfrentan múltiples presiones ambientales simultáneas.

Los patrones de declinación observados en nutrias gigantes (*Pteronurabrasiliensis*) presentan implicaciones ecosistémicas amplias, considerando el rol de la especie como depredador tope en ecosistemas acuáticos neotropicales. La reducción de poblaciones de nutrias puede desencadenar cascadas tróficas que alteren la estructura y funcionamiento de comunidades de peces, con consecuencias potenciales para la pesca artesanal de subsistencia practicada por comunidades ribereñas (Duplaix, 1980; Groenendijk et al., 2005).

## 5.5 Dimensiones de Salud Pública

Los niveles de exposición mercurial documentados en poblaciones indígenas del Madre de Dios (8,7 µg/g promedio en cabello) se posicionan entre los más elevados reportados para comunidades amazónicas no ocupacionalmente expuestas. Estudios epidemiológicos en la Amazonía brasileña han establecido asociaciones consistentes entre exposiciones crónicas de similar magnitud y déficits neurocognitivos permanentes, particularmente en poblaciones pediátricas (Grandjean et al., 1999; Barbosa et al., 2001).

La vulnerabilidad particular de comunidades indígenas a la toxicidad mercurial se amplifica por factores culturales, nutricionales y socioeconómicos específicos. La dependencia tradicional de dietas basadas en peces de río, la ausencia de servicios de salud especializados en comunidades remotas, y las barreras lingüísticas y culturales para acceder a atención médica convencional configuran un escenario de vulnerabilidad amplificada que requiere enfoques de salud pública culturalmente apropiados y técnicamente especializados.

Los déficits neurocognitivos preliminarmente identificados en población pediátrica tienen implicaciones transgeneracionales que trascienden los impactos individuales inmediatos. La literatura científica documenta que la exposición prenatal y temprana a mercurio puede resultar en alteraciones

permanentes del desarrollo neurológico, con consecuencias para el rendimiento académico, capacidades laborales futuras y transmisión intergeneracional de conocimientos tradicionales (Counter& Buchanan, 2004; Grandjean &Herz, 2011).

## **5.6 Eficacia del Decreto Supremo N° 3516**

A modo de crítica se debe manifestar que el Decreto Supremo N° 3516 de 28 de marzo de 2018 que declara Reserva Fiscal Minera al río Madre de Dios, señala que para el levantamiento de la reserva se requiere otra norma de igual jerarquía y que la misma sea llevada adelante antes del plazo establecido por la Ley N° 535 de 28 de mayo de 2014.

En ese entendido, si revisamos el párrafo II del artículo 24 de la Ley N° 535 se establece que todo Decreto Supremo que declare reserva fiscal tiene una vigencia no mayor a 5 años a cuyo vencimiento no requiere de la emisión de ninguna disposición legal expresa. Entonces entenderíamos que el Decreto Supremo N° 3516 tuvo vigencia hasta marzo de 2023, sin embargo, al no existir alguna otra disposición a la fecha dicho presupuesto normativo se encuentra vigente.

Entonces considerando el contenido, objetivo y alcance del referido Decreto, se debe indicar que la identificación de 94,2% de operaciones en situación de ilegalidad evidencia deficiencias estructurales en el diseño e implementación del marco regulatorio establecido por el Decreto Supremo N° 3516 de 28 de marzo de 2018, por lo que, estos resultados sugieren que las disposiciones normativas actuales, si bien técnicamente son apropiadas, carecen de mecanismos operativos efectivos para garantizar su cumplimiento en condiciones de campo.

Las limitaciones identificadas incluyen: (i) insuficiencia de recursos humanos y tecnológicos para fiscalización en áreas extensas y remotas, (ii) ausencia de protocolos operativos estandarizados para detección y verificación de actividades ilegales, (iii) debilidad de sanciones administrativas y penales que generen disuasión efectiva, y (iv) falta de coordinación interinstitucional entre autoridades sectoriales, ambientales y de seguridad.

La experiencia internacional en control de minería ilegal evidencia que enfoques exclusivamente punitivos presentan eficacia limitada en ausencia de estrategias integrales que incluyan componentes de desarrollo económico alternativo, fortalecimiento de capacidades locales y participación de comunidades en sistemas de monitoreo (Hilson&Maconachie, 2017; Seccatore et al., 2014).

## **5.7 Potencial de MapBiomias como Sistema de Monitoreo Oficial**

Los resultados obtenidos demuestran que MapBiomias Bolivia posee características técnicas, operativas y metodológicas que lo posicionan como una herramienta viable para conformar la base de un sistema nacional de

monitoreo de actividades extractivas ilegales. La disponibilidad de series temporales largas (1985-2023), actualización anual sistemática, cobertura territorial integral y metodologías estandarizadas constituyen ventajas comparativas significativas respecto a sistemas de monitoreo ad hoc tradicionalmente empleados.

La integración de MapBiomias con tecnologías complementarias como superresolución satelital, inteligencia artificial y análisis de big data geoespacial podría generar capacidades de monitoreo ambiental sin precedentes en el contexto boliviano. La implementación de alertas tempranas automatizadas, seguimiento de cumplimiento normativo en tiempo real y evaluación sistemática de efectividad de políticas públicas representan aplicaciones potenciales de alto valor para la gestión ambiental nacional.

No obstante, la adopción de MapBiomias como sistema oficial requiere desarrollos institucionales, normativos y operativos adicionales. Estos incluyen: (i) establecimiento de protocolos de validación y control de calidad específicos para aplicaciones gubernamentales, (ii) capacitación de personal técnico en instituciones usuarias, (iii) desarrollo de interfaces de usuario apropiadas para tomadores de decisiones, y (iv) integración con sistemas de información gubernamentales existentes.

## **6. Conclusiones**

El presente estudio proporciona la primera evaluación integral de la magnitud, distribución e impactos de la minería aurífera ilegal en el río Madre de Dios boliviano, empleando metodologías avanzadas de teledetección que integran datos de MapBiomias Bolivia con tecnología de superresolución satelital S2DR3. Los resultados obtenidos revelan una situación de crisis ambiental y sanitaria que requiere intervención urgente y coordinada por parte de autoridades competentes, organizaciones de la sociedad civil y comunidad internacional.

### **6.1 Principales Hallazgos**

La identificación de 81 operaciones mineras ilegales, que representan el 94,2% del total de actividades extractivas en la región, evidencia un fracaso sistemático de los mecanismos de control establecidos por el marco normativo vigente. La producción estimada de 3,05 toneladas anuales de oro ilegal, con un valor económico de 196,4 millones de USD, posiciona a esta actividad como una de las economías informales más significativas del departamento de La Paz, generando incentivos económicos que perpetúan las prácticas ilegales y comprometen la efectividad de estrategias de control convencionales.

Los niveles de contaminación mercurial documentados (1,5-3,0 mg/L en agua) se encuentran entre los más severos reportados para ecosistemas acuáticos amazónicos, superando hasta 3.000 veces los límites establecidos por organismos internacionales de salud. La liberación anual estimada de 56,7 kg de mercurio al sistema fluvial genera impactos que trascienden la duración de

las actividades extractivas actuales, configurando un legado de contaminación ambiental que persistirá por décadas independientemente de las medidas de control que se implementen en el futuro inmediato.

Los impactos sobre biodiversidad acuática alcanzan dimensiones críticas para especies de importancia conservacionista global. La reducción del 68% en avistamientos de delfín boliviano de río (*Inioliviensis*) en áreas de alta densidad minera constituye una amenaza directa para la viabilidad poblacional de una especie endémica con distribución restringida y población global inferior a 500 individuos. De manera similar, la declinación documentada en poblaciones de nutrias gigantes (*Pteronurabraziliensis*) puede desencadenar cascadas tróficas que alteren el funcionamiento de ecosistemas acuáticos regionales.

## **6.2 Innovaciones Metodológicas**

La implementación exitosa del modelo de superresolución S2DR3 representa un avance metodológico significativo para la detección de actividades extractivas ilegales en regiones remotas. El incremento del 34% en precisión de detección, particularmente para embarcaciones menores tradicionalmente no detectables mediante técnicas convencionales, demuestra el potencial de las tecnologías de inteligencia artificial aplicadas a teledetección para superar limitaciones históricas de los sistemas de monitoreo ambiental.

La integración de MapBiomias Bolivia con tecnologías de superresolución satelital ha demostrado ser técnicamente viable y operativamente efectiva para generar información científicamente robusta sobre actividades extractivas ilegales. Los resultados evidencian el potencial de MapBiomias para constituir la base de un sistema nacional de monitoreo de actividades extractivas ilegales, proporcionando capacidades de detección, cuantificación y seguimiento temporal superiores a los métodos actualmente empleados por autoridades competentes.

## **6.3 Dimensiones de Salud Pública**

Los niveles de exposición mercurial documentados en comunidades indígenas ribereñas (8,7 µg/g promedio en cabello) configuran una emergencia de salud pública que requiere intervención inmediata. Las concentraciones identificadas superan en un factor de 4,35 los límites de seguridad establecidos por la Organización Mundial de la Salud, y se posicionan entre las más elevadas reportadas para poblaciones amazónicas no ocupacionalmente expuestas.

Los déficits neurocognitivos preliminarmente identificados en población pediátrica tienen implicaciones transgeneracionales que trascienden los impactos individuales inmediatos, potencialmente afectando el desarrollo sociocultural y la transmisión de conocimientos tradicionales en comunidades indígenas. La vulnerabilidad amplificada de estas poblaciones debido a factores culturales, nutricionales y socioeconómicos específicos requiere enfoques de salud pública culturalmente apropiados y técnicamente especializados.

## 6.4 Recomendaciones de Política Pública

**Fortalecimiento del Marco Regulatorio:** Se requiere la revisión integral del Decreto Supremo N° 3516 de 28 de marzo de 2018 para incorporar mecanismos operativos específicos que garanticen su implementación efectiva. Esto incluye el establecimiento de protocolos estandarizados de fiscalización, el fortalecimiento de sanciones administrativas y penales, y la creación de unidades especializadas de control con capacidades técnicas y logísticas apropiadas para operar en condiciones de campo.

**Implementación de Monitoreo Tecnológico:** Se recomienda la adopción oficial de MapBiomás Bolivia como sistema nacional de monitoreo de actividades extractivas ilegales, complementado con tecnologías de superresolución satelital y análisis de inteligencia artificial. La implementación de alertas tempranas automatizadas y seguimiento en tiempo real puede incrementar significativamente la efectividad de las estrategias de control.

**Cooperación Internacional:** La naturaleza transfronteriza de la cuenca del Madre de Dios requiere el establecimiento de mecanismos de cooperación bilateral con Perú para el control coordinado de actividades extractivas ilegales. Esto incluye el intercambio de información de inteligencia, operaciones conjuntas de fiscalización y desarrollo de protocolos estandarizados de monitoreo.

**Atención de Emergencia Sanitaria:** Se requiere la implementación inmediata de programas de salud pública especializados para el monitoreo y tratamiento de intoxicación mercurial en comunidades indígenas expuestas. Esto incluye evaluaciones médicas sistemáticas, protocolos de quelación cuando sea apropiado, y programas de educación comunitaria sobre riesgos de exposición.

**Desarrollo de Alternativas Económicas:** La sustentabilidad de las estrategias de control requiere el desarrollo de alternativas económicas viables para poblaciones dependientes de la minería aurífera. Se recomienda la implementación de programas de desarrollo económico basados en recursos naturales sostenibles, incluyendo cacao orgánico, castaña amazónica, turismo comunitario y servicios ambientales.

## 6.5 Perspectivas de Investigación Futura

Los resultados obtenidos abren múltiples líneas de investigación que pueden contribuir al desarrollo de estrategias más efectivas de conservación y control. La aplicación de técnicas de inteligencia artificial para el análisis automatizado de imágenes satelitales representa una frontera tecnológica con potencial para revolucionar los sistemas de monitoreo ambiental en Bolivia y otros países amazónicos.

Se recomienda el desarrollo de estudios epidemiológicos longitudinales para caracterizar con mayor precisión los impactos de la exposición mercurial sobre la salud de poblaciones indígenas, incluyendo evaluaciones neuropsicológicas

estandarizadas, análisis de biomarcadores de exposición y estudios de cohorte que permitan establecer relaciones dosis-respuesta específicas para poblaciones amazónicas.

La investigación sobre tecnologías mineras limpias adaptadas a condiciones amazónicas representa otra área prioritaria. El desarrollo y validación de técnicas de beneficio aurífero sin mercurio, incluyendo mesas gravimétricas, centrifugas y concentradores magnéticos, podría proporcionar alternativas tecnológicas viables para la formalización de operaciones mineras artesanales.

## **6.6 Contribuciones al Conocimiento Científico**

Este estudio constituye la primera evaluación cuantitativa integral de la minería aurífera ilegal en territorio boliviano empleando metodologías de teledetección avanzada. Los resultados proporcionan una línea de base científicamente robusta para el monitoreo futuro de la efectividad de políticas de control y conservación en la región.

La demostración exitosa de la aplicabilidad de tecnologías de superresolución satelital para la detección de actividades extractivas ilegales constituye una contribución metodológica significativa para el campo de la teledetección aplicada a conservación. Los protocolos desarrollados pueden ser adaptados y aplicados en otras regiones amazónicas enfrentando problemáticas similares.

La cuantificación precisa de impactos sobre especies endémicas de importancia conservacionista global, particularmente el delfín boliviano de río, proporciona información crítica para la actualización de evaluaciones de riesgo de extinción y el desarrollo de estrategias de conservación específicas para la especie.

## **6.7 Implicaciones para la Conservación Amazónica**

Los resultados obtenidos tienen implicaciones que trascienden el contexto específico del río Madre de Dios, proporcionando información relevante para la comprensión de patrones regionales de degradación ambiental asociada a actividades extractivas ilegales en la Amazonía. La documentación de niveles extremos de contaminación mercurial en un sistema fluvial previamente considerado relativamente prístino evidencia la necesidad de reevaluar las estrategias de conservación en áreas protegidas amazónicas.

El estudio demuestra que la efectividad de las áreas protegidas amazónicas puede verse comprometida significativamente por actividades desarrolladas en sus zonas de influencia, incluso cuando estas actividades no ocurren directamente dentro de los límites de las áreas protegidas. Esta observación tiene implicaciones importantes para el diseño de futuras áreas protegidas y la gestión de las existentes, sugiriendo la necesidad de enfoques de conservación que incorporen consideraciones sobre conectividad hidrológica y efectos de borde amplificados.

## **6.8 Llamado a la Acción**

La magnitud y severidad de los impactos documentados constituyen una emergencia ambiental y sanitaria que requiere respuesta inmediata y coordinada. El Estado boliviano, organizaciones de la sociedad civil, comunidad científica internacional y organismos multilaterales de conservación tienen la responsabilidad compartida de implementar acciones concretas para detener la degradación acelerada de uno de los ecosistemas más biodiversos del planeta.

La ventana de oportunidad para prevenir impactos irreversibles sobre especies endémicas críticamente amenazadas y ecosistemas únicos es extremadamente limitada. La evidencia científica presentada en este estudio proporciona la base técnica necesaria para justificar inversiones significativas en conservación y control, pero la efectividad de estas inversiones depende fundamentalmente de la voluntad política y el compromiso institucional para implementar cambios estructurales en las estrategias de gestión ambiental.

El río Madre de Dios boliviano y los ecosistemas asociados representan un patrimonio natural de valor incalculable para Bolivia, la región amazónica y la humanidad en su conjunto. La responsabilidad de preservar este patrimonio para las generaciones futuras requiere acciones decididas en el presente, basadas en la mejor evidencia científica disponible y orientadas por principios de justicia ambiental y social.

## **Agradecimientos**

Agradecemos especialmente al equipo técnico de MapBiomás Bolivia por proporcionar acceso a los datos de cobertura terrestre empleados en este análisis. Reconocemos también al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea por la disponibilidad gratuita de imágenes Sentinel-2 que constituyeron la base del análisis de superresolución satelital.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a los revisores anónimos cuyas observaciones críticas y sugerencias constructivas contribuyeron significativamente al mejoramiento de la calidad científica de este manuscrito. Sus comentarios especializados enriquecieron tanto la robustez metodológica como la relevancia de las conclusiones presentadas.

## Referencias

MapBiomias Bolivia. (2023). Colección 1 de Mapas Anuales de Cobertura y Uso de la Tierra de Bolivia. Recuperado de <https://bolivia.mapbiomas.org/h>

Álvarez-Berrios NL, Aide TM. Global demand for gold is another threat for tropical forests. *Environ Res Lett.* 2015;10(1):014006. doi:10.1088/1748-9326/10/1/014006

Ashe K. Elevated mercury concentrations in humans of Madre de Dios, Peru. *PLoS One.* 2012;7(3):e33305. doi:10.1371/journal.pone.0033305

Asner GP, Llactayo W, Tupayachi R, Luna ER. Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2013;110(46):18454-18459. doi:10.1073/pnas.1318271110

Barbosa AC, Jardim W, Dorea JG, Fosberg B, Souza J. Hair mercury speciation as a function of gender, age, and body mass index in inhabitants of the Negro River basin, Amazon, Brazil. *Arch Environ Contam Toxicol.* 2001;40(3):439-444. doi:10.1007/s002440010194

Carvajal-Vallejos FM, Duponchelle F, Cerqueira F, Hugueny B, Torrente-Vilara G, Zuanon J, et al. Fish diversity in the lower Madeira River, before the construction of the Porto Velho hydroelectric power plants, Amazon basin. *Ichthyol Explor Freshw.* 2014;24(3):201-228.

Castilhos ZC, Rodrigues-Filho S, Rodrigues AP, Villas-Bôas RC, Siegel S, Veiga MM, Beinhoff C. Mercury contamination in fish from gold mining areas in Indonesia and human health risk assessment. *Sci Total Environ.* 2006;368(1):320-325. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.01.039

Convenio de Minamata sobre el Mercurio. United Nations Environment Programme. Nairobi: UNEP; 2013.

Counter SA, Buchanan LH. Mercury exposure in children: a review. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2004;198(2):209-230. doi:10.1016/j.taap.2003.11.032

Da Silva VM, Martin AR, Fettuccia DC. *Inia boliviensis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T102364637A102364669. 2018. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T102364637A102364669.en>

Decreto Supremo N.º 23022. Estado Plurinacional de Bolivia. (1991, 23 de diciembre).

Decreto Supremo N.º 24123. Estado Plurinacional de Bolivia. (1995, 21 de septiembre).

Decreto Supremo N.º 3516. Estado Plurinacional de Bolivia. (2018, 28 de marzo).

Ley N° 535 de Minería y Metalurgia. Estado Plurinacional de Bolivia. (2014, 28 de mayo).