

# Universidad Nacional de Ingeniería

## Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

### **Análisis de la influencia de las actividades de minería aurífera artesanal y a pequeña escala (MAPE) sobre los cambios morfológicos del río Malinowski**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental

Elaborado por

Elisa Consuelo Portocarrero Trigoso

 [0000-0003-0696-943X](https://orcid.org/0000-0003-0696-943X)

Asesor

Ing. César Augusto Rodríguez Villanueva

 [0000-0001-8672-1234](https://orcid.org/0000-0001-8672-1234)

Asesor externo

Mónica Cristina Moreno Brush

 [0000-0003-3604-5852](https://orcid.org/0000-0003-3604-5852)

LIMA – PERÚ

2024

---

Citar/How to cite	Portocarrero Trigos [1]
Referencia/Reference	[1] Elisa. Portocarrero Trigos, " <i>Análisis de la influencia de las actividades de minería aurífera artesanal y a pequeña escala (MAPE) sobre los cambios morfológicos del río Malinowski.</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---

---

Citar/How to cite	(Portocarrero, 2024)
Referencia/Reference	Portocarrero, Elisa. (2024). <i>Análisis de la influencia de las actividades de minería aurífera artesanal y a pequeña escala (MAPE) sobre los cambios morfológicos del río Malinowski.</i> [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

## ***Dedicatoria***

*A mis padres, Reyes Homero y Luz Angélica, por regalarme la mejor herencia: el valor del conocimiento a través de la educación universitaria.*

*A Paquita, el ángel que me cuida y me acompaña desde cielo.*

*A mis hermanos: Cesi, Daniel, Noemi, Luz, Luquitas y a mi sobrina Danna Madrid, por su motivación constante y por ser mis compañeros de aventuras.*

*A mis abuelitas Milena y Trinidad y demás familiares, por sus consejos y oraciones.*

*A Monica Moreno, por inspirarme a salir de mi zona de confort y explorar nuevas experiencias.*

*A mis amigos, por todo por su apoyo y las inolvidables experiencias compartidas.*

*A Puccita, por llenar mis días de alegría con su compañía incondicional.*

*Y a mí misma, por mi valentía y determinación al enfrentar cada obstáculo en este camino académico y en la vida.*

## **Agradecimientos**

A Monica Moreno Brush, por su acompañamiento y retroalimentación constante en el desarrollo de esta investigación desde su concepción.

A Leo Guerrero e Isabel Quintana por sus valiosos aportes y revisión con enfoque técnico.

A Pedro Picoy por su constante seguimiento y aporte a mi desarrollo profesional.

A Johaam Valladares, Regina Rojas, Betsy Quicaña y Antony Gamarra por su valioso apoyo en la etapa inicial de procesamiento de información geográfica.

Al Centro de Innovación Científica Amazónica (CIN CIA) por proporcionar amablemente los datos de deforestación por MAPE.

A la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, a mi profesor asesor César Rodríguez Villanueva y a cada docente que, con su apoyo y enseñanzas, han sido fundamentales en mi desarrollo profesional.

## Resumen

Los ríos desempeñan un papel crucial en el mantenimiento del equilibrio ecológico, climático y en el desarrollo humano. Por ello, comprender los procesos relacionados con su dinámica y las respuestas a las perturbaciones naturales y humanas es crucial para diseñar e implementar adecuados planes de gestión. En Perú, la región amazónica de Madre de Dios es la más afectada por la minería aurífera artesanal y de pequeña escala (MAPE) país. A pesar de los numerosos estudios sobre el impacto social y ambiental de la MAPE en la región, el efecto de esta actividad en la morfología fluvial aún es poco conocido. Este estudio presenta un análisis multitemporal cuantitativo utilizando imágenes satelitales para evaluar el impacto de la MAPE en la morfología del río Malinowski, un río que destaca en importancia debido a su alta biodiversidad y ubicación dentro de dos áreas naturales protegidas y sus zonas de amortiguamiento en Madre de Dios. Los resultados del análisis de siete parámetros morfológicos (cuatro morfométricos y tres morfodinámicos) en un tramo de aproximadamente 160 kilómetros durante el periodo 1984-2020 evidencian que la morfología del río Malinowski ha sido influenciada por los diferentes niveles de impacto y deforestación minera en el valle geológico. El río presentó un significativo ensanchamiento, reducción de la sinuosidad e incremento de la deposición y migración en su canal, tanto espacial como temporalmente. Asimismo, se determinó que el tipo de maquinaria utilizada en la actividad minera también influyó en las variaciones temporales de algunos de los parámetros evaluados, siendo la MAPE mínimamente mecanizada la que generó mayores cambios morfológicos. Esta investigación representa el primer estudio cuantitativo de las características morfométricas y morfodinámicas del río Malinowski, contribuyendo a la comprensión del impacto de la minería en los ríos de Madre de Dios para una gestión fluvial más efectiva. Además, demuestra la eficacia de las técnicas de teledetección multitemporal para evaluar el impacto de la minería en la geomorfología fluvial de la Amazonía.

Palabras clave — Análisis multitemporal, cambios morfológicos, MAPE, ríos amazónicos

## **Abstract**

Rivers play a critical role in maintaining ecological, climatic and human development balance. Therefore, understanding the processes related to their dynamics and responses to natural and human disturbances is crucial for designing and implementing appropriate management plans. In Peru, the Amazonian region of Madre de Dios is the most affected by artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in the country. Despite the numerous studies on the social and environmental impact of ASGM in the region, the impact of this activity on river morphology remains poorly understood. This study presents a quantitative multi-temporal analysis using satellite imagery to assess the impact of ASGM on the morphology of the Malinowski river, which is of high importance due to its rich biodiversity and location within two protected natural areas and their buffer zones in Madre de Dios. The results of the analysis of seven morphological parameters (four morphometric and three morphodynamic) in a stretch of approximately 160 kilometers during the period 1984-2020 indicate that the Malinowski river's morphology has been influenced by different levels of mining impact and deforestation in the geological valley. The river showed significant widening, reduction in sinuosity and increase in deposition and channel migration, both spatially and temporally. Similarly, it was found that the type of machinery used in mining activity also influenced the temporal variations of some of the evaluated parameters, with minimally mechanized ASGM causing the most significant morphological changes. This research represents the first quantitative study of the morphometric and morphodynamic characteristics of the Malinowski river, contributing to the understanding of the impact of mining on rivers in Madre de Dios for more effective river management. Additionally, it demonstrates the effectiveness of multi-temporal remote sensing techniques for assessing the impact of alluvial gold mining on Amazonian fluvial geomorphology.

**Keywords** — Multitemporal analysis, morphological changes, ASGM, amazonian rivers

## **Acrónimos**

AIDER: Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral

ANA: Autoridad Nacional del Agua

ANP: Área Natural Protegida

CITA - UTEC: Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología

ECA: Estándares de Calidad Ambiental

ha: hectáreas

m: metros

hm<sup>3</sup>: hectómetros cúbicos

MAPE: Minería Artesanal y de Pequeña Escala

MSTAT: Meander Statistics Toolbox

PNBS: Parque Nacional Bahuaja Sonene

SERNANP: Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado

SIG: Sistema de Información Geográfica

UIT: Unidad Impositiva Tributaria

WWF: Fondo Mundial para la Naturaleza

ZA: Zona de amortiguamiento

tm: Toneladas métricas

RNTAMB: Reserva Nacional de Tambopata

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Acrónimos .....	vii
Capítulo I. Parte introductoria .....	9
1.1 Descripción del problema de investigación.....	9
1.2 Objetivos del estudio .....	13
1.2.1 Objetivo general .....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Antecedentes investigativos .....	14
1.4 Hipótesis .....	20
1.4.1 Hipótesis general.....	20
1.4.2 Hipótesis específicas .....	21
1.5 Definición de las variables de estudio.....	21
1.6 Limitaciones del estudio .....	22
Capítulo II. Marco conceptual y marco teórico .....	23
2.1 Marco conceptual .....	23
2.1.1 Minería formal .....	23
2.1.2 Minería no formal .....	24
2.1.3 Minería artesanal y de pequeña escala en la región Madre de Dios.....	25
2.1.4 Impactos de la MAPE en cuerpos de agua de Madre de Dios .....	27
2.1.5 Proceso de formalización minera en Madre de Dios.....	29
2.1.6 Morfología fluvial .....	30
2.1.7 Análisis multitemporal.....	30
2.2 Marco teórico.....	30

2.2.1	Clasificación de los ríos .....	30
2.2.2	Parámetros para la caracterización morfológica de los ríos.....	32
2.2.3	Valle geológico .....	37
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....		39
3.1	Tipo de investigación.....	39
3.2	Técnicas y procedimiento de recolección de información .....	39
3.2.1	Deforestación como indicador de impacto de la MAPE .....	39
3.2.2	Obtención de parámetros morfológicos .....	40
3.2.3	Programas utilizados .....	40
3.3	Procesamiento y análisis de datos .....	41
3.3.1	Fase 1: Preprocesamiento de datos .....	43
3.3.2	Fase 2: Procesamiento de datos .....	53
3.3.3	Fase 3: Posprocesamiento de datos .....	62
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados .....		75
4.1	Deforestación por la MAPE en el área de estudio .....	75
4.1.1	Deforestación por secciones de estudio y tipo de MAPE.....	75
4.1.2	Deforestación por nivel de impacto de la MAPE .....	76
4.2	Análisis de parámetros morfométricos.....	78
4.2.1	Longitud de onda de semimeandro .....	78
4.2.2	Longitud de semimeandro .....	83
4.2.3	Ancho promedio .....	88
4.2.4	Sinuosidad .....	94
4.3	Análisis de parámetros morfodinámicos .....	101
4.3.1	Erosión .....	101
4.3.2	Deposición .....	106
4.3.3	Migración.....	112
4.4	Síntesis y discusión de resultados del análisis los parámetros morfológicos .....	118

Conclusiones .....	124
Recomendaciones .....	126
Referencias bibliográficas .....	127
Anexos .....	142

## Lista de Tablas

	Pág.
<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables .....	21
<b>Tabla 2</b> Programas utilizados para el desarrollo de la investigación .....	41
<b>Tabla 3</b> Características de los subperiodos de estudio .....	49
<b>Tabla 4</b> Satélites Landsat utilizados para la obtención de imágenes satelitales.....	51
<b>Tabla 5</b> Ejemplo de tabla con datos organizados para el análisis estadístico .....	70
<b>Tabla 6</b> Cálculo del área deforestada por MAPE en el área de estudio. ....	76
<b>Tabla 7</b> Extensión de las áreas de deforestación por MAPE (ha) por nivel de impacto y secciones de estudio .....	77
<b>Tabla 8</b> Longitud de onda de semimeandros media (m) por sección y nivel de impacto ..	80
<b>Tabla 9</b> Longitud de semimeandro media (m) por sección y nivel de impacto .....	85
<b>Tabla 10</b> Media del ancho promedio (m) por sección fluvial y nivel de impacto .....	89
<b>Tabla 11</b> Sinuosidad media por sección fluvial y nivel de impacto .....	96
<b>Tabla 12</b> Tasas de erosión (ha/año) media por sección y nivel de impacto .....	103
<b>Tabla 13</b> Deposición (ha/año) media por sección y nivel de impacto.....	107
<b>Tabla 14</b> Tasas de migración media (m/año) por sección y nivel de impacto .....	113

## Lista de Figuras

	Pág.
<b>Figura 1</b> <i>Tipos de operaciones e impactos de la MAPE en la región Madre de Dios</i> .....	27
<b>Figura 2</b> <i>Representación gráfica de la sinuosidad de un semimeandro</i> .....	33
<b>Figura 3</b> <i>Representación gráfica del ancho promedio de un tramo de un río</i> .....	34
<b>Figura 4</b> <i>Representación gráfica de la erosión y deposición en un tramo de río</i> .....	36
<b>Figura 5</b> <i>Representación gráfica de la migración en un tramo de río</i> .....	37
<b>Figura 6</b> <i>Representación gráfica del valle geológico de un río</i> .....	38
<b>Figura 7</b> <i>Flujograma del tratamiento de los datos</i> .....	42
<b>Figura 8</b> <i>Mapa del área de estudio con las subsecciones de análisis A1, A2 y A3</i> .....	45
<b>Figura 9</b> <i>Perfil longitudinal del río Malinowski</i> .....	46
<b>Figura 10</b> <i>Áreas de deforestación por MAPE en el valle de inundación del río Malinowski</i> .....	50
<b>Figura 11</b> <i>Mosaico de imágenes satelitales del año 1984 con aplicación del índice NDVI</i> .....	53
<b>Figura 12</b> <i>Reclasificación del mosaico de imágenes satelitales del río</i> .....	54
<b>Figura 13</b> <i>Imágenes referenciales del proceso de poligonización del río</i> .....	55
<b>Figura 14</b> <i>Separación del canal principal y los canales secundarios del río Malinowski</i> ..	56
<b>Figura 15</b> <i>Imágenes referenciales de la obtención de la línea central del río</i> .....	57

<b>Figura 16</b> Vista de la interfaz QGIS con la extracción de vértices para cada segmento de la línea central del río.....	58
<b>Figura 17</b> Vista de la interfaz de MStaT con las opciones para el ingreso de datos (input data) y opciones avanzadas (advanced settings).....	59
<b>Figura 18</b> Vista de la interfaz QGIS con los puntos de inflexión revisados manualmente	60
<b>Figura 19</b> Imagen referencial del polígono buffer para un tramo del río Malinowski .....	61
<b>Figura 20</b> Vista de la interfaz QGIS con los semimeandros obtenidos para el río Malinowski .....	62
<b>Figura 21</b> Tabla de atributos de las longitudes de onda y de semimeandro .....	64
<b>Figura 22</b> Ventana de la herramienta de cálculo del área de semimeandros.....	65
<b>Figura 23</b> Tabla de atributos de los parámetros morfométricos para el año 2020 .....	66
<b>Figura 24</b> Imágenes referenciales de la obtención del parámetro erosión-deposición.....	68
<b>Figura 25</b> Imagen referencial de la obtención del parámetro migración.....	69
<b>Figura 26</b> Extensión de las áreas deforestadas por MAPE a lo largo del periodo de estudio detalladas por año y sección de estudio. ....	78
<b>Figura 27</b> Variación temporal de la longitud de onda media por niveles de impacto y secciones de estudio .....	81
<b>Figura 28</b> Variación temporal de la longitud de onda media en función de la deforestación por la MAPE .....	82
<b>Figura 29</b> Variación temporal de la longitud de semimeandro media por niveles de impacto y secciones de estudio.....	86

<b>Figura 30</b> <i>Variación temporal de la longitud de semimeandro del río en función de la deforestación acumulada por la MAPE</i> .....	87
<b>Figura 31</b> <i>Gráfico radial de la variación temporal del ancho promedio del río (m) en las tres secciones de estudio</i> .....	90
<b>Figura 32</b> <i>Variación temporal del ancho promedio por niveles de impacto y secciones de estudio</i> .....	91
<b>Figura 33</b> <i>Variación temporal del ancho promedio del río en función de la deforestación acumulada por la MAPE</i> .....	92
<b>Figura 34</b> <i>Variación promedio anual del ancho promedio según tipo de MAPE</i> .....	94
<b>Figura 35</b> <i>Gráfico radial de la variación temporal de la sinuosidad en las tres secciones de estudio</i> .....	97
<b>Figura 36</b> <i>Variación temporal de la sinuosidad por sección y nivel de impacto</i> .....	98
<b>Figura 37</b> <i>Variación temporal del valor medio sinuosidad en función de la deforestación acumulada por la MAPE</i> .....	99
<b>Figura 38</b> <i>Variación promedio anual de la sinuosidad según tipo de MAPE</i> .....	101
<b>Figura 39</b> <i>Variación temporal de la erosión por secciones y nivel de impacto</i> .....	104
<b>Figura 40</b> <i>Variación temporal del valor medio de la erosion en función de la deforestación acumulada por la MAPE</i> .....	105
<b>Figura 41</b> <i>Variación de la deposición por secciones y nivel de impacto</i> .....	108
<b>Figura 42</b> <i>Variación temporal del valor medio de la deposición en función de la deforestación acumulada por la MAPE</i> .....	109

<b>Figura 43</b> <i>Erosión media en los diferentes superperiodos de impacto por la MAPE</i> .....	110
<b>Figura 44</b> <i>Variación en la deposición del río por tipo de MAPE</i> .....	111
<b>Figura 45</b> <i>Variación temporal de la migración por secciones y nivel de impacto</i> .....	114
<b>Figura 46</b> <i>Variación temporal del valor medio de la migración en función de la deforestación acumulada por la MAPE</i> .....	115
<b>Figura 47</b> <i>Migración media en los diferentes superperiodos de impacto por la MAPE</i> .....	116
<b>Figura 48</b> <i>Variación de la migración por tipo de MAPE</i> .....	117

# Capítulo I. Parte introductoria

## 1.1 Descripción del problema de investigación

En la Amazonía, países como Colombia, Bolivia, Brasil y Perú poseen presencia significativa de la minería de oro de tipo artesanal y de pequeña escala. En Colombia, la extracción ilícita de oro representa más del 80% de la producción del país, siendo el departamento amazónico de Chocó el más afectado por dicha actividad (OEA, 2022). En Bolivia, departamentos como Pando, Beni y La Paz han presentado un impacto significativo en cuanto a contaminación ambiental y deforestación a causa de esta actividad. Del mismo modo, en Brasil se enfrenta una situación similar debido a la MAPE en departamentos amazónicos como Amazonas, Pará y Rondônia, donde se ha deforestado grandes extensiones de bosques y se ha puesto en riesgo a varias comunidades indígenas aledañas (Heck & Tranca, 2014) . En Perú, la región Madre de Dios constituye una de las regiones más afectadas por esta actividad.

Madre de Dios es la tercera región más extensa del Perú y representa el 15% de la Amazonía peruana. Esta región es conocida por ser uno de los espacios geográficos con los mayores índices de diversidad biológica en el mundo, lo que le ha valido el reconocimiento como la Capital de la Biodiversidad del Perú (Ley N° 26311, 1994). La región posee récords de cantidad de especies y es hogar de más de 32 comunidades nativas y población en situación de aislamiento y contacto inicial (WWF, 2022). Actualmente, Madre de Dios alberga seis Áreas Naturales Protegidas (ANP): la Reserva Nacional Tambopata, los Parques Nacionales Manu, Bahuaja Sonene y Alto Purús y las Reservas Comunales Amarakaeri y Purús (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado - SERNANP, s.f.). Múltiples esfuerzos nacionales e internacionales de entidades públicas y privadas se han puesto en práctica para proteger los bosques y la mega diversidad de flora y fauna de Madre de Dios (Sociedad Peruana de Derecho Ambiental, 2014; Ministerio del Ambiente - MINAM, s.f.; Damonte, 2021; G. H.

Damonte, 2018). Sin embargo, la biodiversidad de la región permanece en constante amenaza por el crecimiento urbano, la expansión de las áreas agrícolas y actividades extractivas no controladas, como la tala ilegal y la minería ilegal (Prevenir Amazonía, s.f.).

La minería aurífera en Madre de Dios tiene una historia de más de 70 años (Leiva, 2022). Sin embargo, ha sido con el aumento del precio del oro y la falta de alternativas económicas que la minería artesanal y de pequeña escala (comúnmente abreviada MAPE) de oro se ha expandido, generando impactos sociales y ambientales negativos (Caballero Espejo et al., 2018a). Estos impactos incluyen la degradación de los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como cambios en las características morfológicas de los ríos (CINCIA, 2021). Se estima que la MAPE de oro en Madre de Dios deforestó casi 100 000 ha de bosque entre 1984 y 2017, y otras 18 421 ha entre 2021 y 2022 (Finer & Mamani, 2023). Entre 2021 y 2022, el 23.4% (4304 ha) de la deforestación se realizó fuera del Corredor Minero<sup>1</sup>, es decir, fue de carácter ilegal (Finer & Mamani, 2023). Asimismo, la MAPE en Madre de Dios se asocia a impactos sociales como la exposición a productos químicos tóxicos como el cianuro y mercurio, falta de medidas de seguridad adecuadas, trabajo infantil, explotación laboral y vulneración de los derechos de pueblos indígenas y comunidades rurales vulnerables (Osores Plenge et al., 2012; Heck & Tranca, 2014).

La zona minera La Pampa se ubica entre los kilómetros 98 y 115 de la Carretera Interoceánica Sur (Tramo 3) y, a la fecha de esta investigación, tiene una extensión de aproximadamente 20 kilómetros de largo por 5 kilómetros de ancho (González, 2020). La MAPE en esta área se registra aproximadamente desde el 2007, poco después de la pavimentación de la Carretera Interoceánica. Al inicio, La Pampa, conocida como

---

<sup>1</sup> Área delimitada por el gobierno peruano para organizar y promover la minería formalizada en Madre de Dios (Anexo 1 del Decreto Legislativo N° 1100). Actualmente, la MAPE que se realiza en esta área puede tener carácter formal, informal o ilegal.

Guacamayo, se ubicaba en la margen izquierda de la carretera; sin embargo, el avance descontrolado de las actividades de extracción del oro en los años subsiguientes provocó que en el 2009 la MAPE se expandiera hacia la margen derecha de la carretera, invadiendo la ZA de la RNTAMB. En el año 2015, la minería ilegal ingresó a la RNTAMB, afectando casi 760 ha de bosque protegido en solo un año (Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral [AIDER], 2021).

La zona minera Alto Malinowski se ubica en la cuenca alta del río Malinowski, aguas arriba y al oeste de La Pampa, dentro de las ZA del PNBS y la RNTAMB. Esta zona representa la mayor parte del área de estudio de esta investigación. Se estima que entre los años 2017 y 2019, los mineros ilegales deforestaron aproximadamente 1700 hectáreas en esta zona, de las cuales el 20% ocurrió en 2019 (Finer & Mamani, 2020b).

El proyecto «Monitoreo de la Amazonía Andina (MAAP)<sup>2</sup>», una iniciativa de la organización Amazon Conservation que monitorea la deforestación en la Amazonía utilizando imágenes satelitales, reporta que la MAPE aurífera ilegal en La Pampa y Alto Malinowski ha alterado la dinámica natural de los ríos de la microcuenca del río Malinowski (Finer & Novoa, 2016; Finer & Novoa, 2017; Finer & Mamani, 2020b; Finer & Mamani, 2020a). Desde 2016, el cauce del río ha pasado de ser «definido» a «más ancho y esparcido» (Finer & Novoa, 2016). Además, ha experimentado bloqueos y cierres, afectando los patrones normales de inundación, reduciendo el caudal aguas abajo y aumentando la sedimentación en la zona de la desembocadura en el río Tambopata (Finer & Novoa, 2016). Igualmente, como consecuencia del aumento de carga de sedimentos, producto de las actividades de excavación y dragado, la turbidez del agua y la erosión de las riberas han aumentado, lo que ha disminuido la calidad del agua para consumo humano (Lezama, 2019). El «Plan Maestro de la RNTAMB», un documento de planificación para la gestión de la ANP, también señala que la MAPE ilegal en esta área ha provocado la pérdida

---

<sup>2</sup> <https://www.maaproject.org/es/>

de ecosistemas acuáticos, como lagunas y cochas (lagunas formadas por cortes de meandros de ríos), la degradación de bosques de aguajal y bosques inundables de palmeras, así como la contaminación por mercurio (Resolución Presidencial N°035-2019-SERNANP, 2019).

Asimismo, de acuerdo al reporte del Observatorio del ANA (2010 al 2021), la estación de monitoreo RMali1(Coordenadas UTM WGS 84 Zona 19S: 441129E, 8569956N), ubicado en la desembocadura del Río Malinowski en el Río Tambopata; durante los años 2013, 2014 y 2020 registró la excedencia en las concentraciones de sólidos suspendidos totales con respecto al valor del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) aprobado con mediante Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Categoría 4: Ríos de la selva, lo cual concuerda también con el incremento de un 31% de las concentraciones de este parámetro en el río Malinowski desde 2005 a 2021 (Dethier et al., 2019).

La alta presión que la MAPE ejerce sobre el río Malinowski y las ANP aledañas también ha tenido un impacto en la fauna silvestre. Un ejemplo es el lobo de río (*Pteronura brasiliensis*), especie declarada representativa de la fauna de Madre de Dios (Andina Noticias, 2011), la cual ha tenido que migrar hacia áreas libres de actividad minera (Mongabay Latam, 2019). El aumento de la carga de sedimentos también afecta negativamente el proceso de desove de los peces, inhibe su migración y altera su alimentación; lo que podría llevar a una disminución gradual de la riqueza de peces en los ríos (Timana et al., 2023; Mol & Ouboter, 2004).

Ante la problemática ambiental resultante del avance de la MAPE en las zonas de amortiguamiento de las ANP, que se ubican en la cuenca del río Malinowski y sus impactos en la biodiversidad, en 2019 el Gobierno peruano dio inicio a la operación «Mercurio 2019» con el objetivo de erradicar la actividad minera ilegal en la zona de amortiguamiento de la RNTAMB (Ministerio del Interior, 2019). La operación tuvo un éxito inicial de reducir

aproximadamente el 90% de la deforestación por minería en la zona minera La Pampa, así como el 60% en la zona Alto Malinowski (Finer & Mamani, 2020a). No obstante, la minería ilegal todavía persiste en estas áreas (Castro, 2020).

A pesar de la abundancia de estudios científicos que han examinado los impactos de la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) en los ríos de la región de Madre de Dios, hasta la fecha de esta investigación, no se ha explorado específicamente cómo esta actividad afecta las características morfológicas del río Malinowski. Esta tesis ofrece un análisis cuantitativo exhaustivo de los efectos de la MAPE en la morfología del río Malinowski, incluyendo parámetros morfométricos y morfodinámicos, utilizando el análisis multitemporal de imágenes satelitales. Además, busca responder a la pregunta: ¿Han sido los cambios morfológicos del río Malinowski influenciados significativamente por las actividades asociadas a la minería artesanal y de pequeña escala de oro circundante en el periodo 1984-2020? El propósito de esta investigación es atender esta brecha de conocimiento y contribuir a la comprensión de la dinámica de los ríos amazónicos. Además, se busca aportar a los esfuerzos para mitigar los efectos de la MAPE en la Amazonía peruana y a la formulación de estrategias para la gestión de los ríos impactados por estas actividades mineras.

## **1.2 Objetivos del estudio**

### **1.2.1 *Objetivo general***

Determinar la influencia de las actividades de minería aurífera artesanal y de pequeña escala sobre los cambios morfológicos del río Malinowski en el periodo 1984-2020 a través de un análisis multitemporal cuantitativo.

### **1.2.2 *Objetivos específicos***

- Realizar un análisis multitemporal de imágenes satelitales para la obtención de los parámetros morfológicos del río Malinowski.

- Evaluar la relación entre el aumento de las áreas de deforestación por minería aurífera y las variaciones en la morfología del río Malinowski.
- Evaluar la influencia de los niveles de impacto por minería en las variaciones temporales de los parámetros morfológicos del río.
- Analizar la influencia del método extractivo o tipo de minería, en las variaciones temporales de los parámetros morfológicos del río.

### **1.3 Antecedentes investigativos**

Existen pocos estudios que han examinado cuantitativamente los cambios morfológicos en ríos mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales. La mayoría de estas investigaciones se han llevado a cabo en ríos de Asia y se han centrado en la dinámica natural de los ríos, sin influencia de actividades humanas, para estimar el riesgo de desastres, como las inundaciones. También han evaluado el impacto de actividades humanas, como la construcción de presas y la extracción de grava y arena.

En América Latina, donde se encuentra el río Amazonas, cuya cuenca alberga el bosque tropical más grande del planeta, se han realizado muy pocos estudios hidrogeomorfológicos. Durante la búsqueda bibliográfica para esta investigación, se identificaron solo cuatro estudios en la cuenca del río Amazonas: uno en Colombia, uno en Brasil y dos en Perú, que han investigado los cambios en la planimetría (forma del canal y cauce) de los ríos amazónicos utilizando técnicas de teledetección. En la Amazonía peruana, donde se desarrolla esta investigación, solo se identificó un estudio en Madre de Dios (Estrada et al., 2023a), el cual evaluó la influencia de actividades de minería aurífera aluvial en los parámetros morfológicos del río Madre de Dios durante el mismo periodo que la presente investigación (1984-2020).

A continuación, se describen los estudios científicos identificados durante la búsqueda bibliográfica y que se tomaron en cuenta para la ejecución de esta investigación.

En el norte de India, Vercruysse & Grabowski (2021) evaluaron el impacto humano, específicamente la construcción de represas, sobre el cambio de la planimetría de los ríos del Himalaya, Sutlej y Beas, un sistema fluvial geomórficamente activo de alta importancia hidrológica para la región (Vercruysse & Grabowski, 2021). El área de estudio abarcó la parte baja de las cuencas, aguas abajo de las represas y tuvo dos enfoques: (1) el análisis de diversas métricas del río (área del río, áreas de erosión-deposición, índices de ramificación, ancho promedio, etc.) a diferentes escalas de tiempo (centenarias, anuales, estacionales y episódicas) y (2) el análisis de las conexiones entre los cambios observados y los impulsores humano-ambientales (dinámica natural del río y actividades humanas, por ejemplo minería no metálica o represas). Los autores utilizaron una combinación de mapas históricos e imágenes satelitales (Landsat y Sentinel) para realizar un análisis multitemporal y obtener datos sobre la configuración del río antes y después de la construcción de represas (periodos 1847-1850 y 1989-2018, respectivamente). El estudio concluyó que la planimetría de los ríos estudiados cambió significativamente en todas las escalas de tiempo analizadas, y que la construcción de represas probablemente contribuyó al estrechamiento y enderezamiento y disminución de la sinuosidad del canal a escala de tiempo centenaria.

Otro estudio sobre el impacto de las represas sobre la morfología de ríos es el de Kong et al.(2020). Los autores investigaron los impactos morfológicos producidos por la construcción y operación de la presa Xiaolangdi en la parte baja del río Amarillo, considerado el segundo río más largo de China (cuenca de drenaje de alrededor de 750 000 km<sup>2</sup>). Para ello, se evaluaron los cambios en la planimetría del río (sinuosidad, migración lateral, línea central y estabilidad de canal) en un tramo de aproximadamente 860 kilómetros, dividido en siete secciones, durante el periodo 1987-2017 a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat. El estudio comparó dos periodos: antes y después de la instalación de la presa, revelando un cambio significativo en la migración del canal desde 1987 hasta 2017. Los cambios en el flujo de agua y sedimentos, atribuibles a la implementación de la presa, provocaron la erosión o reducción del área de

muchas islas y barras de arena en el río. En los años posteriores a la instalación de la presa, la mayoría de las secciones de estudio aguas arriba de esta experimentaron un aumento en su sinuosidad y una disminución en la cantidad de canales secundarios. Por otro lado, las secciones de estudio aguas abajo de la presa mantuvieron su sinuosidad, disminuyeron su tasa de migración y presentaron la aparición de nuevos bancos de arena, formados posiblemente por la erosión de las islas y las barras de arena de las secciones aguas arriba.

Entre los estudios realizados en América Latina se identificó la tesis de pregrado de Barajas y Leiva (2016), la cual evaluó los cambios morfológicos del río Sinú, Colombia, en relación con el funcionamiento de la presa Urrá. La tesis examinó cómo la construcción del embalse afectó el comportamiento sedimentológico de una sección de aproximadamente 270 km del río, a través del análisis del caudal, transporte de sedimentos, granulometría, entre otros parámetros. Además, se realizó un análisis multitemporal de parámetros como sinuosidad y radio de curvatura. Contrario a lo esperado, se encontró que la presa no indujo cambios morfológicos en el cauce del río, salvo en áreas específicas. En dichas áreas, el aumento en la capacidad de arrastre del río sería producto de la cantidad de sedimento retenido por el embalse, siendo el tramo inicial después de la presa el más afectado. Una limitación de este estudio es el uso exclusivo de la sinuosidad y el radio de curvatura para analizar los cambios morfológicos del río. La inclusión de parámetros morfométricos, como el ancho promedio, y morfodinámicos, como la erosión y migración, habrían ofrecido una comprensión más completa de la dinámica morfológica del río.

La extracción de arena y grava de los ríos es otra actividad humana que tiene un impacto significativo en la morfología y la dinámica natural de los cursos de agua (Arnaud et al., 2015; Comiti et al., 2011). Si bien el impacto de la extracción de arena y grava en sistemas fluviales ha sido extensamente estudiado (ej: Lehmkuhl & Stauch, 2023; Gruel & Latrubesse, 2021), pocos estudios han analizado el impacto en la morfología fluvial a través

del análisis de imágenes satelitales. En América Latina, no fue hasta el 2018 que se publicó el primer estudio cuantitativo en este tema utilizando métodos de teledetección.

Arróspide et al. (2018) estudiaron los efectos de la extracción de grava en morfodinámica del río Maipo, el río de mayor importancia económica en Chile. El estudio abarcó el periodo 1954-2015, durante el cual la población local aumentó en más de 5 millones, acelerando el cambio del uso del suelo. Los autores analizaron diversos indicadores, como la descarga, la línea central del río, la sinuosidad, el ancho promedio del canal y el uso de suelo, utilizando datos de campo, imágenes satelitales (Google Earth), mapas topográficos e imágenes aéreas. El estudio se enfocó en el área de drenaje del río, que abarcó 15 380 km<sup>2</sup> y se dividió según las actividades antrópicas a lo largo de su curso. Se examinó la correlación de variables, enfocándose específicamente en las zonas intervenidas. Los resultados revelaron una rápida evolución morfológica del cauce del río Maipo durante los 31 años de estudio, con efectos notables como tramos de río con incisiones de hasta 20 m de altura, un aumento de cuatro veces (87 a 368 ha) en la superficie afectada por la extracción de grava y un volumen neto de erosión de 39 millones de m<sup>3</sup>. Todo esto se traduce en un incremento generalizado de la erosión de las orillas del río generado por la extracción de grava en las zonas estudiadas.

En Colombia, se identificó un estudio que investigó la dinámica natural del tramo colombiano del río Amazonas. Se realizó un análisis de los cambios en la forma en planta durante un período de aproximadamente 20 años (1986-2006) a través de un análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat (Rozo et al., 2014). El estudio analizó los cambios en la planta del río (polígono del río y áreas de erosión y deposición) y las características geomorfológicas con el objetivo de identificar la clasificación del patrón del canal que mejor representaba el tramo de estudio. Por otro lado, se investigó la relación entre estos cambios y las variaciones en la descarga. El estudio reportó que el tramo de estudio tuvo una tendencia hacia la deposición a lo largo del periodo de análisis, aunque la

erosión superó a la deposición entre 1994 y 2001. Además, se identificó que las variaciones en la descarga podrían haber sido responsables de la dinámica de deposición y erosión. De acuerdo con los cambios en planta y las tasas máximas de migración, se concluyó que el tramo colombiano del río Amazonas posee un patrón multicanal, que resultó menos activo que los tramos aguas arriba y aguas abajo durante el periodo de estudio.

En Brasil, Morais et al. (2016) analizaron los cambios planimétricos de cuatro tramos del cauce del río Peixe en escalas decenales durante el periodo 1962-2008 utilizando imágenes satelitales Landsat. Los autores examinaron la sinuosidad, longitud de onda y relación entre áreas de erosión y áreas de deposición. El estudio concluyó que los cambios en el cauce del río Peixe podrían representar una adaptación de la morfología fluvial a las intervenciones humanas, como la construcción de embalses y los cambios en el uso del suelo. Asimismo, a lo largo del periodo de estudio, se identificó una disminución en la sinuosidad del cauce del río, un aumento en la longitud de onda de los meandros y una simplificación de la planimetría del cauce del río.

En Perú, como parte de sus tesis de grado, Olivares (2017) investigó los patrones de cambios morfológicos de 13 ríos de la cuenca del río Amazonas durante el periodo 1987-2011. Ninguno de los ríos presentó impacto directo de actividades antrópicas durante el periodo de estudio. El autor realizó un análisis multitemporal utilizando imágenes satelitales de las instituciones ESDI (Earth Science Data Interface) y Global Land Cover Facility Data Source empleando herramientas de sistemas de información geográfica. El análisis incluyó diversos parámetros como ancho de río, longitud de onda, sinuosidad y radio de curvatura, aunque el principal indicador fue la tasa de migración. El estudio reveló que los ríos evaluados tenían un patrón meándrico, con valores de sinuosidad entre 1.5 y 2.5, valores característicos en ríos con naturaleza meándrica tortuosa. Además, se encontró que los ríos con baja pendiente presentaban sinuosidades más altas y una relación directa entre el crecimiento de la tasa de migración y el aumento del radio de

curvatura. La mayoría de los incrementos en las tasas de migración respondieron a cortes de meandro. El estudio concluyó que el proceso de migración del río puede preverse mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales y el cálculo de las sinuosidades de tramos de ríos pertenecientes a una misma zona hidrológica

También en Perú se publicó un libro de guías metodológicas para el desarrollo de líneas base en ríos amazónicos (CITA UTEC, 2021). La sección de caracterización planimétrica y multitemporal de ríos ofrece una metodología detallada para la caracterización planimétrica geomorfológica en ríos amazónicos a partir de imágenes satelitales. La guía destaca diversos aspectos a tomar en cuenta durante el análisis, como el tipo de río a estudiar, el valle geológico, la escala de análisis y la resolución de las imágenes satelitales. Además, la guía sugiere que la temporalidad del análisis debe ser más continua para ríos meándricos (4 años) que para ríos multicanal (6 años). También propone evaluar parámetros tanto estáticos (longitud de semimeandro, longitud de onda, amplitud, ancho promedio del canal principal, sinuosidad) como dinámicos (erosión-deposición y migración). A manera de caso de estudio, esta guía presenta el análisis multitemporal de algunos tramos de los ríos Huallaga, Amazonas, Marañón y , Ucayali en el periodo 1987-2017.

El segundo estudio planimétrico realizado en Perú fue realizado por Estrada et al. (2023a) y es el primer y único estudio cuantitativo de los cambios morfométricos y morfodinámicos del río Madre de Dios. Este estudio utilizó la metodología de la guía metodológica del CITA-UTEC (2021) y se realizó de manera paralela a la ejecución de la presente investigación. Dicho estudio evaluó la posible relación entre la MAPE de oro aluvial llevada a cabo en las laderas del río y sus cambios morfológicos. El análisis de las características morfológicas del río Madre de Dios (migración, erosión-deposición, ancho promedio, longitud de onda y longitud de semimeandro) se realizó en el periodo 1984-2020 utilizando imágenes satelitales Landsat. El estudio concluyó que el aumento en las tasas

de erosión y deposición en el periodo de mayor intensificación de la minería (2012-2020) estuvo relacionado con el aumento de la deforestación causado por esta actividad. Además, se encontró que la migración lateral del río disminuyó durante los periodos de alto impacto por minería, con mayor deforestación, en comparación con los periodos con bajo impacto por deforestación por minería. Por otro lado, no se encontró una relación directa entre los cambios de los parámetros morfométricos (ancho promedio, longitud de onda y longitud de semimeandro) y la deforestación causada por la minería a lo largo del río de estudio. Finalmente, se evidenció que los impactos de la minería aluvial en la sección de estudio del río Madre de Dios trascienden las zonas de impacto directo por deforestación, ya que encontró alteraciones en la dinámica natural de los tramos del río aguas abajo de la minería.

La presente investigación examinó los cambios morfológicos del río Malinowski utilizando herramientas de sensoramiento remoto, considerando como principal referencia la investigación desarrollada por Estrada et al. (2023a). Este estudio, además, consideró periodos de estudios uniformes de 4 años y añadió un análisis más detallado de los cambios morfológicos a una escala temporal de uno o dos años durante el periodo de mayor intensificación de la actividad minera. Además, se realizó una diferenciación en el análisis según los tipos de operaciones de MAPE (altamente mecanizada y mínimamente mecanizada) que se desarrollan en el área de estudio.

## **1.4 Hipótesis**

### **1.4.1 *Hipótesis general***

Las actividades de minería aurífera artesanal y de pequeña escala han influenciado de manera significativa los cambios morfológicos del río Malinowski.

### 1.4.2 Hipótesis específicas

- El análisis multitemporal permite analizar los parámetros morfológicos del río Malinowski.
- El aumento de las áreas de deforestación por minería aurífera presenta correlación con las variaciones en la morfología del río Malinowski.
- Los niveles de impacto por minería presentan influencia significativa sobre las variaciones temporales de los parámetros morfológicos del río.
- El método extractivo presenta influencia sobre las variaciones temporales de los parámetros morfológicos del río.

### 1.5 Definición de las variables de estudio

De acuerdo con la bibliografía revisada y a los objetivos de estudio, las dos variables de estudio, con sus respectivos indicadores, se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

Variable	Tipo por su naturaleza	Tipo por su relación	Indicador	Medio de verificación
Cambios morfológicos	Cuantitativa	Dependiente	Sinuosidad	Análisis multitemporal de imágenes satelitales
			Ancho promedio del canal principal	Análisis multitemporal de imágenes satelitales
			Longitud de semimeandro	Análisis multitemporal de imágenes satelitales
			Longitud de onda de semimeandro	Análisis multitemporal de imágenes satelitales
			Erosión	Análisis multitemporal de imágenes satelitales
			Deposición	Análisis multitemporal de imágenes satelitales
			Migración	Análisis multitemporal de imágenes satelitales
MAPE	Cuantitativa	Independiente	Áreas de deforestación por MAPE	Utilización crítica de datos publicados

*Nota:* Elaboración propia. MAPE: minería artesanal y de pequeña de escala.

## 1.6 Limitaciones del estudio

Esta investigación tuvo como objetivo analizar los efectos de la MAPE en la morfología del río Malinowski durante el periodo 1984-2020 mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales.

Una limitación de este estudio fue la limitada disponibilidad de datos sobre la extensión de las áreas de deforestación por MAPE en el área de estudio en 1984, ya que el estudio de Caballero Espejo et al. (2018a), del cual se obtuvieron los datos de deforestación para esta investigación, solo abarca el periodo 1985-2021. Dado el bajo nivel de deforestación por MAPE observado en el periodo 1984 -2000, esta limitación se abordó asumiendo que la deforestación fue nula en el año 1984. Otra limitación fue la alta nubosidad (>10%) en el mosaico de imágenes satelitales del año 1988, lo que imposibilitó considerar este año como parte del estudio. Ante esto, se optó por trabajar con el año 1987, asumiendo que el río de estudio presentó condiciones similares en ambos años.

Finalmente, se debe tener en consideración que las variaciones morfológicas de los ríos son influenciadas tanto por diversos factores, tanto naturales como antropogénicos, que van más allá de la minería aurífera. La urbanización, deforestación, agricultura extensiva y construcción de infraestructuras también pueden alterar la dinámica natural física de los ríos. Si bien esta investigación se centra en analizar el impacto específico de la minería aurífera en el río de estudio, no puede descartarse la posible influencia de otros factores no evaluados en este estudio.

## **Capítulo II. Marco conceptual y marco teórico**

### **2.1 Marco conceptual**

#### **2.1.1 Minería formal**

En Perú, la minería formal se define como la actividad ejercida por una persona, natural o jurídica, que cuenta con la autorización de inicio o reinicio de actividades de exploración, explotación y/o beneficio de minerales, así como con el título de concesión de beneficio emitido por la autoridad competente (Decreto Legislativo No 1336, 2017). Es decir, se trata de aquellas actividades mineras que cumplen con los requisitos establecidos en la normativa legal correspondiente al sector en términos mineros, ambientales, sociales, laborales y tributarios. La minería formal se subdivide en cuatro estratos: gran escala (o gran minería), mediana escala (o mediana minería), pequeño productor minero y productor minero artesanal (Wiener, 2019).

##### **2.1.1.1 Minería a gran escala**

Este estrato de minería corresponde al régimen general y se caracteriza por tener una capacidad instalada (capacidad máxima de producción) mayor que 5000 toneladas métricas/día, un área de concesión de más de 2000 ha y una producción mínima anual de 1 UIT (unidad impositiva tributaria) por año y por hectárea otorgada para minería metálica y el 10% de una UIT por año y por hectárea otorgada en el caso de minería no metálica (Wiener, 2019).

##### **2.1.1.2 Minería a mediana escala**

Este estrato también corresponde al régimen general y se caracteriza por tener una capacidad instalada que va desde los 350 a 5000 toneladas métricas/día, un área de concesión de más de 2000 ha y una producción mínima anual de 1 UIT por año y por

hectárea otorgada para minería metálica y el 10% de una UIT por año y por hectárea otorgada en el caso de minería no metálica (Wiener, 2019).

### **2.1.1.3 Pequeña minería**

El pequeño productor minero corresponde al régimen de pequeña minería y minería artesanal y se caracteriza por tener una capacidad instalada de hasta 350 toneladas métricas/día, un área de concesión de hasta 2000 ha y una producción mínima anual de 10% de una UIT por año y por hectárea otorgada para minería metálica y el 5% de una UIT por año y por hectárea otorgada en el caso de minería no metálica (Wiener, 2019).

### **2.1.1.4 Minería artesanal**

Este estrato de la minería formal corresponde al régimen de pequeña minería y minería artesanal y se caracteriza por tener una capacidad instalada de hasta 350 toneladas métricas/día, un área de concesión de hasta 2000 ha y una producción mínima anual de 10% de una UIT por año y por hectárea otorgada para minería metálica y el 5% de una UIT por año y por hectárea otorgada en el caso de minería no metálica (Wiener, 2019).

## **2.1.2 Minería no formal**

La minería no formal en Perú abarca las actividades de minería, ya sea metálica o no metálica, que no cumple con la definición de minería formal. Estas actividades generalmente se encuentran dentro del régimen de la pequeña minería y minería artesanal de pequeña escala (secciones 2.1.1.3 y 2.1.1.4), también conocida como MAPE, y pueden clasificarse como informales o ilegales (USAID, 2020; Valdés et al., 2019).

### **2.1.2.1 Minería informal**

La minería informal se refiere a actividades mineras que, aunque son no legales, operan en zonas permitidas y han iniciado un proceso de formalización (Ministerio del Ambiente (MINAM, 2013), o han expresado su voluntad de cumplir con los requisitos legales y obtener las licencias necesarias (Low, 2012).

### **2.1.2.2 Minería ilegal**

Según el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM, 2013), la minería ilegal es la actividad minera que se realiza en áreas prohibidas, como las riberas de ríos, lagunas, cabeceras de cuenca y las zonas de amortiguamiento de ANP. También se considera minería ilegal aquella que utiliza equipo y maquinaria pesada (volquetes, cargadores frontales, etc.), que no corresponde a las categorías del régimen de la pequeña minería y minería artesanal. El Decreto Legislativo N° 1105 (2012) define a los mineros ilegales como aquellos que no cumplen con los requisitos sociales, ambientales, administrativos, y técnicos establecidos por la normativa aplicable o que operan en zonas donde la minería está prohibida.

### **2.1.3 Minería artesanal y de pequeña escala en la región Madre de Dios**

La MAPE es un creciente sector económico en el Perú que se desarrolla todas las regiones del país y se enmarca básicamente en las categorías informal e ilegal de la minería artesanal (Brack et al., 2011; Valdés et al., 2019). En la región amazónica de Madre de Dios, la MAPE se centra en la extracción del oro y se remonta a los años 70 (Callan et al., 2023), siendo actualmente el principal sector económico en dicha región. Sin embargo, la mayoría de las operaciones no cumplen con los requisitos administrativos, técnicos, sociales y ambientales. Si bien existen algunas operaciones en proceso de formalización, el mayor porcentaje opera de manera ilegal en áreas no autorizadas para minería (como

cuerpos de agua y zonas intangibles, como las ANP) y utiliza maquinaria prohibida, generando diversos impactos ambientales (USAID, 2020).

La MAPE en la región de Madre de Dios se desarrolla principalmente de manera aluvial, es decir en las riberas de los ríos y en sus antiguos cursos o paleocauces (Leiva, 2022; Estrada et al., 2023a). El proceso de extracción del oro consiste en la remoción de sedimentos del fondo y las márgenes de los ríos, en su mayoría, haciendo uso de bombas de succión y maquinaria pesada, lo que resulta en la agradación y traslocación de sedimentos de mayor tamaño en las orillas del río (Brack Egg et al., 2011; Dethier et al., 2019). Según el método de extracción y el tipo de maquinaria utilizada, la MAPE en Madre de Dios se clasifica en dos tipos: Minería altamente mecanizada y minería mínimamente mecanizada (véase Figura 1).

#### **2.1.3.1 Minería altamente mecanizada**

Este tipo de minería se caracteriza por el uso de maquinaria pesada, como excavadoras, cargadores frontales y camiones de volteo, para el transporte de sedimentos extraído de los ríos o zonas aledañas a los mismos (Figura 1) (Caballero Espejo et al., 2018a). Estas operaciones generan franjas de 15 a 30 metros de ancho y hasta 500 metros de largo, con pilas de material de desmonte de varios cientos de metros de diámetro por unidad de extracción (Caballero Espejo et al., 2018b).

#### **2.1.3.2 Minería mínimamente mecanizada**

Este tipo de minería utiliza bombas de succión de alta presión conectadas a una manguera que se sumerge en el fondo del río para extraer el sedimento con el material aurífero (Figura 1). La bomba eleva la mezcla de agua, grava y sedimentos auríferos y la transporta a canaletas donde se procesa para la extracción de las partículas de oro. El lodo y los sedimentos que se generan como residuo de este proceso se utilizan generalmente

para rellenar excavaciones producidas por el mismo proceso o se vierten en áreas contiguas (Cabanillas, 2016; MINAM, 2013). En cuanto al cascajo grueso, este se acumula en forma de montículos de menos de 100 metros de diámetro (Caballero Espejo et al., 2018b).

### Figura 1

*Tipos de operaciones e impactos de la MAPE en la región Madre de Dios*



*Nota:* En las fotografías del lado izquierdo se visualiza el tipo de maquinaria e impactos de la minería altamente mecanizada, mientras que al lado derecho los de la minería mínimamente mecanizada. Fuente: Caballero, J. et al. (2018b).

#### 2.1.4 Impactos de la MAPE en cuerpos de agua de Madre de Dios

Una revisión bibliográfica de más de 100 estudios científicos reveló dos categorías de impactos ambientales de la MAPE de oro en los ríos amazónicos: la contaminación por mercurio y la alteración de la dinámica natural física de los ríos (CINCIA, 2021).

La MAPE de oro utiliza mercurio para extraer las partículas de oro de los sedimentos mediante amalgamación. Sin embargo, debido al uso de tecnología rudimentaria y poco

eficiente, el mercurio se pierde durante el proceso, contaminando los suelos y cuerpos de agua circundantes, así como la atmósfera (Moreno-Brush et al., 2020; Moreno-Brush et al., 2016). Actualmente, la MAPE de oro es la mayor fuente de mercurio antropogénico a nivel global (UNEP - UN Environment Programme, 2019). En Madre de Dios, se estima que esta actividad libera aproximadamente 181 toneladas de mercurio al año al medio ambiente (Arana & Montoya, 2017). La contaminación con mercurio en zonas con MAPE genera gran preocupación a nivel nacional e internacional debido a que el mercurio puede convertirse en metilmercurio, un compuesto orgánico capaz de ser absorbido por los organismos vivos, acumularse en los tejidos y dañar el sistema central nervioso (Vargas et al., 2019). Diversos estudios han reportado niveles de mercurio por encima de los límites recomendados para la salud humana y ambiental en poblaciones humanas, fauna silvestre y ecosistemas terrestres y acuáticos de Madre de Dios (Aparicio Alcázar, 2015; Osoreo Plenge et al., 2012; Grandez et al., 2016)

En relación con el impacto en la dinámica física de los ríos, la MAPE aluvial ilegal altera el cauce de los ríos, aumentando la sedimentación, la erosión y el régimen de inundaciones (CINCIA, 2021). Estas alteraciones, a su vez, afectan negativamente a la fauna acuática, incluyendo especies de importancia ecológica y comercial; además se provoca la disminución de la calidad del agua. El notable aumento de sedimentos asociados a la MAPE altera la morfología de los ríos (Estrada et al., 2023a), afecta la diversidad de especies acuáticas (Timana et al., 2023) y el recurso pesquero y especies locales (García et al., 2023), influye en la percepción de la calidad del agua por parte de la población y contribuye al aumento de la vulnerabilidad del ecosistema fluvial frente a sequías e inundaciones (CINCIA, 2021). Otros impactos de la MAPE en la dinámica natural de los ríos incluyen la alteración de la planimetría, las formas de fondo del río e incrementa la escorrentía superficial y la concentración de sedimentos ; Paiva et al., 2023).

### **2.1.5 Proceso de formalización minera en Madre de Dios**

Frente a la problemática de la Minería Artesanal y de pequeña escala en el país, en 2002 se promulgo la Ley N° 27651, cuya finalidad es promover la formalización y el desarrollo sostenible de la pequeña minería y la minería artesanal. A partir de ello, en 2012 a través del Decreto Legislativo N° 1105, se estableció medidas para la interdicción de la minería ilegal y la formalización de la MAPE. Como parte de los requisitos para que los mineros puedan formalizarse destacan los siguientes: i) Inscribirse en el Registro en el Registro Integral de Formalización Minera (REINFO), ii) Presentación de una Declaración de Compromisos y la iii) Implementación del Instrumento de Gestión Ambiental para la Formalización de las Actividades de Pequeña Minería y Minería Artesanal (IGAFOM) Correctivo y Preventivo (Cano, 2021).

La finalidad del requerimiento de la presentación e implementación del IGAFOM es la prevención, mitigación y corrección de impactos ambientales actuales y futuros que se producen en el proceso de extracción minera. Este instrumento es presentado por los titulares ante las Direcciones regionales de Energía, Minas e Hidrocarburos (DREMH) de cada departamento y como parte del proceso de evaluación, esta entidad junto a las entidades opinantes como la Autoridad Nacional de Agua (ANA), desarrolla la revisión técnica, administrativa y la evaluación en campo y en función de ello, tanto los opinantes técnicos como la ANA como la DREMH emiten observaciones al contenido del instrumento y en función de ello se brinda la aprobación o desaprobación del mismo (Cano, 2021 ; Wiener, 2019; Wilson et al., 2024).

Dados los impactos ambientales de la MAPE en la región Madre de Dios, la promoción y desarrollo del proceso de formalización minera es importante ya que con ello se garantiza la reducción de la minería ilegal e informal y la implementación de medidas de manejo adecuadas para el desarrollo de las diferentes etapas dentro de proceso de extracción minera.

### **2.1.6 Morfología fluvial**

La morfología fluvial o morfología de ríos es una rama de la geomorfología fluvial que estudia las formas fluviales y los mecanismos mediante los cuales se han formado a través del espacio y el tiempo (Charlton, 2010). El estudio de las formas fluviales se refiere, generalmente, a su descripción de acuerdo a cómo los ríos se observan desde el aire. Las formas de los ríos pueden originarse tanto por procesos naturales, inherentes al comportamiento natural del río como por intervenciones externas, generalmente humanas (Rocha - Felices, 2013). La morfología fluvial es esencial para caracterizar a los ríos, evaluar su estado ecológico o de conservación, y, en caso necesario, diseñar estrategias de restauración (Hernández, 2018).

### **2.1.7 Análisis multitemporal**

Un análisis multitemporal es la técnica que permite comparar las características morfológicas de una determinada área de interés en diferentes tiempos. Esto permite obtener conclusiones diferenciadas sobre las transformaciones espaciales ocurridas en esa área a lo largo del tiempo (Olivares, 2017). Aplicado a la morfología fluvial, el análisis multitemporal facilita reconstruir la dinámica fluvial en diferentes tiempos y escalas espaciales y se realiza utilizando herramientas del sistema de información geográfica (SIG) para el procesamiento de datos a partir de imágenes satelitales del área de estudio (CITA UTEC, 2021).

## **2.2 Marco teórico**

### **2.2.1 Clasificación de los ríos**

Los ríos se clasifican según su libertad para ajustar su forma y gradiente como **confinados** y **aluviales**. Los primeros están naturalmente confinados, ya sea por formaciones geográficas, como cerros o debido a la intervención humana mediante

infraestructura artificial, lo que impide su desplazamiento lateral. Por otro lado, los ríos aluviales son ríos sinuosos y dinámicos en cuanto a su posición y forma; su lecho está formado por materiales que el mismo río transporta y que pueden ser nuevamente transportados por él (Rocha - Felices, 2013).

El río Malinowski, objeto de estudio de la presente investigación, se clasifica como un río aluvial. Por ello, en las siguientes secciones, se describirán este tipo de ríos y los parámetros utilizados para su caracterización morfológica.

#### ***2.2.1.1 Patrón morfológico de los cauces en planta de ríos aluviales***

Los ríos aluviales pueden presentar tres tipologías básicas en su morfología en planta: rectos, entrelazados o multicanales y meándricos (Leopold y Wolman, 1957, como se citó en Basile, 2018). A continuación, se describen las tres tipologías:

Los ríos rectos son poco comunes en la naturaleza, aunque pueden encontrarse bajo ciertas condiciones de pendiente y tipos de sedimentos del cauce, así como en tramos rectificadas artificialmente. Un ejemplo de ríos rectos se considera a los sistemas de encauzamiento recto que están constituidos por diques paralelos. Sin embargo, para caudales menores que el del diseño de dichos diques, el río desarrolla su propia sinuosidad (Rocha - Felices, 1998; Basile, 2018). Según Nalvarte (2014), dentro de esta clasificación se encuentran los ríos que presentan valores de sinuosidad menor de 1.5.

Los ríos entrelazados o multicanal son, generalmente, anchos y, en su recorrido, forman varios canales o brazos alrededor de pequeñas islas (Rocha - Felices, 1998). Este tipo de ríos puede originarse por dos factores: i) una carga de sedimento superior a la que el río puede transportar, lo que resulta en que una fracción se deposite para dar origen a la formación de islas, y ii) una alta pendiente que da origen a pequeños tirantes (Lane, 1957, como se citó en Rocha - Felices (1998).

Los ríos meándricos tienen un alto dinamismo que se origina por la interacción entre la dinámica no lineal de fluidos y la presencia de sedimentos que son arrastrados a lo largo del curso de agua. Este flujo de sedimentos aumenta, migra o deforma las curvas o meandros (Schwenk et al., 2017). Los ríos clasificados como meándricos tienen una configuración en forma de una serie de porciones alternadas de curvas consecutivas (Nalvarte, 2014) y una distribución planimétrica sinuosa (mayor de 1.5) (Basile, 2018). Estos ríos tienden naturalmente a no seguir un curso rectilíneo, lo cual es un indicador de la inestabilidad de su cauce (Rocha - Felices, 2013).

### **2.2.2 *Parámetros para la caracterización morfológica de los ríos***

Los parámetros para caracterizar la morfología de los ríos pueden dividirse en dos tipos: parámetros morfométricos y parámetros morfodinámicos. El primer grupo describe la forma o geometría del río en un año específico, mientras que el segundo grupo describe la dinámica y el comportamiento del río entre dos años de estudio. La guía «Caracterización Planimétrica y Multitemporal de Ríos Andino-Amazónicos», desarrollada por el Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA UTEC, 2021), recomienda un conjunto de parámetros morfológicos para caracterizar los ríos meándricos y multicanales amazónicos, y recomienda analizarlos a nivel de meandros o semimeandros. A continuación, se describen los parámetros morfométricos y morfodinámicos recomendados por la guía de CITA UTEC (2021) y considerados en esta investigación.

#### **2.2.2.1 *Parámetros morfométricos***

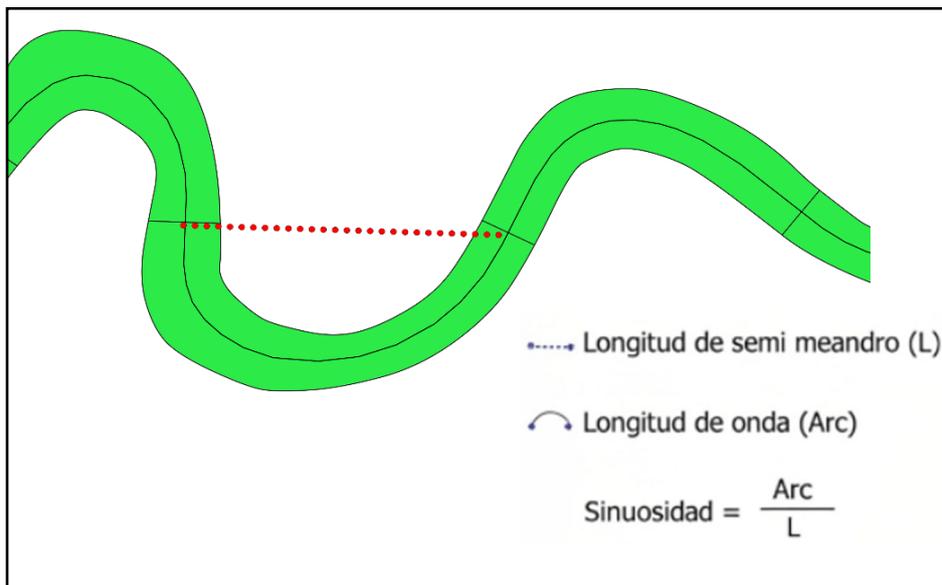
Esta investigación consideró cuatro parámetros morfométricos como indicadores de los cambios morfológicos: sinuosidad, ancho promedio, longitud de semimeandro y longitud de onda. A continuación, se describe cada uno de ellos.

## **Sinuosidad**

La sinuosidad de un río es el grado de curvatura del plano que tiene un determinado curso del mismo (Olivares, 2017). Este parámetro es adimensional y relaciona la longitud de la curva (semimeandro) con la longitud de onda (Figura 2) (CITA UTEC, 2021).

**Figura 2**

*Representación gráfica de la sinuosidad de un semimeandro*



*Nota:* Fuente: Elaboración propia

## **Ancho promedio**

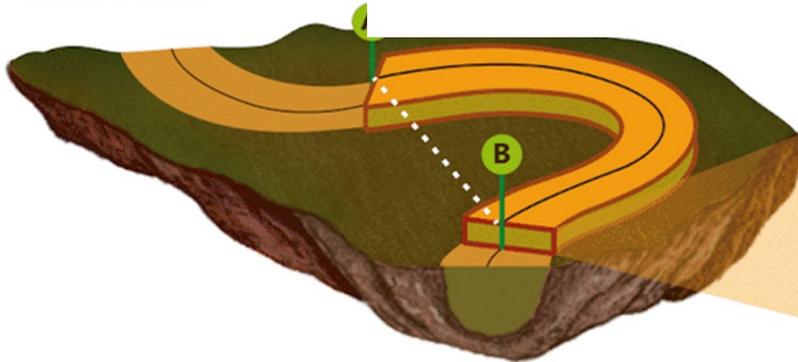
El ancho promedio del canal principal de un río se define como la relación entre la sección o el área de cada semimeandro y su longitud (véase Figura 3). La importancia de analizar este parámetro radica en su continua variación a lo largo de un curso del río (CITA UTEC, 2021).

### Figura 3

Representación gráfica del ancho promedio de un tramo de un río

#### **H** Ancho Promedio

$$\frac{\text{Área total}}{\widehat{AB}}$$



Nota: Fuente: CITA UTEC (2021)

#### **Longitud de semimeandro**

Este parámetro, también definido como la longitud de una curva del río, indica la longitud del recorrido de la línea central en una curva (véase Figura 2). La longitud se delimita de inicio a fin por medio de los dos puntos de inflexión consecutivos de un semimeandro (CITA UTEC, 2021).

#### **Longitud de onda**

La longitud de onda mide la distancia mínima entre los puntos de inflexión que definen una curva, es decir, representa una recta que une ambos puntos (véase Figura 2). En ríos meándricos, este parámetro suele ser utilizado como la medida estándar para escalar el tamaño de los meandros (CITA UTEC, 2021).

### **2.2.2.2 Parámetros morfodinámicos**

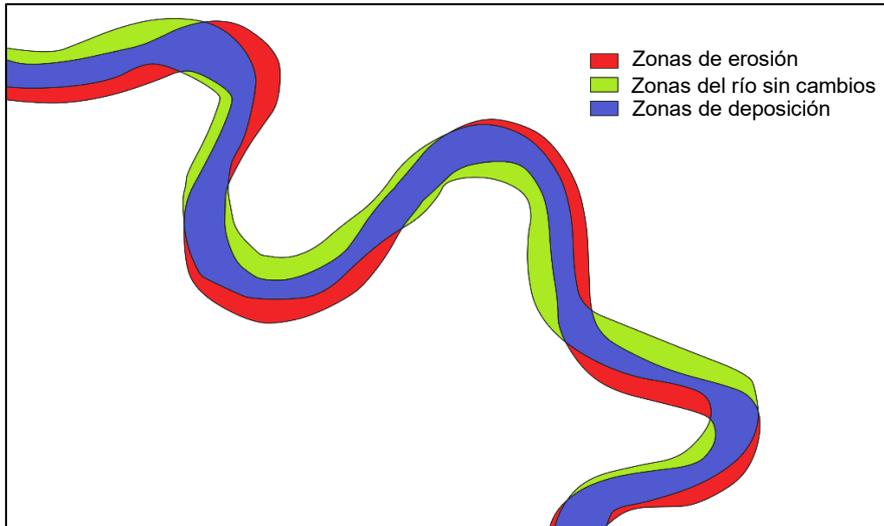
Los parámetros morfodinámicos considerados en esta investigación son tres: erosión, deposición y migración. A continuación, se describen dichos parámetros.

#### ***Erosión y deposición***

La erosión y deposición son parámetros dinámicos que se obtienen de la superposición de los polígonos del río en dos años o períodos consecutivos (véase Figura 4). De esta manera, se identifican las áreas del cauce donde se ha ocurrido erosión, las áreas cubiertas con agua de manera permanente y las áreas donde se ha producido la deposición de sedimentos (Frias et al., 2015). Estos parámetros generalmente se expresan como áreas de erosión y deposición (ha) o como la tasa de erosión y deposición (ha/año). La erosión y deposición se pueden utilizar para comparar espacial y temporalmente dos o más tramos del mismo río o de diferentes ríos. Estos parámetros son de gran importancia porque está estrechamente relacionado con el transporte de sedimentos y la forma de los canales del río (CITA UTEC, 2021) y además, porque, mediante los procesos de erosión y deposición, el canal puede ajustarse por sí mismo a las imposiciones o condiciones del caudal líquido y sólido (Basile, 2018).

## Figura 4

*Representación gráfica de la erosión y deposición en un tramo de río*



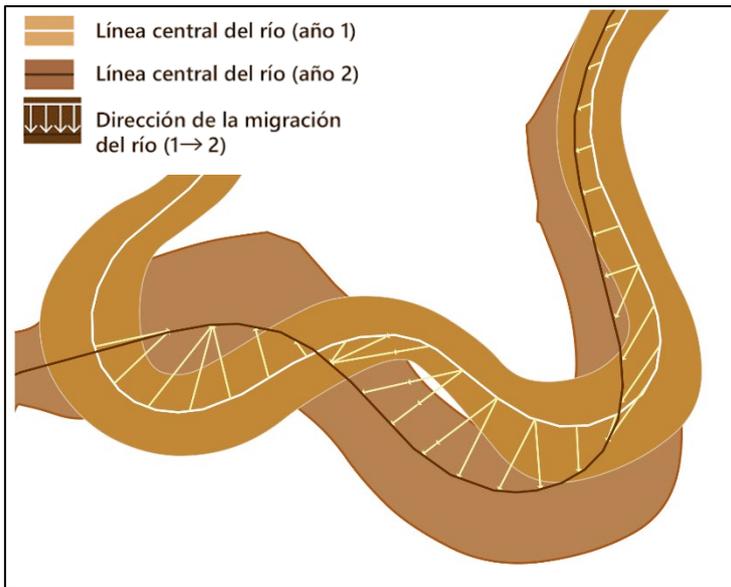
*Nota:* Elaboración propia

### ***Migración***

Los ríos meándricos experimentan un proceso de inestabilidad dinámica en el que el meandro se mueve dentro de su área de inundación disponible, conocido como migración. La migración implica un cambio lateral del cauce principal, el cual se expresa en términos de la distancia recorrida desde la línea central del canal (Nanson & Hickin, 1983). Este parámetro se expresa en unidades de longitud (generalmente metros) o en tasas de migración (m/año), aunque es recomendable usar la segunda opción, ya que facilita comparaciones entre tramos del mismo río o con otros ríos. La siguiente figura muestra gráficamente el análisis de la migración de una sección de río en dos años consecutivos.

## Figura 5

### Representación gráfica de la migración en un tramo de río



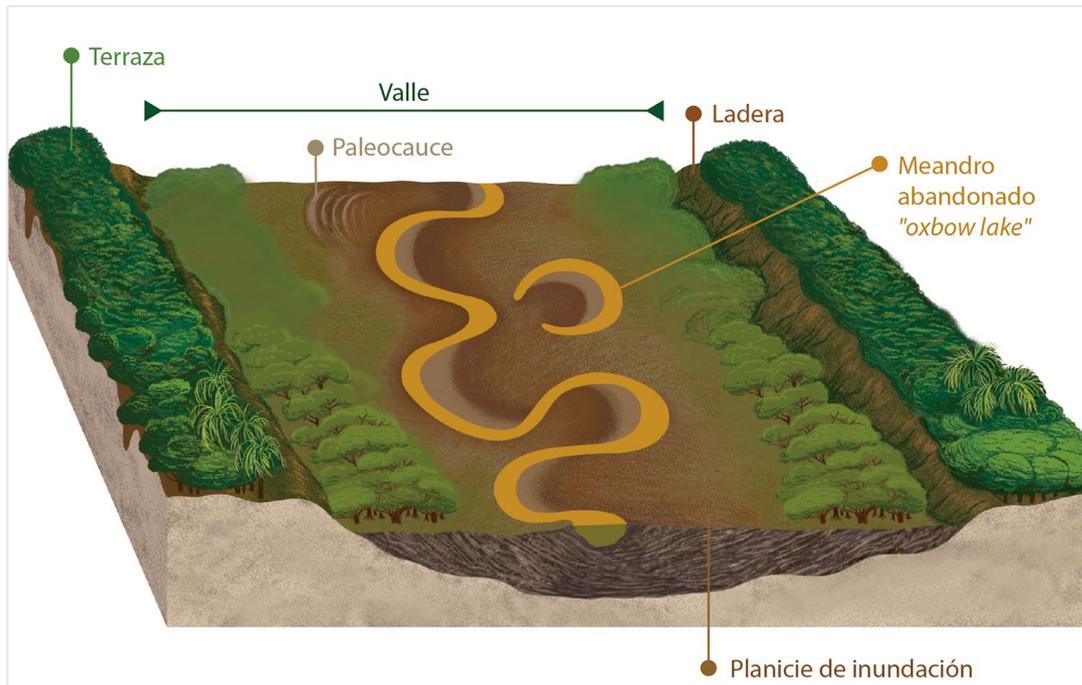
*Nota:* Elaboración propia

### 2.2.3 Valle geológico

El valle geológico se define como la zona donde el río se ha desarrollado a lo largo del tiempo y señala el límite físico de su capacidad de desplazamiento (CITA UTEC, 2021). De esta forma, el valle emerge como un control geológico que restringe la capacidad del río para desplazarse hacia otras zonas. Dentro del valle también se encuentran antiguos cursos del mismo río llamados «paleocauces», así como ciertos «meandros abandonados» de formación reciente, conocidos como cortes de meandro debido a la peculiar forma que adoptan (véase Figura 6).

## Figura 6

Representación gráfica del valle geológico de un río



Nota: Fuente: CITA UTEC (2021)

## **Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación**

### **3.1 Tipo de investigación**

De acuerdo a las líneas de investigación de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, esta investigación se encuentra dentro de la línea de investigación «*protección, conservación y remediación ambiental*». Esta investigación es de carácter cuantitativo, observacional y analítico según su enfoque, tipo de intervención del investigador y alcance, respectivamente. Además, se caracteriza por ser longitudinal y retrospectiva, de acuerdo al número de mediciones de las variables de estudio y el momento de la recolección de datos, respectivamente.

### **3.2 Técnicas y procedimiento de recolección de información**

#### **3.2.1 *Deforestación como indicador de impacto de la MAPE***

Las actividades de la MAPE en áreas boscosas como Madre de Dios suelen estar relacionadas con la deforestación. Por ello, analizar los patrones y las tendencias históricas de esta deforestación puede ser una herramienta fundamental para cuantificar los impactos de la MAPE y desarrollar soluciones a dicha problemática (Caballero Espejo et al., 2018b). En este contexto, esta investigación utilizó como punto de partida para investigar los impactos de la minería en el río Malinowski, a las áreas de deforestación por identificadas previamente por Caballero Espejo et al. (2018a).

Los datos de deforestación en archivo shapefile del estudio de Caballero Espejo et al. (2018a) fueron proporcionados por el Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA). Estos datos permitieron clasificar la deforestación según el tipo de minería (altamente mecanizada y mínimamente mecanizada) para el periodo de estudio (1984-2020). Las áreas de deforestación por la MAPE se delimitaron de acuerdo a la extensión del área de estudio. Posterior a su delimitación, la información correspondiente a las áreas

de deforestación (en hectáreas) se trasladó a las 38 zonas del valle geológico definidas como unidades espaciales para la comparación entre los años de estudio (sección 3.3.1.2).

### **3.2.2 *Obtención de parámetros morfológicos***

Los parámetros morfológicos del río Malinowski, esto es, los parámetros morfométricos (sinuosidad, ancho promedio, longitud de onda y longitud de semimeandro) y los parámetros morfodinámicos (erosión, deposición y migración) se obtuvieron a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales con herramientas de SIG y otros programas informáticos o software siguiendo la metodología de Estrada et al. (2023), una adaptación de la metodología publicada en el documento guía «Caracterización Planimétrica y Multitemporal de Ríos Andino-Amazonicos» (CITA-UTEC, 2021).

### **3.2.3 *Programas utilizados***

El procesamiento de datos se realizó con diversos programas informáticos que permitieron obtener las variables de estudio y realizar el análisis estadístico. A continuación, en la Tabla 2, se presenta cada software y su función.

**Tabla 2**

*Programas utilizados para el desarrollo de la investigación*

Software	Función
QGIS 3.22.16 	Sistema de información geográfica (SIG) de código abierto que permite la creación, edición y visualización de la información geoespacial de los archivos vectoriales generados durante el procesamiento de los datos. ( <a href="https://qgis.org/es/site/forusers/download.html">https://qgis.org/es/site/forusers/download.html</a> ).
ArcGIS 10.8 	Sistema de información geográfica (SIG) que permite la extracción de la línea central de polígonos vectoriales.
Meander Statistics Toolbox (MstaT) y MatLAB 	Software basado en Matlab para el análisis de los parámetros derivados de la línea central y obtención de puntos de inflexión de los semimeandro utilizando el software Meander Statistics Toolbox (MstaT, <a href="https://mstatmeander.wordpress.com/">https://mstatmeander.wordpress.com/</a> ), el cual es ejecutado en la interfaz del software MatLAB.
R y Rstudio 	Entorno y lenguaje de programación con un enfoque al análisis estadístico, utilizado para la evaluación de la migración de los ríos, bajo un código de libre distribución.
Google Earth Engine 	Plataforma en línea que posee una extensa base de datos satelitales y análisis geoespaciales. Utilizado para la descarga y preprocesamiento intermedio del mosaico de imágenes satelitales para cada año de estudio.
SPSS 25 	Programa estadístico utilizado para el análisis de variables e indicadores.
Microsoft 2016 	Programa de hojas de cálculo de Microsoft Office utilizado para ordenar, analizar y graficar los datos obtenidos en la investigación.

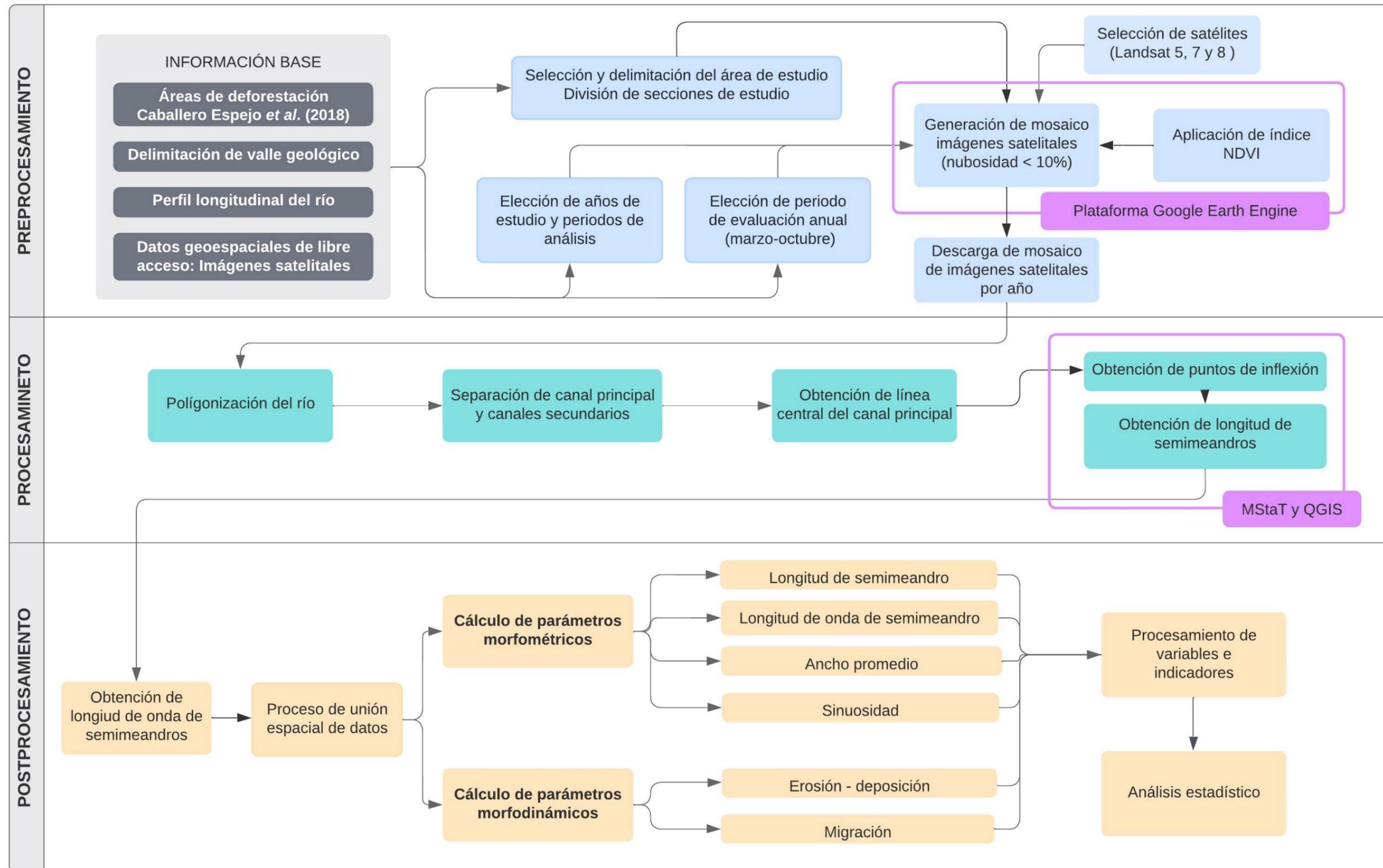
*Nota:* Adaptado de (CITA UTEC, 2021)

### 3.3 Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos se realizó en tres fases: preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento. Los detalles de cada fase se describen en el flujograma de la Figura 7.

Figura 7

Flujograma del tratamiento de los datos



Nota: Fuente: Adaptado de Estrada et al. (2023).

### **3.3.1 Fase 1: Preprocesamiento de datos**

Esta fase consistió en la obtención de un mosaico de imágenes satelitales del área de estudio, a la cual se le aplicó el índice NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada, por sus siglas en inglés) (véase Figura 7). Para llegar a dicho resultado, en esta primera fase se seleccionó, delimitó y dividió el área de estudio. Posterior a ello, se estableció el periodo de estudio anual y los años de estudio, con los cuales se obtuvo el mosaico de imágenes señalado a partir del cual se trabajó en la fase 2.

#### **3.3.1.1 Selección del área de estudio**

Este estudio se enfocó en la zona circundante al río Malinowski, ubicado en la región de Madre de Dios y parcialmente dentro de las zonas de amortiguamiento de dos importantes Áreas Naturales Protegidas por el Estado peruano: el Parque Nacional Bahuaja-Sonene y la Reserva Nacional de Tambopata (véase mapa de ubicación del área de estudio en la Figura 8).

En la cuenca del río Malinowski, se han reportado dos tipos de minería aurífera artesanal y de pequeña escala. En la parte alta de la cuenca mencionada, se encuentra la minería altamente mecanizada, mientras que en la parte baja se realiza minería mínimamente mecanizada. Por ello, además de evaluar si la MAPE tiene una influencia significativa en los cambios morfológicos del río Malinowski, esta zona permitió identificar si el tipo de minería influye de manera diferenciada en estos cambios.

#### **3.3.1.2 Delimitación del área de estudio**

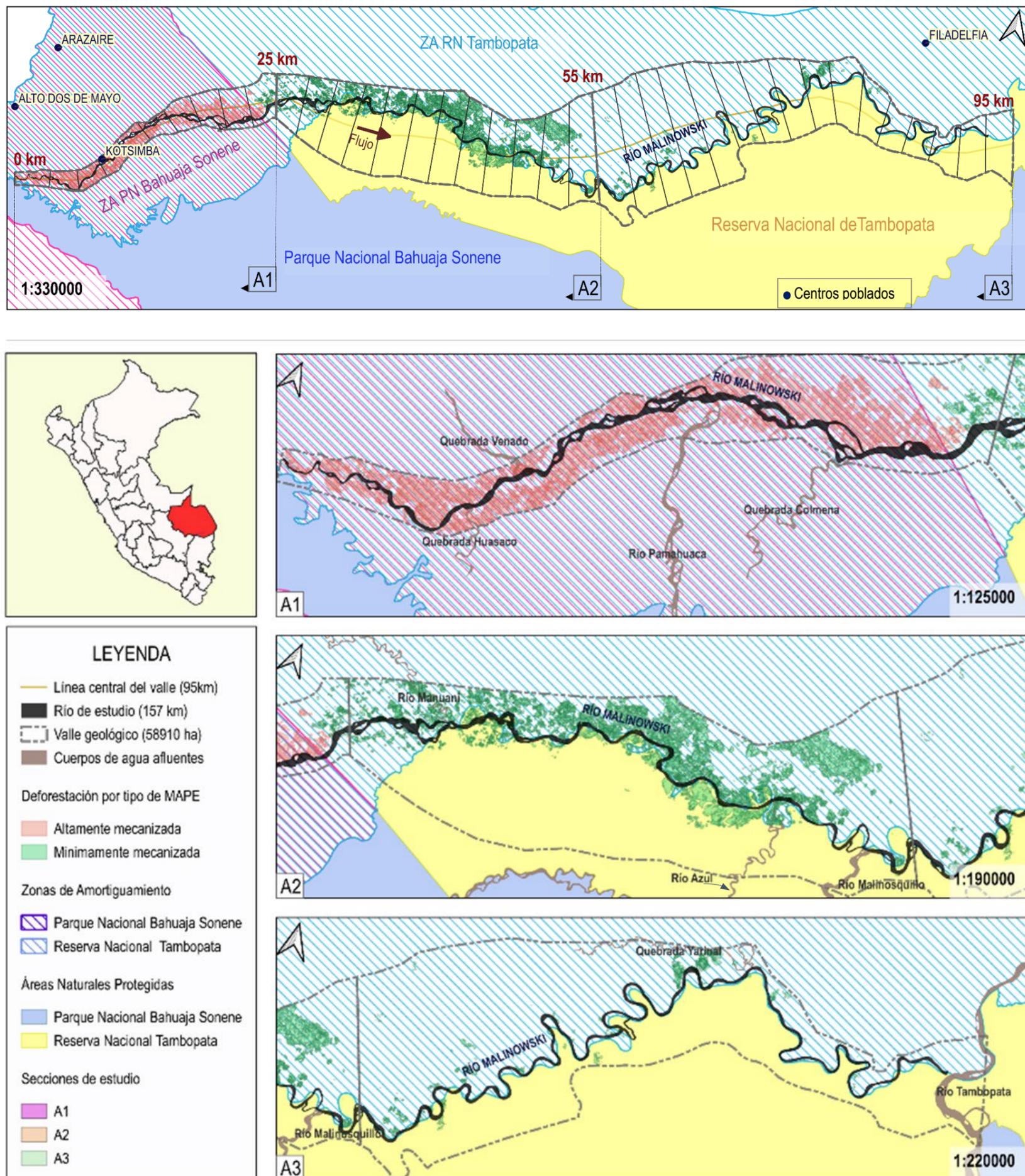
El área de estudio comprendió una sección de aproximadamente 157 km del río Malinowski (desde la cabecera del río hasta la confluencia con el río Tambopata) y abarcó un valle geológico de 58 910 ha (aproximadamente 95 km de línea central del mismo). La mencionada delimitación se realizó sobre la base de un análisis preliminar de información

de áreas de deforestación por MAPE (Caballero Espejo et al., 2018b), el análisis de imágenes satelitales del río Malinowski y la delimitación de su valle geológico.

Durante la delimitación del área de estudio, se consideró el valle geológico como unidad espacial comparable, debido a que este se mantiene constante a lo largo de todo el periodo de estudio y constituye el límite físico de la capacidad de desplazamiento del río. El valle geológico se dividió en 38 tramos de 2.5 km cada uno, con la finalidad de utilizar dichos espacios como unidades espaciales comparables una vez obtenidas las variables de estudio en el río.

**Figura 8**

Mapa del área de estudio con las subsecciones de análisis A1, A2 y A3



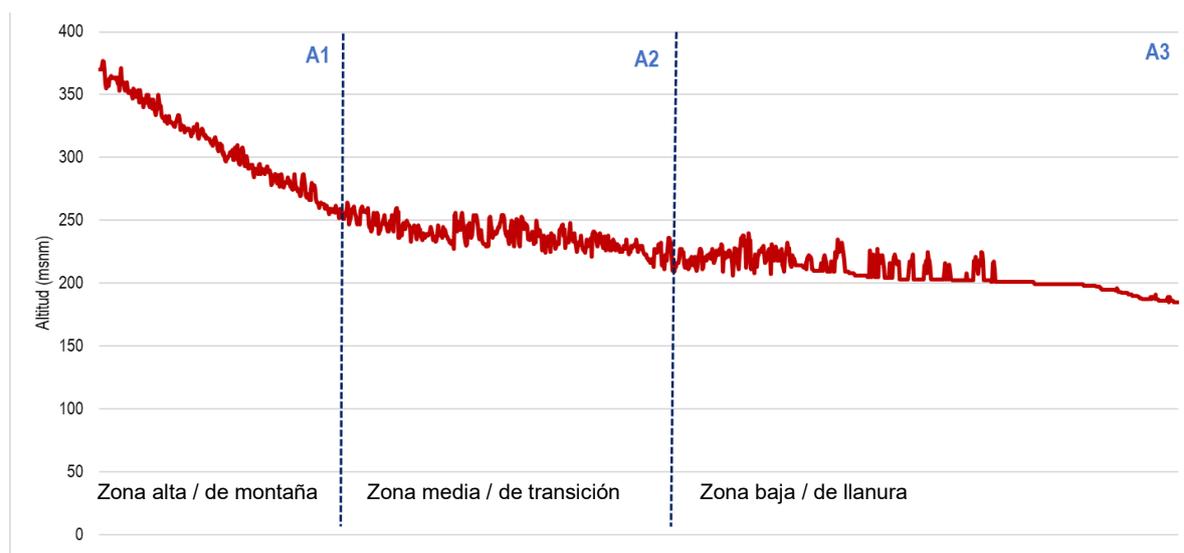
Nota: Fuente: SERNANP, IGP, ANA, Caballero et al. (2018). Elaboración propia. La figura superior muestra la delimitación del área de estudio dividida en 38 tramos del valle (de 2.5 km aproximadamente) en los que se calcularon las variables de estudio definidas. Se indica el polígono del río (línea negra), la línea central del valle geológico (línea amarilla) y el detalle de cada sección de estudio (figuras A1, A2 y A3).

### 3.3.1.1 División espacial del área de estudio

El área de estudio se dividió en tres secciones (A1, A2 y A3) en función del tipo y grado de impacto de la minería (ver Tabla 3) y el perfil longitudinal del río Malinowski (Figura 9). La división se realizó según la información cartográfica de las áreas de deforestación por MAPE dentro del valle geológico del río Malinowski reportadas por Caballero Espejo et al. (2018b) y los datos de altitud extraídas del mapa topográfico ASTER GDEM (Aster Global Digital Elevation Model), creado por la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI).

**Figura 9**

*Perfil longitudinal del río Malinowski*



*Nota:* Fuente: Mapa topográfico ASTER GDEM (Aster Global Digital Elevation Model). Se indican las tres secciones de estudio (A1, A2 y A3). Elaboración propia

#### **Sección A1**

La Sección A1 abarcó los primeros 25 km del valle geológico del río Malinowski y abarcó un área de casi 6 144 ha, la cual corresponde a un perfil longitudinal de zona alta o de montaña con una pendiente de 0.43% (Figura 9)., lo que contribuye a un mayor proceso de erosión y sedimentación. Esta zona se caracterizó por presentar minería altamente

mecanizada y una deforestación por MAPE acumulada que representa aproximadamente el 50% del área de la sección de estudio deforestada. Esta sección se encuentra íntegramente dentro de las zonas de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata y del Parque Nacional Bahuaja Sonene.

### **Sección A2**

La Sección A2 comprendió desde el kilómetro 25 hasta el kilómetro 55 del valle geológico del río Malinowski y abarcó un área aproximada de 22 800 ha. Esta sección se ubicó en la zona media o de transición del río Malinowski con una pendiente de 0.14% (Figura 9), donde es característico un proceso de erosión y transporte de sedimento moderado, presentó minería mínimamente mecanizada y una deforestación acumulada debido a la MAPE que representó aproximadamente el 23% del área total de la sección de estudio deforestada. La Sección A2 se encuentra parcialmente dentro de la Reserva Nacional de Tambopata y su zona de amortiguamiento.

### **Sección A3**

Esta última sección comprendió el río desde el kilómetro 55 del valle geológico del río Malinowski hasta la confluencia con el río Tambopata, abarcando un área de aproximadamente 30 000 ha en la zona baja o de llanura del río con una pendiente de 0.04% (Figura 9), donde se puede presentar mayor acumulación de sedimentos. Se caracterizó por presentar minería mínimamente mecanizada y una deforestación acumulada debido a la MAPE que representó aproximadamente el 2% del área total de la sección deforestada. A diferencia de las dos primeras secciones, la Sección A3 presentó un bajo impacto directo de la MAPE (deforestación y extracción del oro). Esta sección se ubica parcialmente dentro de la Reserva Nacional de Tambopata y su zona de amortiguamiento.

### **3.3.1.2 Selección de periodo y años de estudio**

El periodo de estudio abarcó un periodo de 36 años (14 años de estudio), desde 1984 hasta 2020, el cual se determinó en función a la disponibilidad de imágenes satelitales e información previa del área de estudio. El periodo de estudio se dividió en tres subperiodos, considerando el área total deforestada reportada en cada año como un indicador directo del impacto de la MAPE (Tabla 3, sección 3.3.3.1). Los subperiodos se definieron como: impacto bajo (1984-2000; <30 ha deforestadas), impacto medio (2001-2009; 30-160 ha deforestadas) e impacto alto (2010-2020; >160 ha deforestadas). Los cambios morfológicos en el río se evaluaron en intervalos de cuatro años, siguiendo la metodología recomendada por CITA UTEC (2021) para ríos meándricos.

#### ***Subperiodo de impacto bajo (1984-2000)***

En este subperiodo, las áreas deforestadas por la MAPE no superaron las 30 ha anuales. Los años seleccionados para el estudio fueron 1984, 1987, 1992, 1996 y 2000. Se optó por el año 1987 en lugar de 1988 debido a la falta de imágenes satelitales de calidad adecuada para el análisis de este último año (alto porcentaje de nubosidad).

#### ***Subperiodo de impacto medio (2001-2009)***

Este subperiodo se consideró de impacto medio, ya que durante estos años la MAPE aún no se desarrollaba con tanta intensidad en el área de estudio, resultando en un área deforestada inferior a las 160 ha anuales. Se seleccionaron los años 2004 y 2008 para el análisis de este subperiodo.

#### ***Subperiodo de impacto alto (2010-2020):***

Este subperiodo se clasificó como de alto impacto debido a la intensificación de la MAPE en el área de estudio, con picos de deforestación de aproximadamente 1328 ha anuales. Esta intensificación se inició el año 2010, manteniendo una tendencia creciente

hasta el año 2018. En los años 2019 y 2020, se observó una reducción en las áreas de deforestación debido a la implementación de la operación «Mercurio 2019», una medida implementada por el Estado Peruano para reducir la presencia de la MAPE en las zonas mineras La Pampa y Alto Malinowski (Ministerio del Interior, 2019). Para el análisis de este periodo, se seleccionaron los años 2012, 2016 y 2020. Además, se incluyeron los años 2014, 2015, 2017 y 2018, con el objetivo de realizar un análisis temporal más detallado (Tabla 3 y Figura 10).

**Tabla 3**

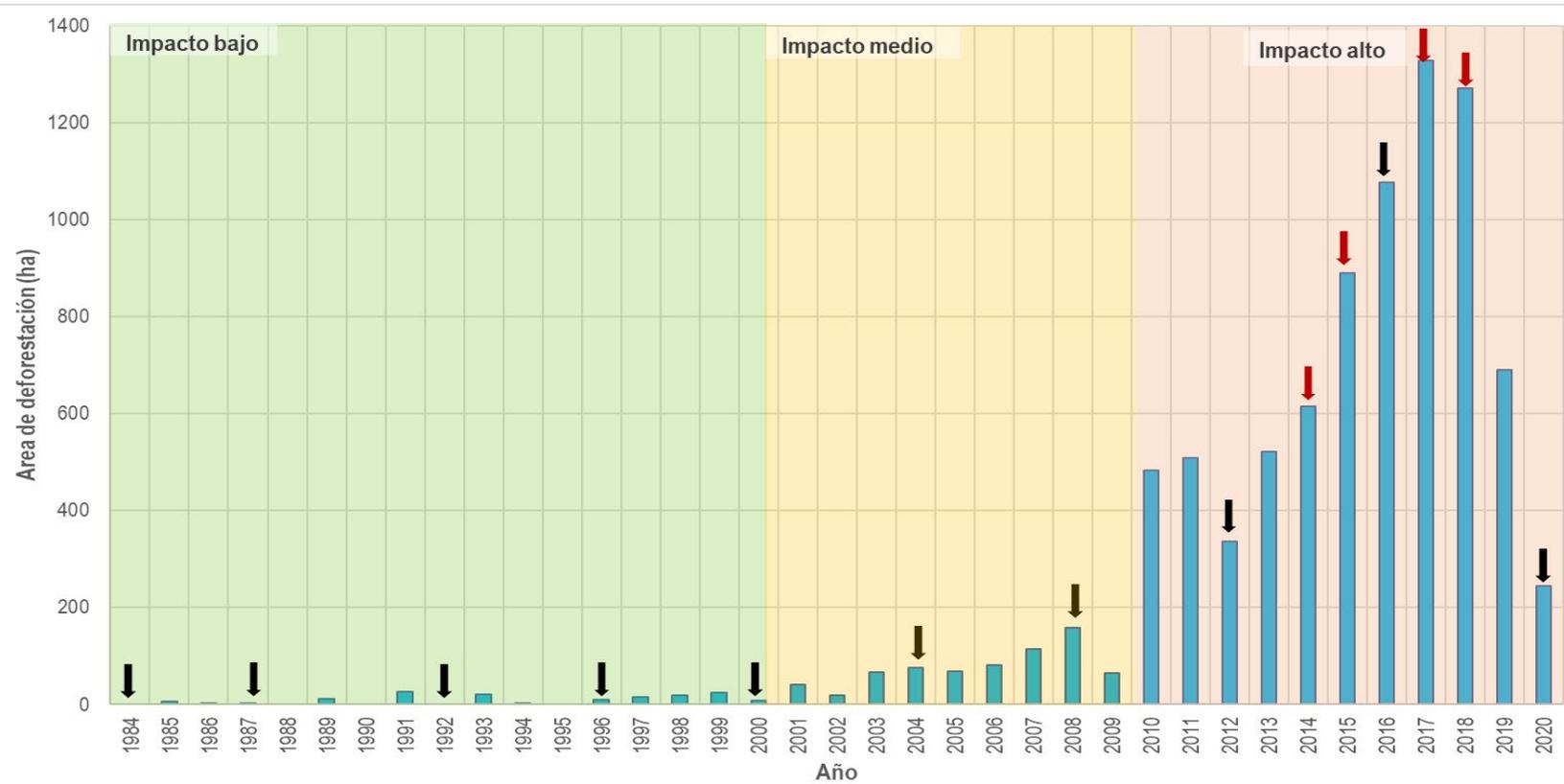
*Características de los subperiodos de estudio*

<b>Subperiodo de estudio</b>	<b>Niveles de impacto por MAPE</b>	<b>Años de estudio</b>	<b>Máxima área anual deforestada por MAPE en el periodo (ha)</b>
1984-2000	Impacto bajo	1984, 1987, 1992, 1996, 2000	26.02
2001-2009	Impacto medio	2004, 2008	157.58
2010-2020	Impacto alto	2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2020	1328.46

*Nota:* Fuente: Elaboración propia.

**Figura 10**

*Áreas de deforestación por MAPE en el valle de inundación del río Malinowski*



*Nota:* Fuente: Elaboración propia basado en Caballero et al. (2018). Se muestran los tres subperiodos de estudio. Las flechas indican los años de estudio, siendo las flechas negras son los años de estudio en seleccionados y las flechas rojas los años de análisis adicionales seleccionados para garantizar un estudio detallado y robusto.

### **3.3.1.3 Elección del periodo de evaluación anual**

Los meses analizados en cada año de estudio corresponden al periodo marzo-octubre, los cuales constituyen meses de transición entre las épocas de creciente y vaciante de los ríos de la región Madre de Dios. Tal como Estrada et al.(2023) justifica esta elección, se decidió no incluir los datos de la temporada de crecidas (noviembre a febrero) en el análisis, ya que las imágenes satelitales disponibles durante este periodo mostraban un alto porcentaje de nubosidad, lo que compromete la calidad de las mismas para el estudio. Además, el propósito de esta investigación fue examinar el comportamiento promedio del cauce del río, por lo que incorporar las épocas de crecidas implicaría incluir áreas inundadas que no representan la situación predominante a lo largo del año.

### **3.3.1.4 Selección de satélites**

Este estudio se realizó con imágenes de los satélites Landsat 5, 7 y 8, seleccionados por ser de libre acceso y haber sido utilizados en estudios similares anteriores en el Perú (Estrada et al., 2023; CITA UTEC, 2021). La Tabla 4 presenta las especificaciones de los satélites, incluyendo su resolución espacial y temporal, así como el periodo en el que cada uno cuenta con imágenes satelitales disponibles. Los tres satélites son considerados de resolución media.

**Tabla 4**

*Satélites Landsat utilizados para la obtención de imágenes satelitales*

<b>Satélite</b>	<b>Periodo</b>	<b>Resolución espacial</b>	<b>Resolución temporal</b>
Landsat 5	1984- 2012	60 m	16 días
Landsat 7	1999- presente	30 m	16 días
Landsat 8	2013- presente	30 m	16 días

*Nota:* Elaboración propia

### **3.3.1.5 Generación, descarga y aplicación del índice NDVI en el mosaico de imágenes satelitales**

Una vez seleccionada el área y el periodo de estudio, se procedió a la generación y descarga de un mosaico de imágenes satelitales al cual se le aplicó el índice NDVI. Este índice es un indicador utilizado en teledetección que permite diferenciar entre cuerpos de agua, vegetación y cobertura terrestre, siendo considerado el método más adecuado para esta distinción en ríos con características similares a las del río de estudio (CITA UTEC, 2021; Manyatsi y Ntshangase, 2008; Frias et al., 2015; Estrada et al., 2023) (ver Figura 11).

La fórmula del índice NDVI utiliza las bandas de las imágenes satelitales, según se detalla a continuación en la Ecuación 1:

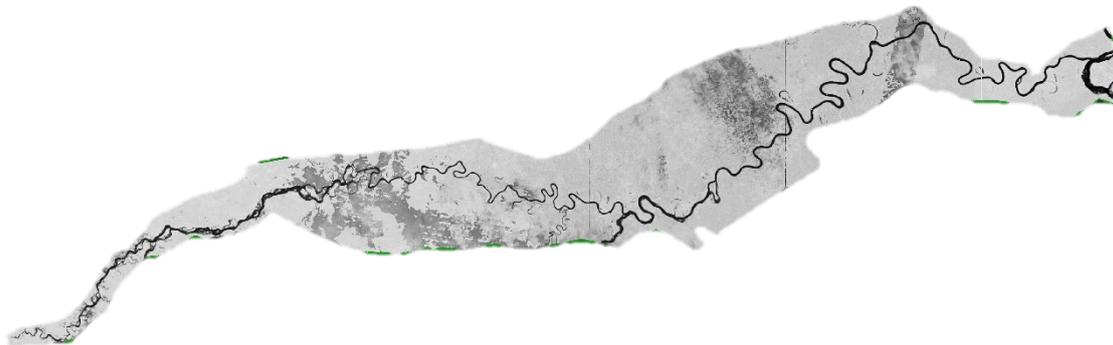
$$NDVI = \frac{IRC + R}{IRC - R} \quad (1)$$

Donde: IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano y R es la reflectividad en el rojo.

La descarga de los mosaicos de imágenes satelitales para cada año de estudio se realizó mediante un código desarrollado por CITA UTEC (2021) en la plataforma de Google Earth Engine (GEE). Este código permitió seleccionar el rango de fechas, el satélite, el porcentaje de nubosidad deseado (menor al 10%) y aplicar el índice de NDVI.

## Figura 11

*Mosaico de imágenes satelitales del año 1984 con aplicación del índice NDVI*



*Nota:* Fuente: Google Earth Engine (2023). Elaboración propia.

### **3.3.2 Fase 2: Procesamiento de datos**

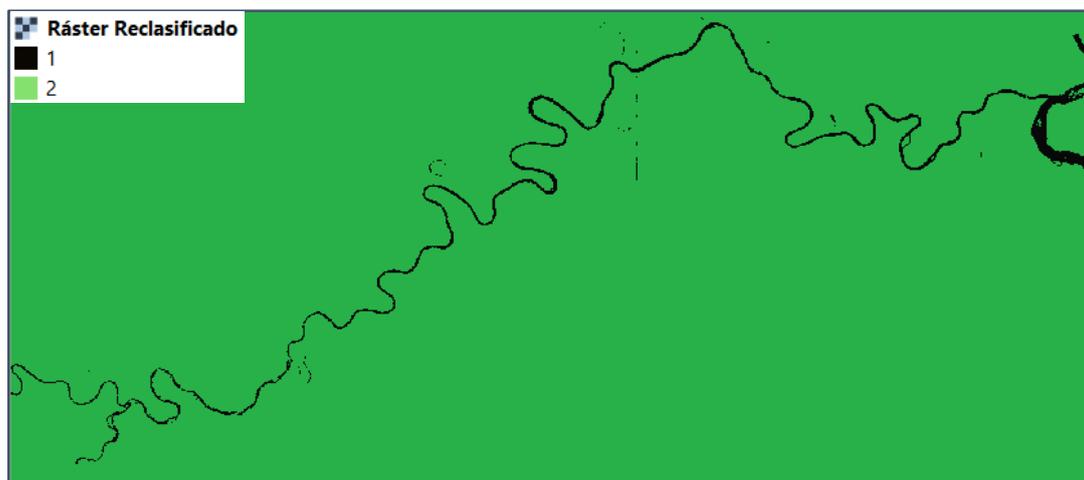
Esta segunda fase consistió en el procesamiento de los datos obtenidos en la Fase 1 (sección 3.3.1). Esta fase incluyó la poligonización del río, la separación y delimitación del canal principal y los canales secundarios, la obtención de la línea central y puntos de inflexión, así como la obtención de semimeandros (Figura 7). Todas las operaciones se realizaron utilizando SIG. Aunque para operaciones específicas se utilizó la interfaz de ArcGIS versión 10.8 (herramienta ArcMap, la mayoría de los procesos se ejecutaron en la interfaz del programa QGIS versión 3.22.16.

#### **3.3.2.1 Poligonización del río**

Este primer paso del procesamiento de datos tuvo como objetivo obtener el polígono del río completo para cada año de análisis. El mosaico de imágenes satelitales descargado para cada año se reclasificó a partir de un umbral ingresado manualmente (Figura 12), el cual permitió reclasificar la imagen en dos valores: uno para las zonas con presencia de agua (o con una reflectancia similar a la del agua), y otro para las zonas sin presencia de agua.

## Figura 12

### Reclasificación del mosaico de imágenes satelitales del río

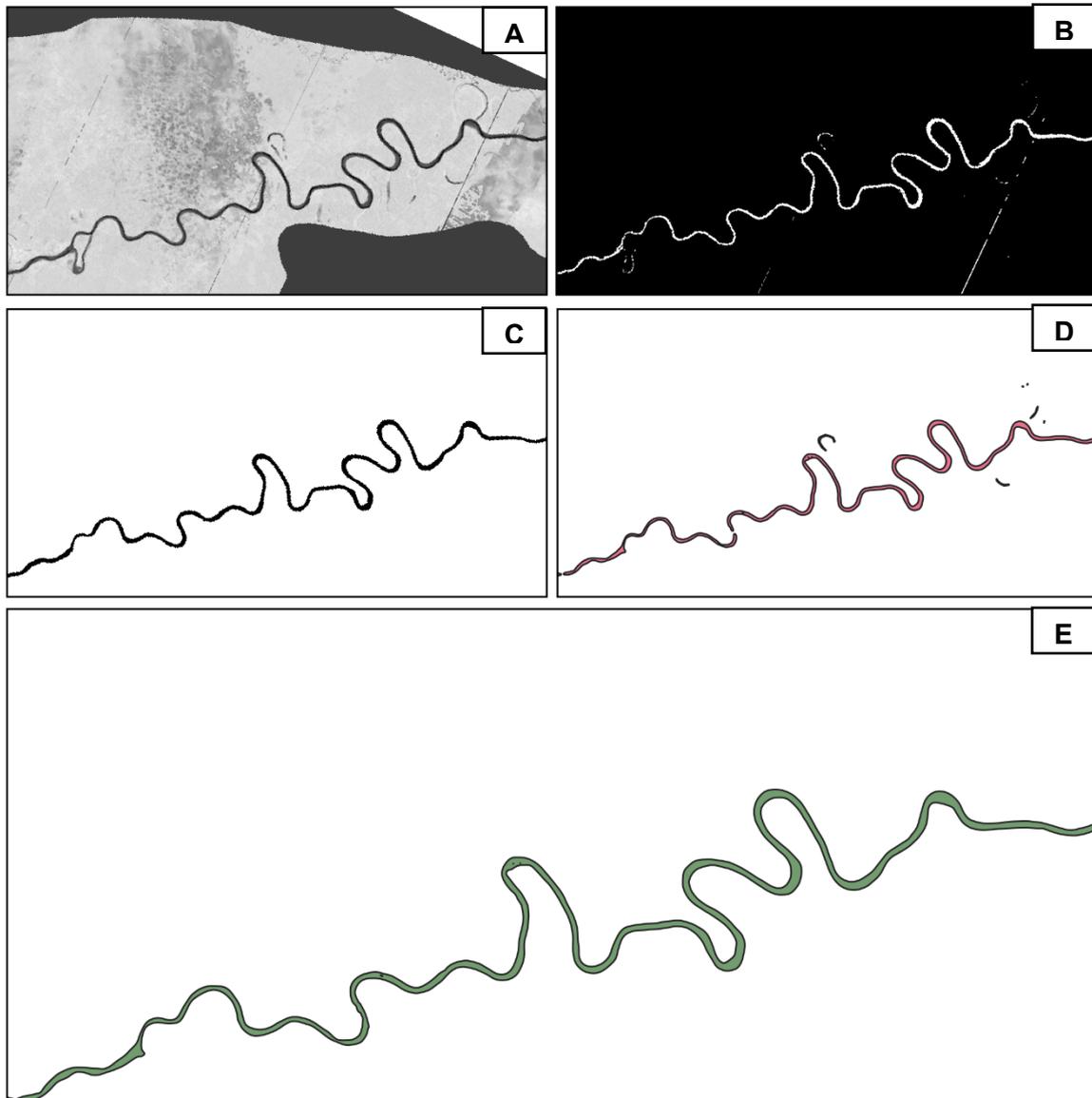


*Nota:* Fuente: Procesamiento de reclasificación del mosaico de imágenes satelitales del río en QGIS 3.22.16. Elaboración propia. Se muestra la imagen satelital reclasificada de un tramo del río Malinowski. El color negro (1) indica las zonas correspondientes al cuerpo de agua y las zonas verdes (2) indican áreas ajenas al río.

La poligonización del río se realizó transformando la imagen satelital reclasificada de un formato ráster a un formato vectorial o shapefile. Esto se realizó con la herramienta de filtrado del programa QGIS, que permitió eliminar los píxeles con los valores más bajos del ráster que correspondieron a zonas que no están relacionadas con el río. Una vez filtrado, el archivo ráster se convirtió a polígono con la herramienta «poligonizar». El polígono resultante se simplificó para eliminar formas angulosas previo a su edición manual. La edición manual del polígono del río se realizó para verificar que zonas ajenas al río no fuesen incluidas y que zonas corresponden al cuerpo de agua no fueran descartadas. Esta verificación se realizó contrastando el polígono con la imagen satelital original y la imagen con el realce del índice NDVI, lo que resultó en un polígono similar al mostrado en la Figura 13E.

**Figura 13**

*Imágenes referenciales del proceso de poligonización del río.*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia. Se muestra el mosaico de imágenes satelitales con el índice NDVI aplicado (A), el ráster reclasificado (B), el ráster filtrado (C), el polígono del río en archivo shapefile (D), y el río poligonizado luego de la edición manual (E).

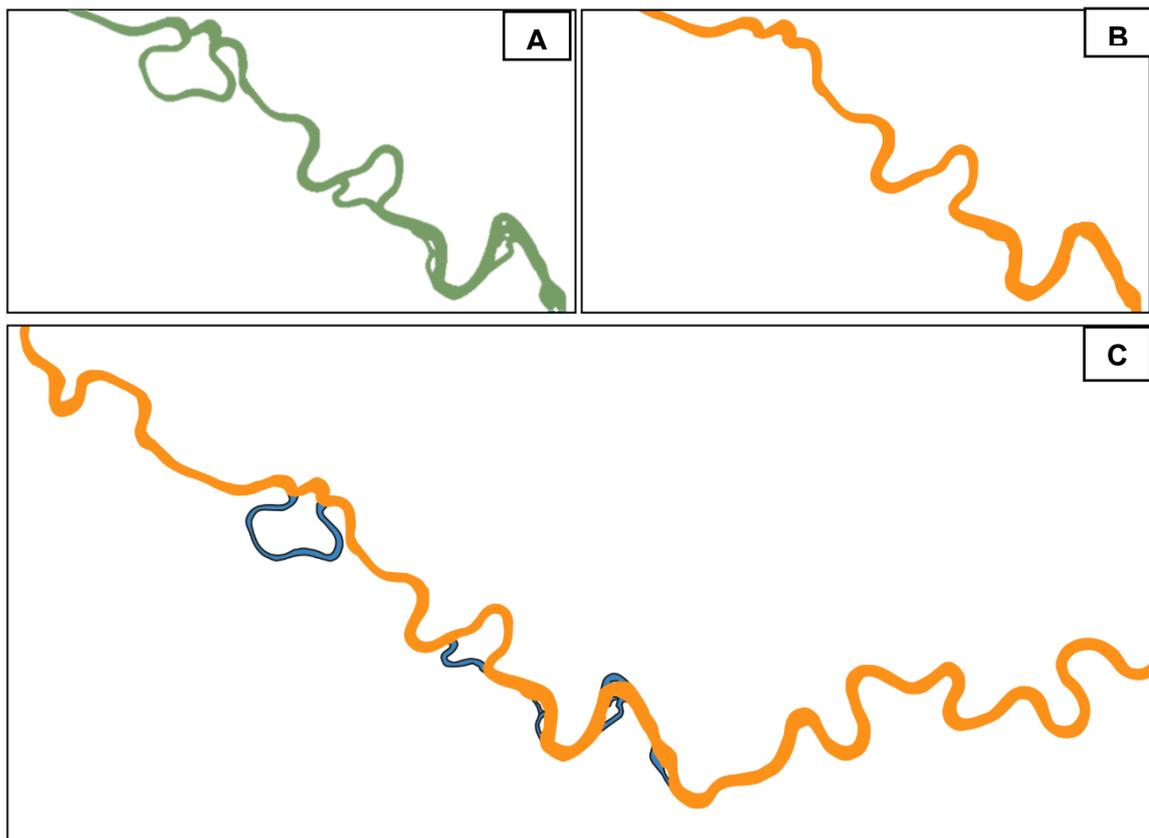
### **3.3.2.2 Separación del canal principal y secundarios del río**

Una vez suavizado y editado manualmente el polígono del río (sección 3.3.2.1), se procedió a identificar el polígono del canal principal y separarlo de los canales secundarios. Esto se realizó con las herramientas de «digitalización avanzada» del programa QGIS, lo

que resultó en dos polígonos: uno del canal principal y otro de los canales secundarios (Figura 14C).

#### Figura 14

*Separación del canal principal y los canales secundarios del río Malinowski*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia. (A) Vista del polígono completo del río Malinowski: canal principal y canales secundarios (color verde), (B) Vista exclusiva del polígono del canal principal (color naranja), y (C) Vista de los polígonos del río Malinowski separados: canal principal (color azul) y canales secundarios (color naranja).

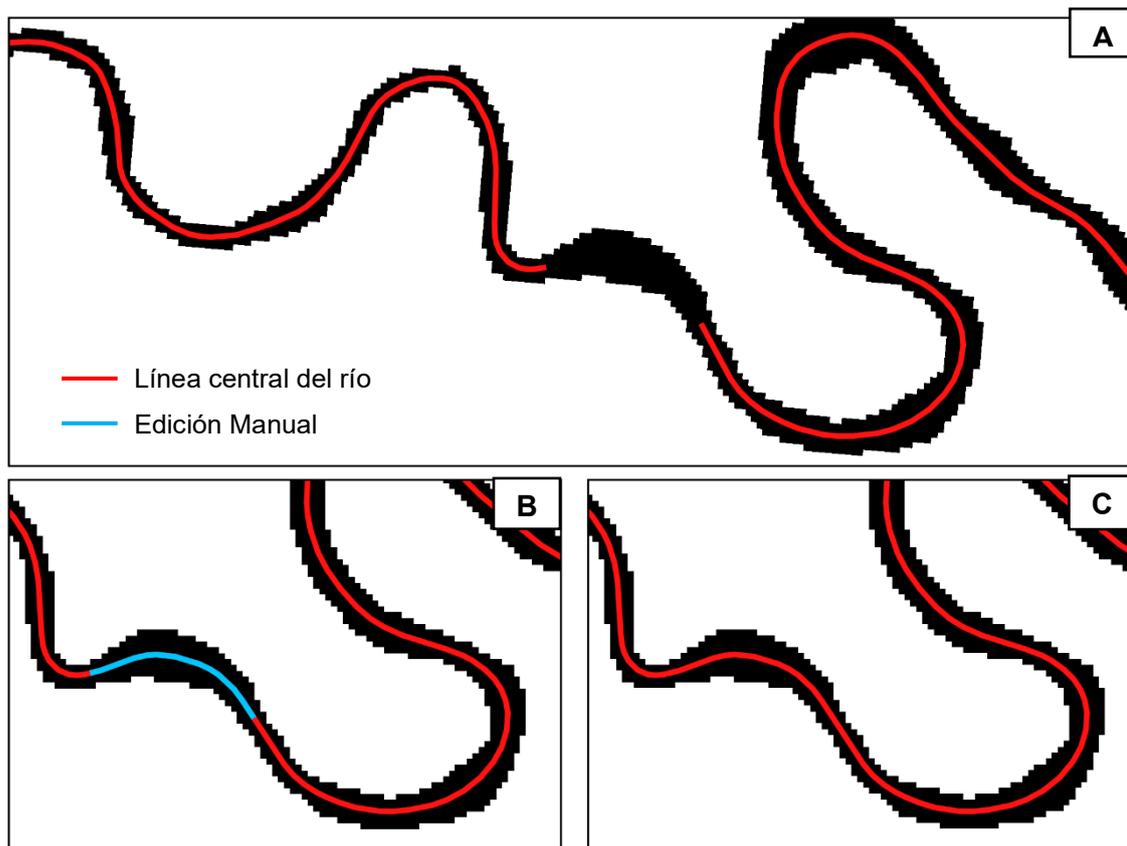
#### **3.3.2.3 Obtención de la línea central del canal principal**

La línea central del canal principal se obtuvo utilizando el polígono principal del río (sección 3.3.2.1) como archivo de entrada y las herramientas «rasterizar» de QGIS, «Create Feature Class» y «Arcscan» del programa ArcMap 10.8 para su procesamiento. La Figura 15 muestra el proceso de edición manual de la línea central obtenida, con el

objetivo de obtener un único archivo shapefile de línea que se encuentre completamente dentro del polígono del río (CITA UTEC, 2021).

**Figura 15**

*Imágenes referenciales de la obtención de la línea central del río*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16 y ArcMap 10.8. Elaboración propia. La Figura A muestra la línea central obtenida en Arcmap, La B representa la edición manual de la línea central en un tramo del río (línea celeste), la C muestra la versión final de la línea central editada.

#### **3.3.2.4 Obtención de puntos de inflexión**

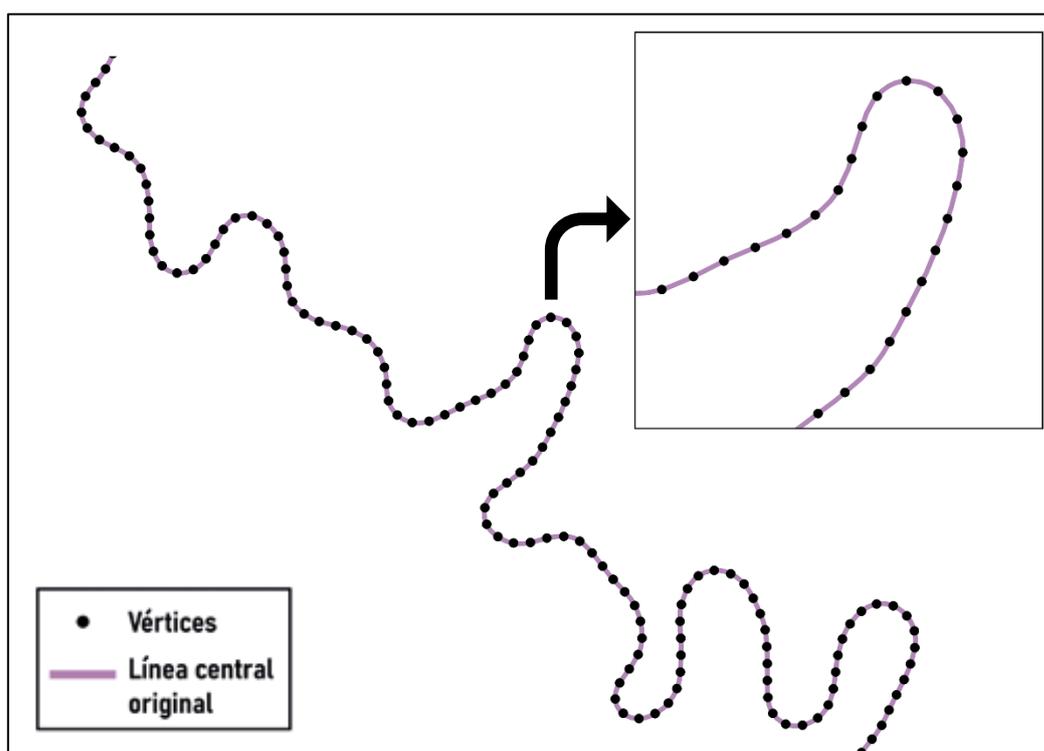
La obtención de los puntos de inflexión o puntos de cambio de curvatura de los semimeandros se realizó en tres pasos: (i) obtención de coordenadas de la línea central, (ii) obtención de puntos de inflexión en Meander Statistics Toolbox (MstaT) y (iii) edición manual de los puntos de inflexión.

### ***i. Obtención de coordenadas de la línea central***

Como primer paso se obtuvieron las coordenadas de la línea central del río, dividida en segmentos de longitud igual a la mitad del ancho promedio del río, aproximadamente. Para ello, se utilizaron las herramientas «v.split» y «extraer vértices específicos». El resultado referencial de este paso se muestra en la Figura 16.

**Figura 16**

*Vista de la interfaz QGIS con la extracción de vértices para cada segmento de la línea central del río*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia.

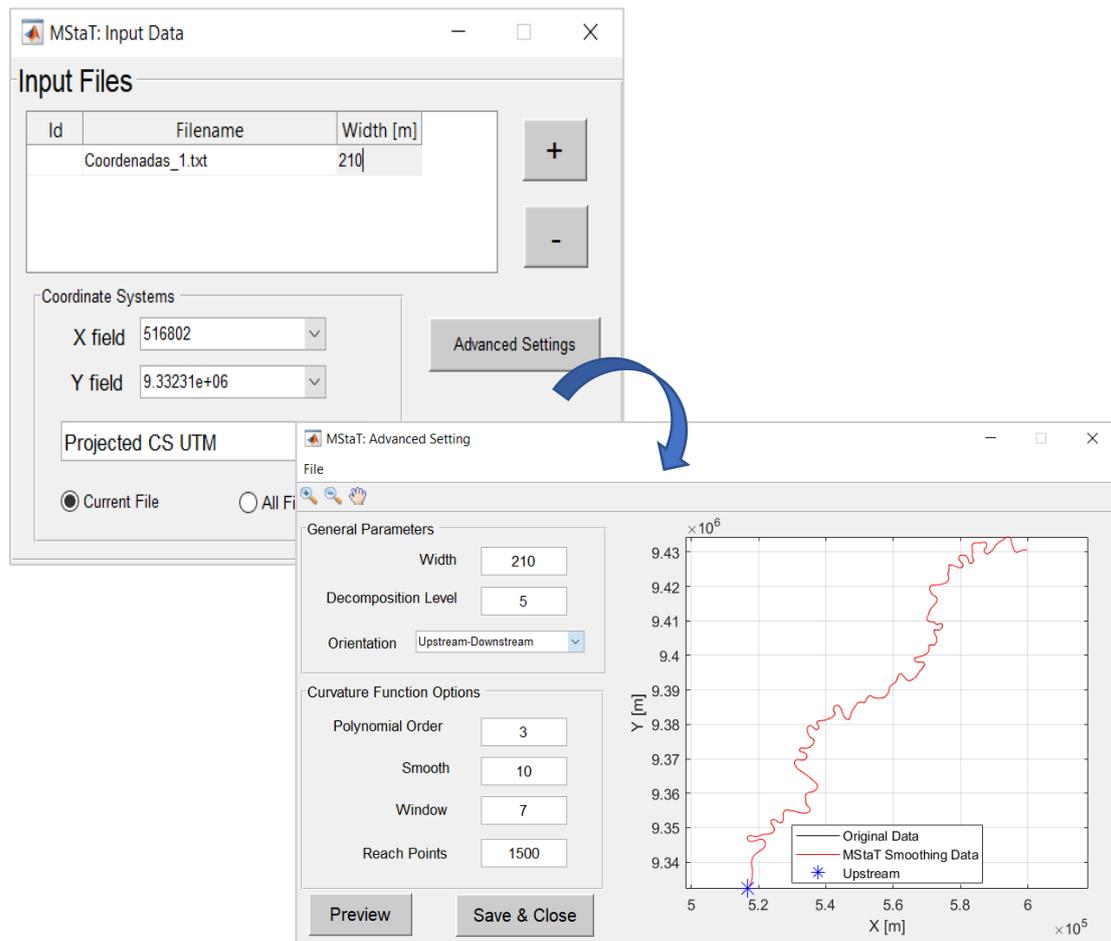
### ***ii. Obtención de puntos de inflexión***

En este paso, se ingresaron las coordenadas de la línea central del río, dividida en segmentos, al programa Meander Statistics Toolbox (MstaT), el cual se ejecuta en la interfaz del programa MatLAB. También se ingresaron datos del río, como el ancho promedio, el sistema de referencia de las coordenadas UTM y la orientación de la línea

central (de la cabecera hacia su confluencia con el río Tambopata), requeridos por el programa. Los datos de entrada y la interfaz del programa MstaT se muestran en la Figura 17.

**Figura 17**

*Vista de la interfaz de MStaT con las opciones para el ingreso de datos (input data) y opciones avanzadas (advanced settings)*



*Nota:* Fuente: Extraído de CITA UTEC (2021)

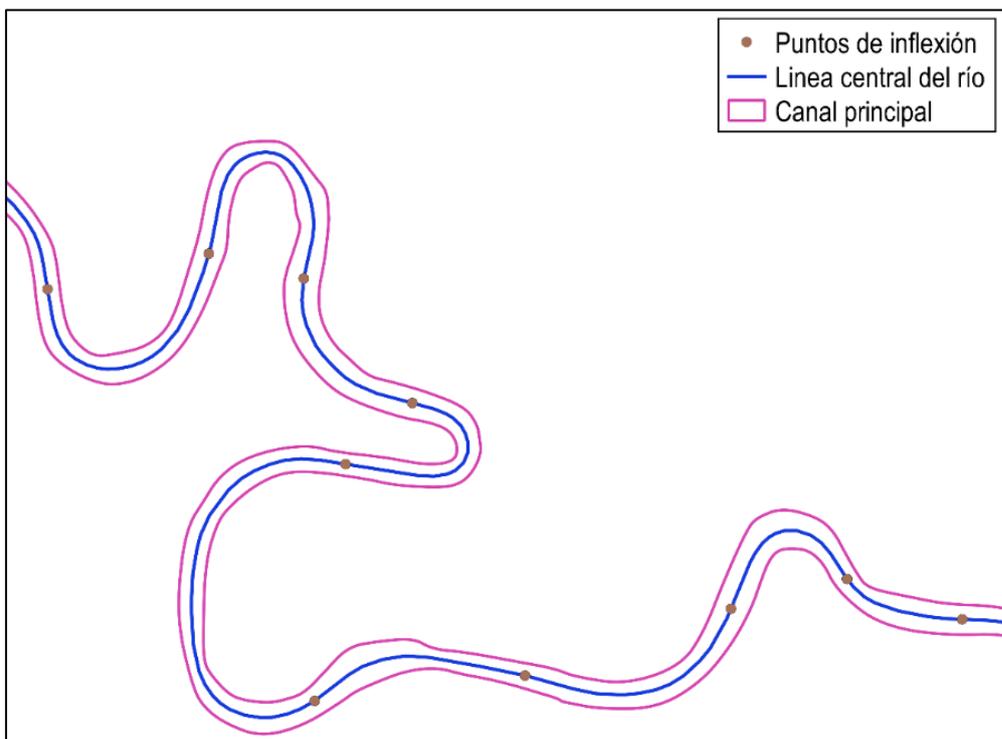
### ***iii. Edición manual de los puntos de inflexión***

Este tercer paso consistió en la revisión manual de estos puntos en el programa QGIS para garantizar que las curvaturas identificadas y delimitadas por los puntos de

inflexión fuesen realmente semimeandros y no pequeñas curvaturas despreciables dentro del mismo (véase resultado en la Figura 18).

### Figura 18

*Vista de la interfaz QGIS con los puntos de inflexión revisados manualmente*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia.

#### **3.3.2.5 Obtención de semimeandros**

La obtención de semimeandros se realizó siguiendo tres pasos que se resumen en: (i) corte de la línea central y cálculo de la longitud de los semimeandros, (ii) generación de polígono buffer y (iii) obtención del polígono del río separado en semimeandros.

##### ***i. Corte de la línea central***

En este paso, de acuerdo a los puntos de inflexión obtenidos y editados (sección 3.3.2.4), se procedió a cortar la línea central del río. Esto se realizó con las herramientas «puntos a ruta» y «dividir con líneas» del programa QGIS. En todos los casos, los vértices

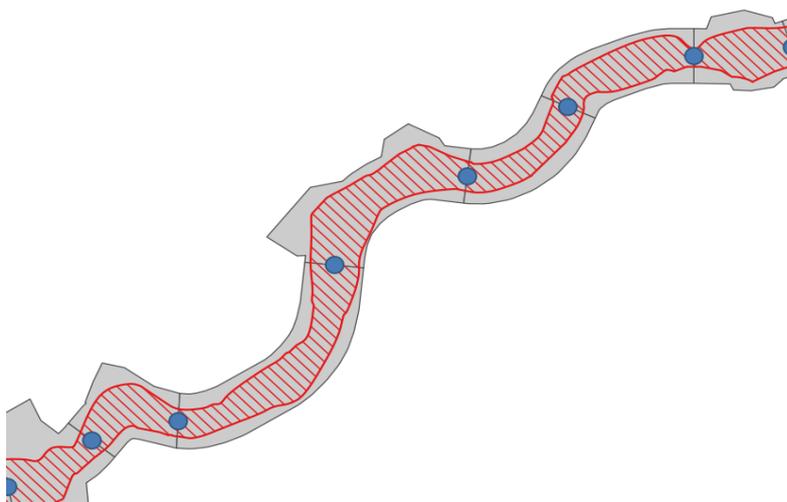
de la línea central cortada coincidieron con los puntos de inflexión obtenidos anteriormente. Dado que cada segmento de la línea central representaba el parámetro «*longitud de semimeandro*».

## **ii. Generación de polígono buffer**

Siguiendo las metodologías de Estada et al. (2023) y CITA-UTEC (2021), como segundo paso después obtener las longitudes de los semimeandros, se procedió a generar un polígono buffer. Este polígono, que abarca un área mayor que el polígono original del río, se generó para cada semimeandro utilizando la herramienta «buffer» de QGIS. La línea central cortada se utilizó como dato de entrada. Posteriormente, los polígonos buffer de algunos tramos del río fueron editados manualmente para garantizar que toda la sección de interés del río estuviese dentro del polígono buffer. La Figura 19 muestra un ejemplo de un tramo del río con el polígono buffer editado.

### **Figura 19**

*Imagen referencial del polígono buffer para un tramo del río Malinowski*



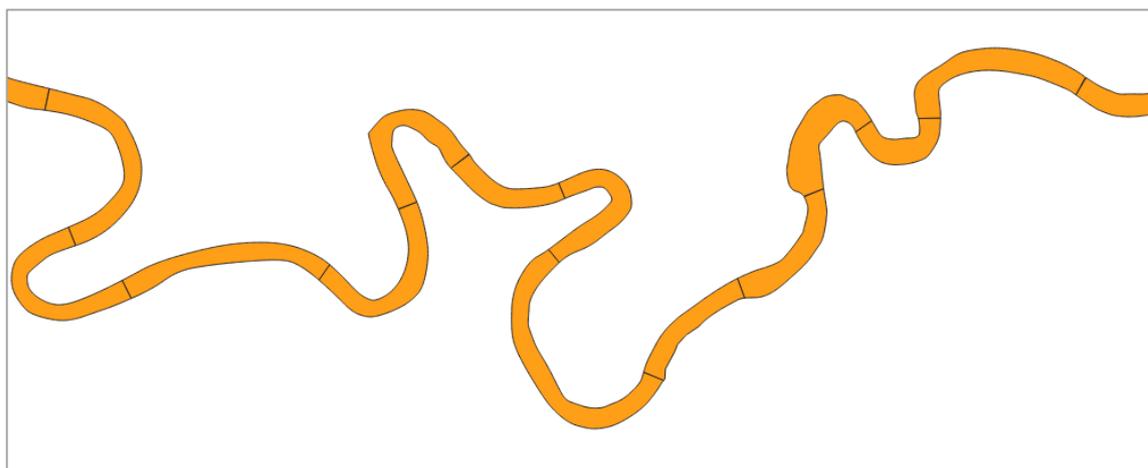
*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia. El área de color gris representa el polígono buffer original, el área con achurado rojo indica el polígono original del río y los puntos azules representan los puntos de inflexión editados.

### ***iii. Obtención del polígono del río separado en semimeandros***

Posterior a la generación de los polígonos buffer para cada semimeandro, se procedió a obtener el polígono del río dividido en semimeandros, cuyo inicio y fin coincidían con los puntos de inflexión obtenidos (sección 3.3.2.4). Este procedimiento se realizó utilizando la herramienta «intersección» de QGIS, donde se ingresaron los datos del polígono del canal principal del río (sección 3.3.2.1) y el polígono buffer (sección 3.3.2.5). La Figura 20 muestra el resultado final del proceso de obtención de semimeandros para el segmento de estudio del río Malinowski.

#### **Figura 20**

*Vista de la interfaz QGIS con los semimeandros obtenidos para el río Malinowski*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia.

### **3.3.3 Fase 3: Posprocesamiento de datos**

La fase del posprocesamiento de datos incluyó la unión espacial de los datos obtenidos en la fase del procesamiento de datos (sección 3.3.2), seguida del cálculo de los parámetros morfométricos (longitud de onda, sinuosidad, ancho promedio) y los parámetros morfodinámicos (migración y erosión-deposición). Los resultados obtenidos en esta fase son la base para el análisis y la discusión de resultados (Capítulo IV).

### 3.3.3.1 Proceso de unión espacial de datos

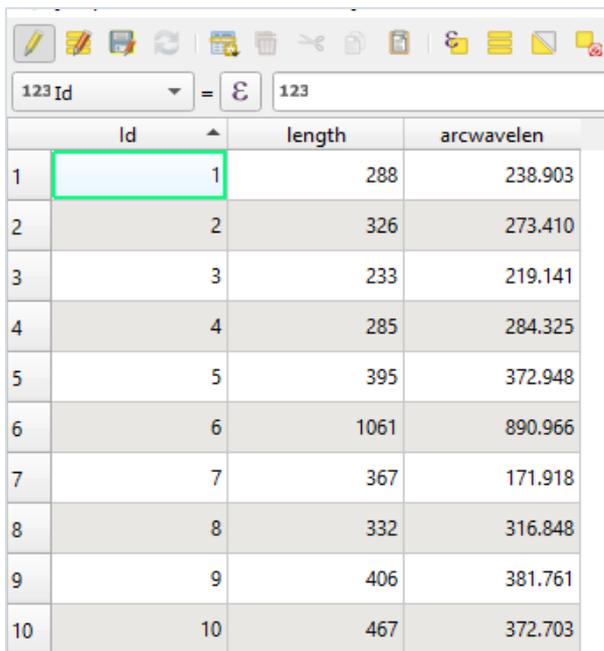
Previo al proceso de unión espacial de datos, se realizó el cálculo del indicador «*longitud de onda*». El proceso se realizó con la herramienta «extraer vértices específicos» de QGIS 3.22.16 para obtener los vértices de inicio y fin de cada semimeandro. Posteriormente, los vértices se procesaron en una versión anterior de QGIS (QGIS 2.16.3) para utilizar la herramienta «Points2One», que no está disponible en versiones más recientes del programa. Este proceso da como resultado final una línea recta que conecta los vértices de inicio y fin de cada semimeandro. Luego, al calcular las longitudes de estas líneas rectas, se obtiene el indicador «*longitud de onda*».

El proceso de unión espacial de datos consistió en transferir la información de los archivos shapefile de los indicadores «*longitud de semimeandro*» (sección 3.3.2.5) y «*longitud de onda*» hacia el archivo shapefile de los semimeandros cortados. El indicador longitud de onda se calculó con la herramienta «extraer vértices específicos» de QGIS para obtener los vértices de inicio y fin de cada semimeandro. Posteriormente, estos vértices se procesaron en una versión anterior de QGIS (QGIS 2.16.3) mediante la herramienta «Points2One», que no está disponible en versiones más recientes del programa. Este proceso dio como resultado las líneas rectas que conectan los vértices de inicio y fin de cada semimeandro. Al calcular las longitudes de estas líneas rectas, se obtuvo el indicador «longitud de onda».

La unión espacial de los datos se realizó con la herramienta «unir atributos por valor de campo» de QGIS, y dio como resultado una tabla de atributos con los dos indicadores o parámetros morfométricos (Figura 21).

**Figura 21**

*Tabla de atributos de las longitudes de onda y de semimeandro*



	Id	length	arcwavelen
1	1	288	238.903
2	2	326	273.410
3	3	233	219.141
4	4	285	284.325
5	5	395	372.948
6	6	1061	890.966
7	7	367	171.918
8	8	332	316.848
9	9	406	381.761
10	10	467	372.703

*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia. «Id» indica el número identificador de los semimeandros ordenados desde la cabecera del río Malinowski hasta la confluencia con el río Tambopata, «length» corresponde al indicador «longitud de semimeandro» y «arcwavelen» señala los valores de «longitud de onda».

### **3.3.3.2 Obtención de parámetros morfométricos**

Una vez obtenidos los indicadores longitud de onda y longitud de semimeandro (sección 3.3.2.1), se procedió a calcular los parámetros morfométricos «sinuosidad» y «ancho promedio» para su posterior unión espacial a los tramos de valle dividido, considerados como unidades espaciales comparables en todo el periodo de estudio.

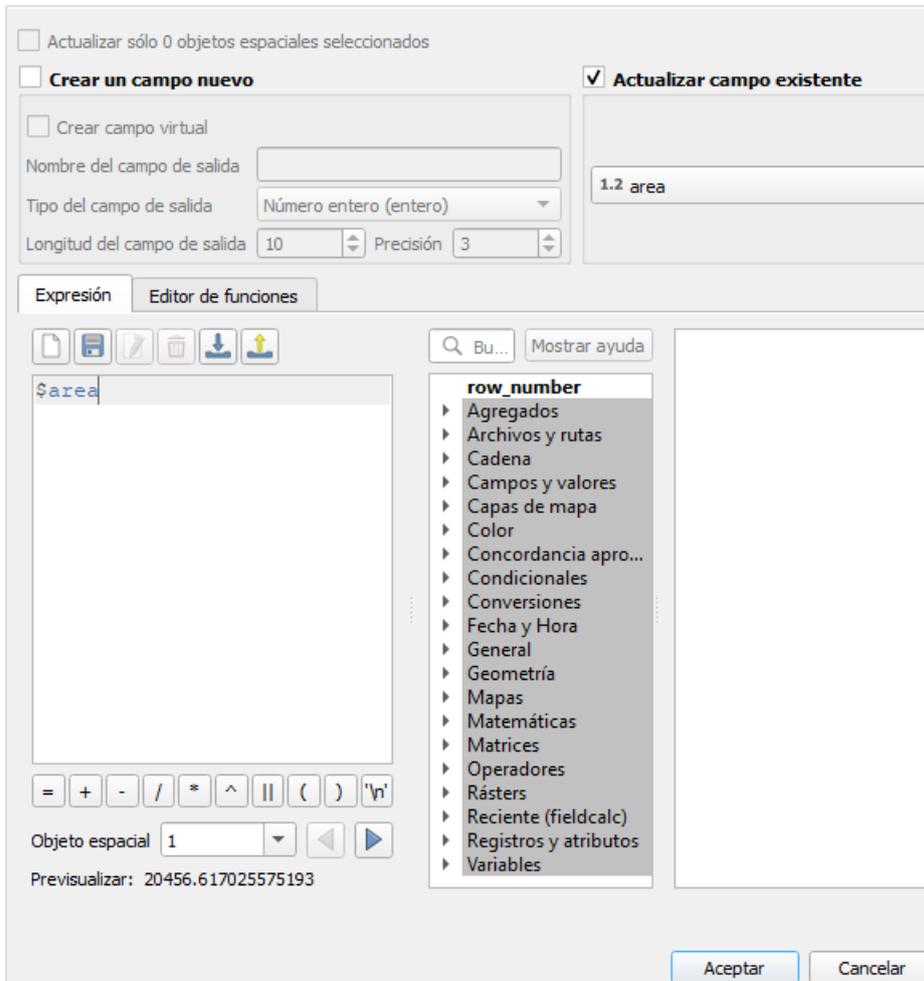
#### **Ancho promedio**

El ancho promedio se calculó como la relación entre el área de cada semimeandro y su longitud. Utilizando la función «field calculator» de Qgis (Figura 22), el primer paso consistió en obtener el área de los semimeandros. El segundo paso consistió en calcular

el ancho promedio («*aver-width*» en la tabla de atributos), dividiendo el «*área de semimeandro*» por la «*longitud de semimeandro*».

**Figura 22**

*Ventana de la herramienta de cálculo del área de semimeandros*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia.

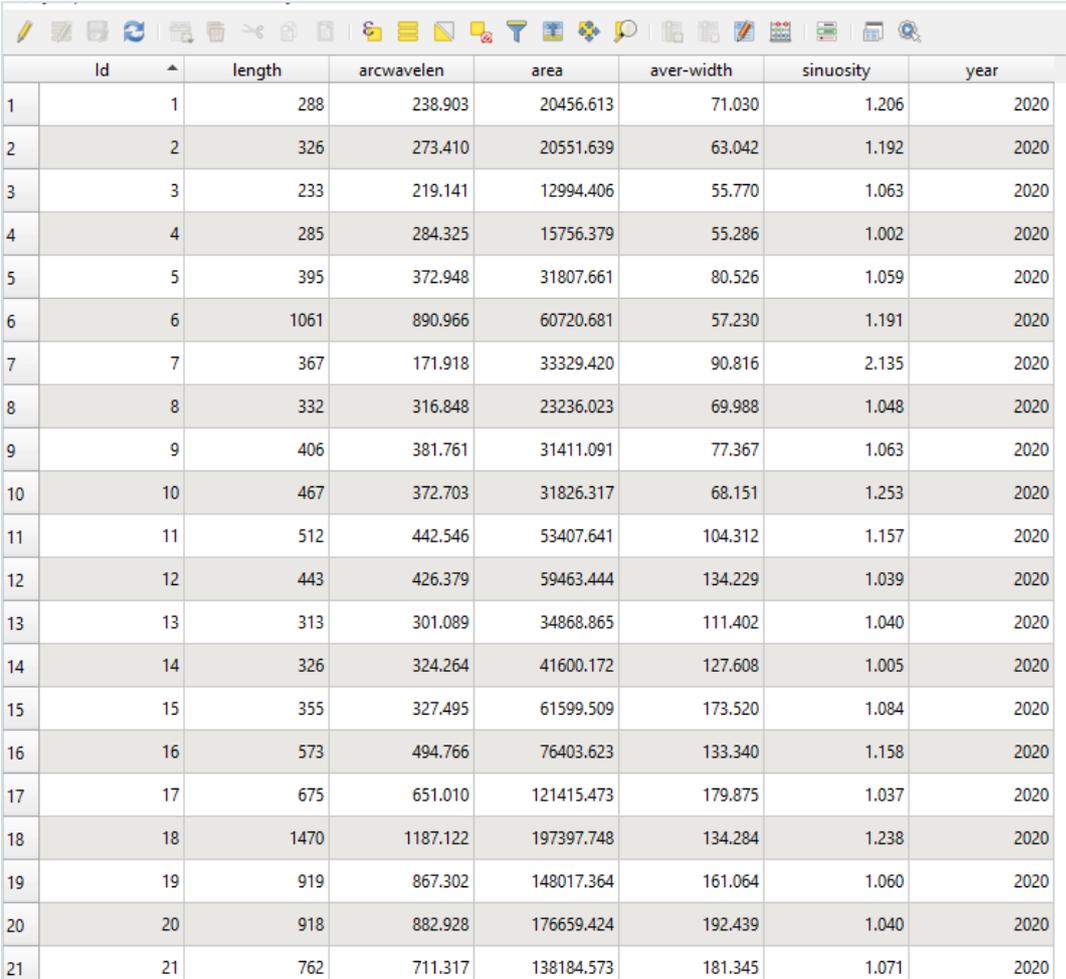
## ***Sinuosidad***

Los valores de la sinuosidad se calcularon dividiendo los parámetros «*longitud de semimeandro*» y «*longitud de onda*», cuyos valores se obtuvieron en pasos anteriores (secciones 3.3.2.5 y 3.3.3.1). Como resultado de este cálculo, se obtuvo una tabla de atributos con todos los parámetros morfométricos de estudio. A manera de ejemplo, la

Figura 23 muestra la tabla de atributos de los parámetros morfométricos correspondientes al año 2020.

### Figura 23

*Tabla de atributos de los parámetros morfométricos para el año 2020*



Id	length	arcwavelen	area	aver-width	sinuosity	year
1	288	238.903	20456.613	71.030	1.206	2020
2	326	273.410	20551.639	63.042	1.192	2020
3	233	219.141	12994.406	55.770	1.063	2020
4	285	284.325	15756.379	55.286	1.002	2020
5	395	372.948	31807.661	80.526	1.059	2020
6	1061	890.966	60720.681	57.230	1.191	2020
7	367	171.918	33329.420	90.816	2.135	2020
8	332	316.848	23236.023	69.988	1.048	2020
9	406	381.761	31411.091	77.367	1.063	2020
10	467	372.703	31826.317	68.151	1.253	2020
11	512	442.546	53407.641	104.312	1.157	2020
12	443	426.379	59463.444	134.229	1.039	2020
13	313	301.089	34868.865	111.402	1.040	2020
14	326	324.264	41600.172	127.608	1.005	2020
15	355	327.495	61599.509	173.520	1.084	2020
16	573	494.766	76403.623	133.340	1.158	2020
17	675	651.010	121415.473	179.875	1.037	2020
18	1470	1187.122	197397.748	134.284	1.238	2020
19	919	867.302	148017.364	161.064	1.060	2020
20	918	882.928	176659.424	192.439	1.040	2020
21	762	711.317	138184.573	181.345	1.071	2020

*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia. «Id» indica el número identificador de los semimeandros ordenados desde la cabecera del río Malinowski hasta la confluencia con el río Tambopata; «length» corresponde al indicador «longitud de semimeandro»; «arcwavelen» señala los valores de «longitud de onda»; «aver-width» señala los valores de la variable «ancho promedio del río»; «sinuosity» corresponde al indicador «sinuosidad»; y «year» corresponde al año de estudio.

### **3.3.3.3 Obtención de parámetros morfodinámicos**

La obtención de los parámetros morfodinámicos, es decir, erosión, deposición y migración, requirió analizar los polígonos del río completo (sección 3.3.2.1), correspondientes a dos años de estudio consecutivos (ej.: 1984 y 1987). A continuación, se describen los pasos seguidos para su cálculo.

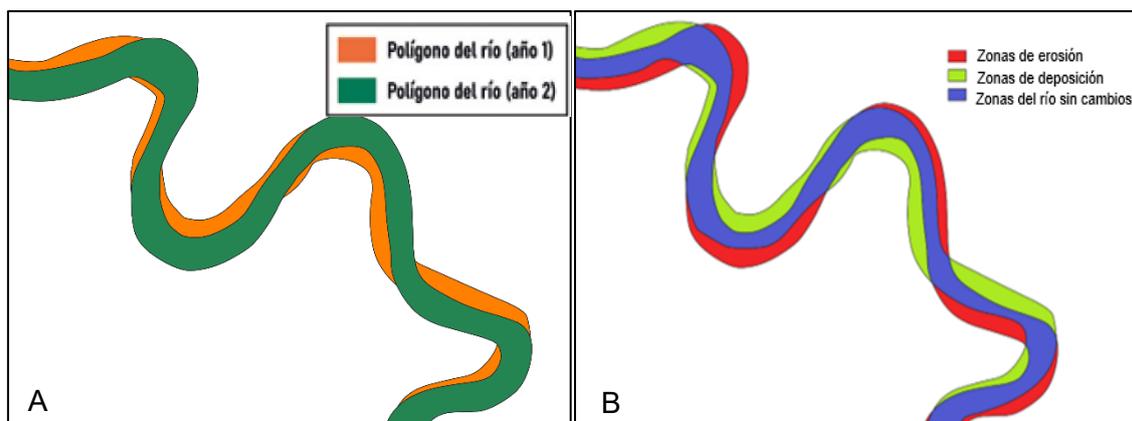
#### ***Erosión y deposición***

Las áreas de erosión y deposición a lo largo del tramo de estudio del río Malinowski se calcularon utilizando los datos de los polígonos del río completo (tanto del canal principal como de los secundarios; sección 3.3.2.1). Para obtener las áreas de erosión y deposición ocurridas en cada par de años de estudio consecutivos, se ingresaron los datos de los shapefile de los polígonos del río completo correspondientes a cada año de estudio (en este ejemplo, «*año de estudio 1*» y «*año de estudio 2*» en la Figura 24A) en la herramienta «Intersección» de QGIS. El resultado de la intersección de ambos polígonos proporcionó las zonas del río que no presentaron cambios durante el periodo entre el «*año de estudio 1*» y el «*año de estudio 2*» (área de color azul en la Figura 24B). Esto se interpretó como que no se produjo ni erosión ni deposición en dichas zonas.

Una vez identificadas las zonas de erosión y deposición en el tramo fluvial durante el periodo de estudio, se procedió a calcular el área de dichas zonas. El área de las zonas de deposición se obtuvo con la herramienta «diferencia simétrica» de QGIS, con el archivo shapefile del «*año de estudio 1*» como capa de diferencia y la intersección entre ambos canales como capa de entrada. De manera similar, se calculó el área de las zonas de erosión utilizando el shapefile del «*año de estudio 2*» como capa de diferencia. Como resultado, se obtuvieron las zonas en las que se produjo erosión (área en color rojo en Figura 24B), las cuales son nuevas áreas de río conectadas completamente a la red de canales del año más reciente evaluado o «*año de estudio 2*» (CITA UTEC, 2021).

## Figura 24

*Imágenes referenciales de la obtención del parámetro erosión-deposición*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia. La figura muestra los polígonos del río de dos años de estudio consecutivos (A) y el resultado del proceso de obtención de las zonas de erosión, deposición y zonas sin cambios durante el periodo entre los dos años consecutivos de estudio.

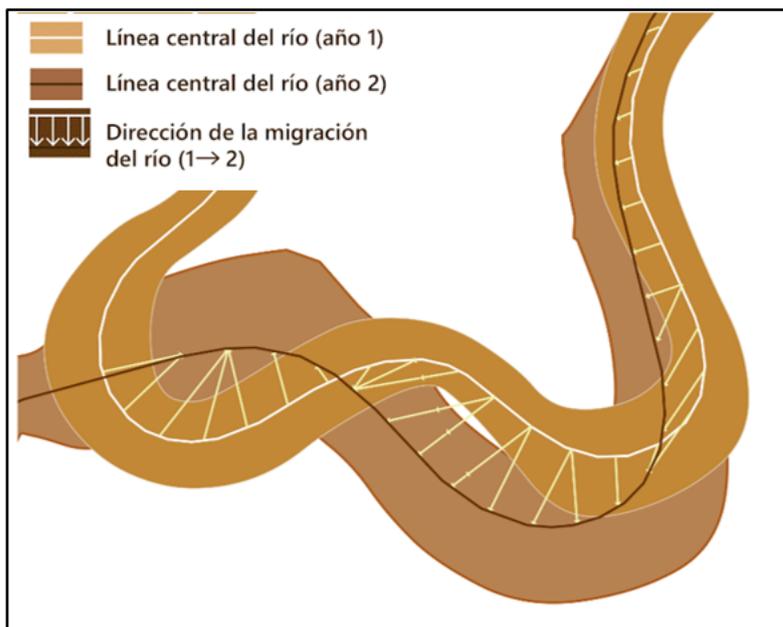
### ***Migración***

La obtención de la migración del río Malinowski requirió las líneas centrales de dos años de estudio consecutivos y el intervalo de tiempo existente entre ellos como datos de entrada. El procesamiento se realizó con uno de los códigos del repositorio QGIS-Processing-tools de R<sup>3</sup>, que genera vectores desde la línea central del año más antiguo hacia la del año más reciente. Como resultado, se obtuvo un archivo vectorial shapefile correspondiente al indicador «*migración*» con los valores de las distancias de movimiento de la línea central (Figura 25). Los valores obtenidos se revisaron manualmente para descartar las zonas donde solo se había producido un cambio de canal del río, es decir un canal secundario se convirtió en principal y el otro pasó a ser secundario (CITA UTEC, 2021).

<sup>3</sup> <https://github.com/mlt/QGIS-Processing-tools/tree/master/rscripts>

## Figura 25

Imagen referencial de la obtención del parámetro migración.



Nota: Fuente: Procesamiento en QGIS 3.22.16. Elaboración propia.

### 3.3.3.4 Procesamiento de variables e indicadores

El procesamiento de las variables e indicadores se realizó en dos pasos, a partir de los valores obtenidos de deforestación por la MAPE (Caballero Espejo et al., 2018a) y los parámetros morfológicos (parámetros morfométricos y morfodinámicos; secciones 3.3.3.2 y 3.3.3.3, respectivamente). El primer paso consistió en transferir los datos a las 38 zonas del valle geológico, definidas como unidad espacial de comparación entre años de estudio (sección 3.3.1.2). Esta operación se realizó con la herramienta «*intersección*» de QGIS, utilizando dos archivos de entrada (1) el archivo shapefile del valle geológico dividido en las 38 zonas y (2) el archivo shapefile de los parámetros morfométricos o morfodinámicos calculados para cada año de estudio. El resultado de la intersección contuvo los valores de los parámetros morfológicos calculados y su ubicación dentro de las 38 zonas del valle geológico. La tabla de atributos finales obtenida para los parámetros morfológicos y para la deforestación desde QGIS a Excel para su organización, análisis estadístico e interpretación.

### 3.3.3.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico para evaluar la relación entre los cambios morfológicos del río Malinowski y la presencia de la MAPE de oro en el periodo de estudio (1984-2020) se realizó con el programa SPSS versión 25 (Tabla 2). El análisis estadístico comprendió tres pasos: (i) organización de los datos, (ii) pruebas de normalidad y (iii) pruebas estadísticas de comparación, que se describen a continuación.

#### *i. Organización de los datos*

La organización de los datos para realizar el análisis estadístico consistió en calcular los valores promedio (media) de los parámetros morfométricos (sinuosidad, ancho promedio, longitud de onda y longitud de semimeandro; sección 3.3.3.2) y morfodinámicos (erosión, deposición y migración; sección 3.3.3.3) por subperiodo de análisis (impacto bajo, impacto medio e impacto alto; sección 3.3.1.4). El formato utilizado para el análisis estadístico de los datos en Excel se muestra a continuación en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Ejemplo de tabla con datos organizados para el análisis estadístico*

Tramo	Sección	Tipo de minería	Impacto bajo	Impacto medio	Impacto alto
1	A1	Altamente mecanizado	PMB_1A1	PMM_1A1	PMA_1A1
2	A1	Altamente mecanizado	PMB_2A1	PMM_2A1	PMA_2A1
3	A1	Altamente mecanizado	PMB_3A1	PMM_3A1	PMA_3A1
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
37	A3	Mínimamente mecanizado	PMB_37A3	PMM_37A3	PMA_37A3
38	A3	Mínimamente mecanizado	PMB_38A3	PMM_38A3	PMA_38A3

*Nota:* Los valores en las columnas Impacto bajo (PMB), Impacto medio (PMM), Impacto alto (PMA) representan los valores numéricos de los parámetros morfológicos calculados para cada una de las 38 zonas del río (numeradas del 1 al 38) y las respectivas secciones (A1, A2 ó A3). Elaboración propia

## **ii. Pruebas de normalidad**

Luego de organizar los datos, se procedió a verificar la distribución normal de los valores de los parámetros morfológicos según el nivel de impacto de la minería, utilizando la prueba Shapiro\_Wilk. Esta prueba se recomienda para bases de datos pequeñas, con menos de 50 elementos (la base de datos aquí analizada consistió de 38 valores; ver ejemplo en la Tabla 5) (Ruiz & Sim, 2011). La prueba estadística se aplicó a cada tabla de datos de los parámetros morfológicos y la deforestación por MAPE.

El estadístico Shapiro –Wilk, definido según la Ecuación 2, plantea la hipótesis nula ( $H_0$ ) que la variable no sigue una distribución normal. Considerando un nivel de significancia igual al 5% (0.05), la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula se definió en función del estadístico obtenido para cada indicador de las variables, determinando una distribución normal para aquellas variables cuyo estadístico sea mayor o igual a dicho nivel de significancia (Segnini, 2004)

$$SW = \frac{[\sum_{i=1}^n a_i Y_{(i)}]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

Donde:  $Y_{(i)}$  son los valores de muestra aleatorios ordenados,  $a_i$  son constantes generadas a partir de las covarianzas, varianzas y medias de la muestra (tamaño  $n$ ) de una muestra normalmente distribuida y  $(Y_i - \bar{Y})$  son las diferencias sucesivas que se obtienen al restar el primer valor al último valor, el segundo al penúltimo, el tercero al antepenúltimo y así sucesivamente, hasta llegar a restar el último al primer valor (Segnini, 2004).

## **iii. Pruebas de estadísticas de comparación**

La evaluación de la influencia del grado de impacto de la MAPE en la variación de los parámetros morfológicos del río Malinowski se realizó mediante la comparación de las medias de cada parámetro morfológico en los tres niveles de impacto: bajo, medio y alto.

Los datos de los parámetros morfológicos en los tres niveles de impacto por MAPE fueron variables cuantitativas y se trataron como muestras relacionadas. El número de datos relacionados utilizados fue igual a la cantidad de tramos del río analizados (38). Estos datos correspondientes a los tres subperiodos de estudio se compararon entre sí a través del estadístico de Friedman, debido a la distribución no normal de todos los indicadores y la presencia de tres grupos de datos por subperiodos o niveles de impactos.

La prueba de Friedman plantea la hipótesis nula de que no existen cambios en las medidas repetidas (Ortega Páez et al., 2022). Aplicado a esta investigación, la hipótesis nula ( $H_0$ ) sugiere que no existen diferencias significativas entre las medias de los indicadores de los cambios morfológicos en los tres niveles de impacto.

Romaina-Flores (2012) presenta al estadístico de Friedman, definido según la Ecuación 3:

$$F = \frac{12}{bt(t+1)} \sum R_i^2 - 3b(t+1) \quad (3)$$

Donde:  $R_i^2$  es la suma de rangos por columnas al cuadrado,  $n$  es el número de muestras o niveles de impacto, en el caso de la investigación y  $b$  es el número de bloques o número de tramos del río de estudio en el caso de esta investigación.

Se consideraron estadísticamente significativos todas aquellos resultados con un nivel de significancia ( $p$ ) menor a 0.05, de acuerdo con la regla de rechazo de la hipótesis nula (Romaina-Flores, 2012).

#### ***iv. Pruebas de estadísticas de correlación***

La relación entre las variaciones de los parámetros morfológicos y el área deforestada por la MAPE se evaluó a través de pruebas de correlación entre ambas variables. Dada la distribución no normal de las variables de esta investigación, se seleccionó el estadístico de correlación de rangos de Spearman. Este estadístico no paramétrico mide la fuerza de asociación o interdependencia entre dos variables, así como el tipo de relación entre ambas (positiva o negativa) (Tomás-Sábado, 2010). La prueba genera un valor de significancia asintótica “p” asociado, que determina la existencia o ausencia de correlación entre las variables analizadas, y un coeficiente de correlación “ $r_s$ ” que varía entre +1 y -1, siendo los valores más cercanos a cero los que indican una correlación más débil entre las variables analizadas.

La prueba de Spearman plantea como hipótesis nula ( $H_0$ ) que no existe correlación entre las variables. En el contexto de esta investigación, esto implica que no existe correlación entre los indicadores de los cambios morfológicos (parámetros morfológicos) y la deforestación por la MAPE. La regla de rechazo de esta hipótesis nula establece que el valor de significancia asintótica (p) obtenido al realizar la prueba debe ser menor al nivel de significancia definido (0.05).

Franco et al. (2014) define el estadístico de Correlación de Spearman  $r_s$  a través de la siguiente ecuación:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4)$$

Dónde: n es el número de datos que se correlacionan,  $x_i$  el orden (rango) de la observación (dato) i de la variable x, y  $y_i$  el orden (rango) de la observación (dato) i de la variable y. En esta investigación, la variable “x” representa cada parámetro morfológico

analizado, mientras que la variable “y” representa las áreas de deforestación acumulada por la MAPE. Valores  $r_s$  menores a 0.2 representan una correlación muy baja,  $r_s$  entre 0.2 y 0.4 una correlación baja,  $r_s$  entre 0.4 a 0.6 correlación moderada,  $r_s$  de 0.4 a 0.6 correlación alta y  $r_s$  mayores o 0.8 una correlación muy alta.

## **Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados**

Este capítulo presenta y discute los resultados encontrados por la investigación. La sección 4.1 presenta la cuantificación del área deforestada por MAPE de acuerdo a las secciones de estudio, tipo de minería y subperiodos de estudio (nivel de impacto). Las secciones 4.2 y 4.3 presentan los resultados del análisis de los parámetros morfométricos y morfodinámicos, respectivamente, de acuerdo a los tres enfoques de los objetivos de la investigación: subperiodo de estudio, deforestación por MAPE y tipo de MAPE. La sección 4.4 presenta la discusión de resultados presentados en las secciones 4.2 y 4.3.

### **4.1 Deforestación por la MAPE en el área de estudio**

#### **4.1.1 *Deforestación por secciones de estudio y tipo de MAPE***

El área total deforestada por la MAPE en el área de estudio durante el periodo 1984-2020 se calculó en un total de 8795.60 ha, representando aproximadamente el 15% de la superficie total del área de estudio (ver Figura 8 y Tabla 6). Esta deforestación se concentró principalmente en las secciones de estudio A1 y A2, que conjuntamente representaron el 14% del área total de estudio. La sección A3, en la parte baja del río, presentó una deforestación mínima, correspondiente a aproximadamente 540 ha (1%) del área de estudio.

De acuerdo al tipo de minería, la MAPE altamente mecanizada o de maquinaria pesada (sección A1) deforestó 2968.68 ha, que representa el 34% del total de deforestación acumulada en el valle geológico o área de estudio. En contraste, la MAPE mínimamente mecanizada o de bombas de succión (secciones A2 y A3) deforestó 5826.89 ha, equivalente al 66% del total de deforestación acumulada en el área de estudio.

**Tabla 6**

*Cálculo del área deforestada por la MAPE en el área de estudio.*

Sección	Área total del valle geológico (ha)	Área de valle deforestado (ha)	% de deforestación en la sección
A1	6 143.91	3 069.50	50%
A2	22 800.48	5 185.87	23%
A3	29 994.77	540.21	2%

*Nota:* Elaboración propia

#### **4.1.2 Deforestación por nivel de impacto de la MAPE**

Los resultados del análisis de deforestación por la MAPE en los tres subperiodos de estudio (impacto bajo, impacto medio e impacto alto; sección 3.3.1.4) se muestran en la Tabla 7. Durante el subperiodo de impacto bajo (1984 – 2000), el área de estudio presentó una deforestación acumulada por la MAPE de 146.41 ha, distribuida entre las secciones A1 (68.88 ha) y A2 (77.52 ha). La sección A1 presentó los valores anuales más altos, con un máximo de 16.84 ha en 2003, mientras que en A2 fue de 16.03 ha en 1999. La sección A3 no presentó deforestación por minería durante este subperiodo.

En el subperiodo de impacto medio (2001 – 2009), la deforestación acumulada fue de 686.95 ha. La sección A2 lideró con 518.16 ha, seguida de la sección A1 con 146.08 ha y la sección A3 con 22.71 ha. Los valores anuales variaron de 0.27 en A3 en 2002 a 139.21 ha en A2 en 2008.

En el subperiodo de impacto alto (2010 – 2020), las tres secciones presentaron un notable aumento de la deforestación por la MAPE respecto al subperiodo de impacto medio (véase Figura 26). La deforestación acumulada se calculó en 7962.23 ha, concentrándose principalmente en A2 (4590.18 ha) y A1 (2854.55 ha), mientras que A3 representó el 6% de la deforestación total registrada en el subperiodo (517.50 ha).

**Tabla 7**

*Extensión de las áreas de deforestación por la MAPE (ha) por nivel de impacto y secciones de estudio*

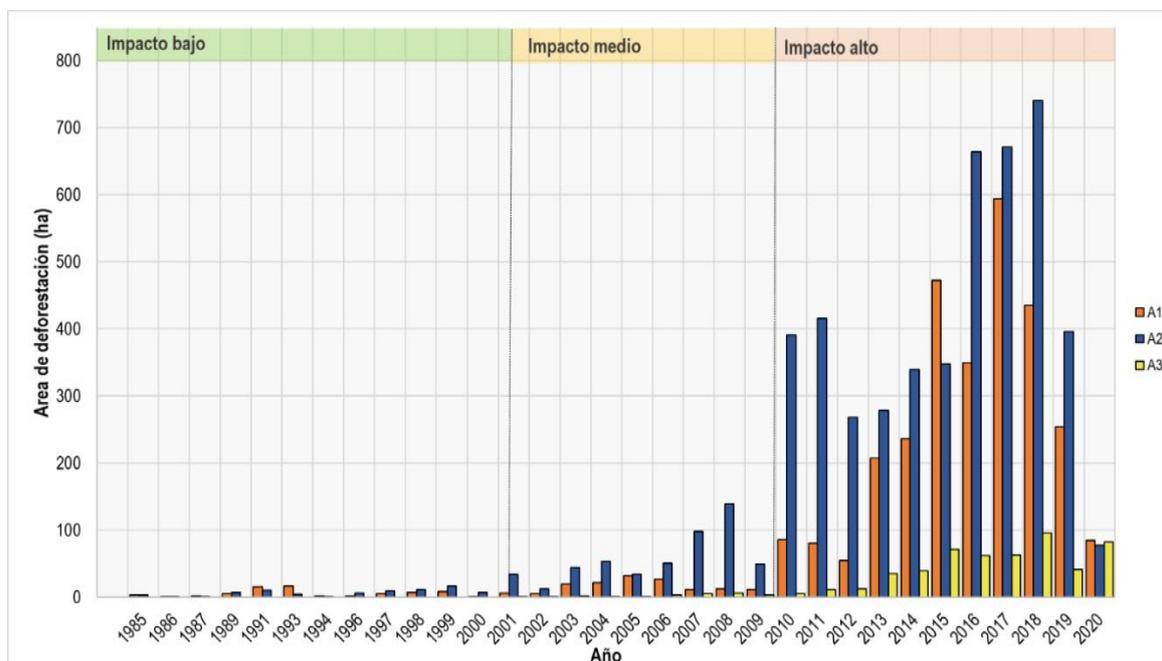
<b>Nivel de impacto</b>	<b>Año</b>	<b>Sección A1</b>	<b>Sección A2</b>	<b>Sección A3</b>	<b>Total</b>
Impacto bajo	1985	2.97	2.79	SD	<b>5.76</b>
	1986	1.35	0.90	SD	<b>2.25</b>
	1987	1.62	0.81	SD	<b>2.43</b>
	1989	5.00	7.11	SD	<b>12.11</b>
	1991	15.31	10.72	SD	<b>26.02</b>
	1993	16.84	3.87	SD	<b>20.72</b>
	1994	2.10	0.81	SD	<b>2.91</b>
	1996	2.43	6.39	SD	<b>8.82</b>
	1997	4.95	9.54	SD	<b>14.50</b>
	1998	7.11	10.90	SD	<b>18.01</b>
	1999	8.75	16.03	SD	<b>24.78</b>
2000	0.45	7.65	SD	<b>8.10</b>	
Impacto medio	2001	6.42	34.28	0.80	<b>41.51</b>
	2002	5.03	12.71	0.27	<b>18.01</b>
	2003	19.18	44.87	1.75	<b>65.80</b>
	2004	21.25	53.55	0.71	<b>75.51</b>
	2005	32.15	34.45	1.07	<b>67.67</b>
	2006	26.85	50.94	3.27	<b>81.07</b>
	2007	11.16	98.25	5.47	<b>114.87</b>
	2008	12.40	139.21	5.97	<b>157.58</b>
	2009	11.64	49.90	3.40	<b>64.93</b>
Impacto alto	2010	85.97	390.93	5.09	<b>481.99</b>
	2011	80.96	415.36	11.53	<b>507.85</b>
	2012	54.82	268.49	12.14	<b>335.45</b>
	2013	207.40	278.98	35.50	<b>521.87</b>
	2014	235.84	339.45	38.87	<b>614.16</b>
	2015	472.12	347.52	70.74	<b>890.37</b>
	2016	349.77	664.83	61.45	<b>1076.05</b>
	2017	594.43	671.25	62.78	<b>1328.46</b>
	2018	434.93	740.61	95.44	<b>1270.98</b>
	2019	253.36	395.78	41.06	<b>690.20</b>
	2020	84.95	76.98	82.90	<b>244.83</b>
<b>Total</b>	<b>----</b>	<b>3069.50</b>	<b>5185.87</b>	<b>540.21</b>	<b>8795.57</b>

*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018). Elaboración propia.

SD: Sin deforestación

**Figura 26**

*Extensión de las áreas deforestadas por la MAPE a lo largo del periodo de estudio detalladas por año y sección de estudio.*



*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018). Elaboración propia. Las barras azules, naranjas y amarillas representan las áreas de deforestación por año de las secciones A1, A2 y A3, respectivamente.

## 4.2 Análisis de parámetros morfométricos

A continuación, se presentan los resultados del análisis multitemporal de los cuatro parámetros morfométricos de estudio: longitud de semimeandro, longitud de onda de semimeandro, ancho promedio y sinuosidad, en función del nivel de impacto, la deforestación y el tipo de minería en el valle del río Malinowski.

### 4.2.1 Longitud de onda de semimeandro

#### 4.2.1.1 Longitud de onda por nivel de impacto por la MAPE

El análisis de la longitud de onda de los semimeandros del río Malinowski en función del nivel de impacto por la MAPE o subperiodos de estudio reveló diferentes tendencias entre las tres secciones de estudio (Tabla 8 y Figura 27).

En la sección A1 (parte alta del río), la longitud de onda media de los semimeandros varió entre 522 y 851 m. A lo largo de los tres subperiodos, se observó un aumento del 36% en la longitud de onda media desde el subperiodo de impacto bajo hasta subperiodo de impacto medio, seguido de una disminución del 21% desde el subperiodo de impacto medio al de impacto alto. Por otro lado, la sección A2 (sección media del río) presentó un rango de longitudes de onda media anual de 640 a 1169 m, mostrando una tendencia de aumento del 13% en el subperiodo de impacto medio y del 18% desde el subperiodo de impacto medio al de impacto alto. En la sección A3 (parte baja del río), las longitudes de onda media anuales variaron de 917 a 1149 m. La longitud de onda media por subperiodo de estudio presentó una tendencia opuesta a la sección A1, es decir, disminuyó un 8% desde el subperiodo de impacto bajo al subperiodo de impacto medio y aumentó un 2% desde el subperiodo de impacto medio al alto. El subperiodo de impacto bajo de la sección A3 presentó los valores más altos de longitud de onda media anual y por periodo.

El análisis más detallado a escalas temporales más cortas (uno o dos años) realizado para el subperiodo de alto impacto no reveló diferencias notables en los valores de longitud de onda media de las tres secciones de estudio en comparación con el análisis realizado cada cuatro años (Tabla 8 y Figura 27: líneas rojas punteadas versus roja sólida). Esto sugiere que la variación de la longitud de onda del río es consistente, ya sea que se examine en periodos cortos o más extensos.

El análisis estadístico de la influencia de la MAPE en la variación de la longitud de onda de los semimeandros (sección 2.2.2.1) reveló que, aun cuando se registró un incremento a nivel local del parámetro en la sección A2 (recuadro a en la Figura 27), ninguna de las secciones fluviales mostró diferencias estadísticamente significativas en las variaciones de la longitud de onda entre los tres subperiodos de estudio (Friedman  $p=0.479$ ). Esto sugiere que las variaciones de este parámetro no fueron primariamente influenciadas por las actividades mineras en el área de estudio.

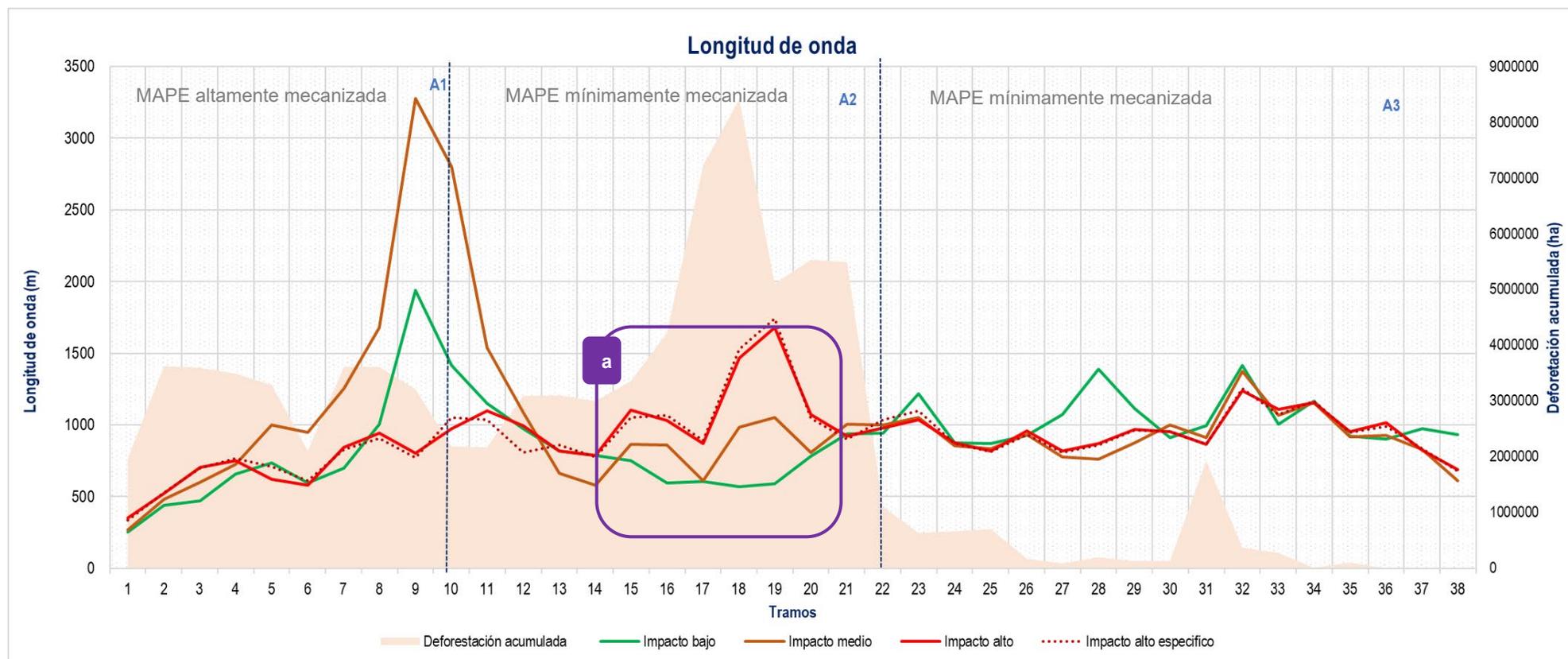
**Tabla 8***Longitud de onda de semimeandros media (m) por sección y nivel de impacto*

Subperiodo	Años	Sección A1		Sección A2		Sección A3	
		Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo
Impacto bajo	1984	521.91		860.13		1149.26	
	1987	558.98		709.94		1014.10	
	1992	512.80	584.99	640.05	745.60	926.50	1013.58
	1996	552.39		706.35		980.25	
	2000	778.89		811.51		997.80	
Impacto medio	2004	851.40		823.15		943.33	
	2008	740.36	795.88	866.10	844.62	916.95	930.14
Impacto alto	2012	607.43		920.68		940.68	
	2016	663.62	628.91	904.56	998.22	963.73	950.10
	2020	615.69		1169.43		945.90	
	<b>Total</b>	----	<b>640.35</b>		<b>841.19</b>		<b>977.85</b>
Impacto alto específico	2012	607.43		920.68		940.68	
	2014	664.83		849.02		949.29	
	2015	651.49		869.14		954.11	
	2016	663.62	635.32	904.56	975.22	963.73	946.61
	2017	639.47		1065.52		920.02	
	2018	604.70		1048.17		952.55	
	2020	615.69		1169.43		945.90	

*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El impacto específico corresponde a un análisis temporal más corto (1-2 años) durante el subperiodo de impacto alto. La media subperiodo corresponde al valor medio del parámetro analizado en la sección y en el respectivo subperiodo.

**Figura 27**

*Variación temporal de la longitud de onda media por niveles de impacto y secciones de estudio*



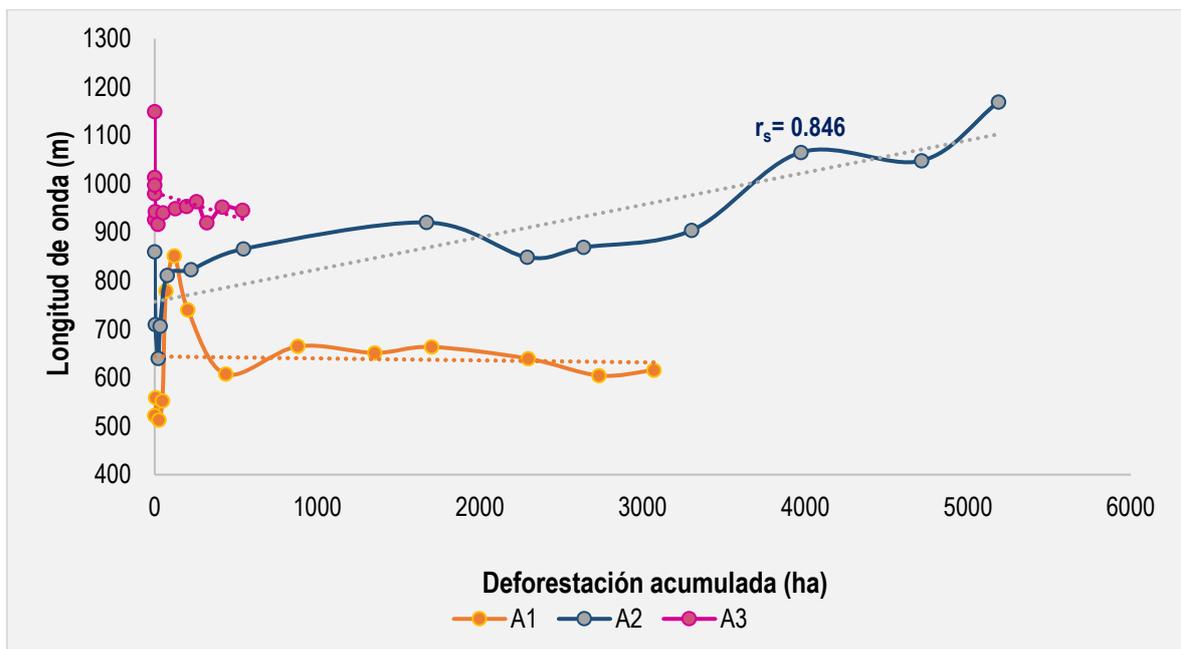
Nota: Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas de colores representan los valores medios de longitud de onda de semimeandro en los subperiodos de estudio. El recuadro morado indica incrementos localizados de la longitud de onda a medida que el nivel de impacto por la MAPE se incrementa.

#### 4.2.1.2 Longitud de onda en función de la deforestación por MAPE

La Figura 28 muestra la correlación entre la variación de la longitud de onda media del río y el área deforestada por MAPE. Solo se observó una alta correlación significativa entre ambas variables en la sección A2, que presenta el mayor índice de deforestación por la MAPE (Spearman  $p < 0.05$   $r_s = 0.85$ ). Estos resultados coinciden con el aumento de la longitud de onda a nivel local en la sección (ver recuadro morado en la Figura 27). No se encontró correlación entre las variables en las secciones A1 y A3 (Spearman  $p = 0.24$  y  $0.18$ , respectivamente).

**Figura 28**

*Variación temporal de la longitud de onda media en función de la deforestación por la MAPE*



*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El valor  $r_s$  representa el coeficiente de correlación de Spearman entre las dos variables.

#### **4.2.1.3 Longitud de onda en función del tipo de MAPE**

No se analizó la influencia del tipo de MAPE en las variaciones temporales de la longitud de onda de los semimeandros del río, debido que no se encontró que la actividad minera en el área de estudio hubiese influenciado significativamente en la variabilidad de este parámetro (secciones 4.2.1.1 y 4.2.1.2).

#### **4.2.2 Longitud de semimeandro**

##### **4.2.2.1 Longitud de semimeandro por del nivel de impacto por MAPE**

Las longitudes de semimeandro en las secciones de estudio A1, A2 y A3 presentaron las mismas tendencias de variación que las longitudes onda de los semimeandros a lo largo de los diferentes subperiodos de estudio (Tabla 9). En la sección A1, las longitudes de semimeandros variaron de 595 a 851 m, con un aumento del 38% en el subperiodo de impacto medio, seguido de una reducción del 23% desde el subperiodo de impacto medio al de impacto alto. Por otro lado, la sección A2 presentó longitudes de semimeandros que variaron entre 901 y 1454 m, con un incremento del 3% y 14 % en los subperiodos de impacto medio y alto, respectivamente. La sección A3 presentó valores de longitudes de semimeandro en un rango de 1347 a 1632 m, con una tendencia opuesta a la sección A1, es decir, una reducción del 6% desde el subperiodo de impacto bajo al subperiodo de impacto medio, y un incremento del 5% desde el subperiodo de impacto medio al de impacto alto.

El análisis más detallado a escalas temporales de uno o dos años en el subperiodo de impacto alto no evidenció diferencias entre los valores de longitud de semimeandros con respecto al análisis realizado cada cuatro años (ver Tabla 9 y línea roja punteada versus línea roja sólida en la Figura 29). Esto evidencia que, al igual que en el caso de la longitud de onda (sección 4.2.1.1), las variaciones de la longitud de semimeandros del río son consistentes, ya sea que se analice en periodos cortos o más extensos.

Según el análisis estadístico de la influencia de la MAPE en la variación temporal del parámetro longitud de semimeandro, aun cuando se registró un incremento a nivel local del parámetro en la sección A2 (recuadro a en la Figura 29), ninguna de las secciones de estudio mostró diferencias estadísticamente significativas en las variaciones de este parámetro durante los tres subperiodos de estudio (Friedman  $p=0.172$ ). Al igual que los resultados obtenidos para el parámetro longitud de onda, estos resultados sugieren que las variaciones de las longitudes de los semimeandros del río Malinowski a lo largo del periodo de estudio no fueron primariamente influenciadas por las operaciones mineras presentes en el valle fluvial.

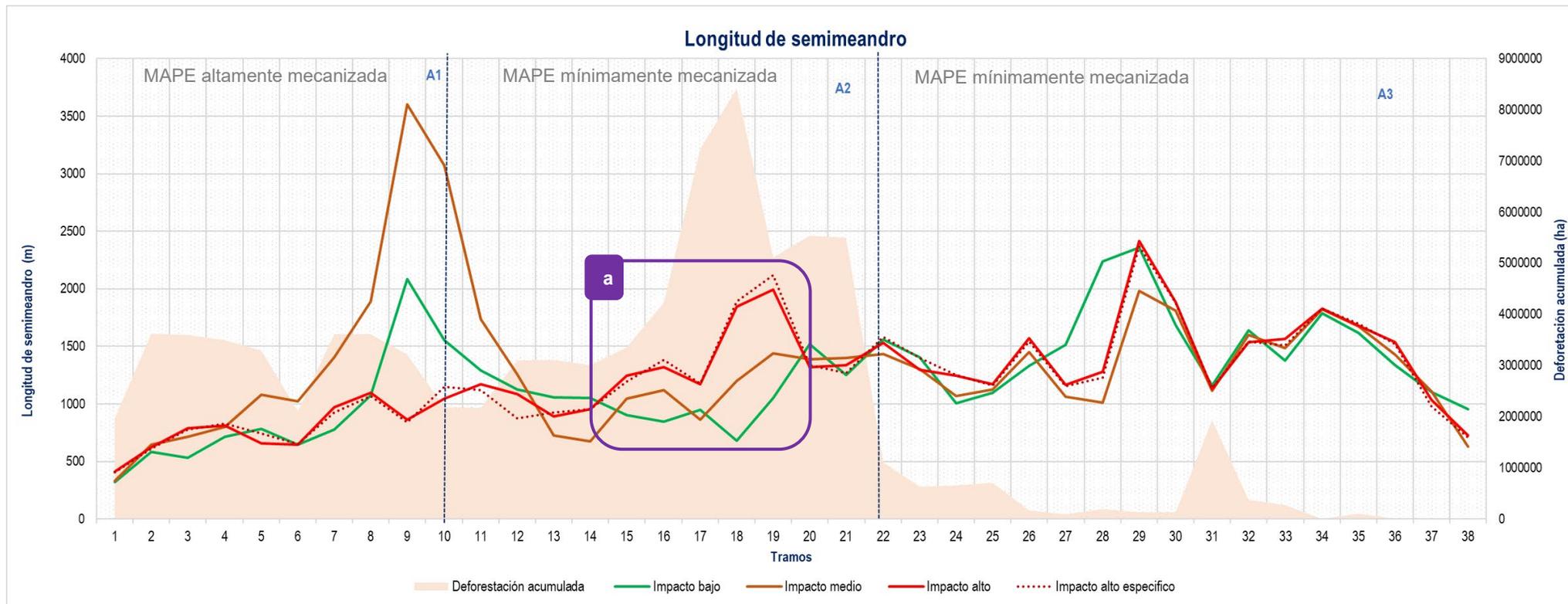
**Tabla 9***Longitud de semimeandro media (m) por sección y nivel de impacto*

Subperiodo de estudio	Años	Sección A1		Sección A2		Sección A3	
		Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo
Impacto bajo	1984	595.41		1236.07		1632.18	
	1987	630.02		1035.69		1504.12	
	1992	581.79	661.76	900.59	1066.32	1347.10	1476.86
	1996	618.00		1034.89		1415.06	
	2000	883.59		1124.37		1485.87	
Impacto medio	2004	970.62		1077.02		1389.18	
	2008	850.99	910.81	1123.49	1100.25	1395.39	1392.29
Impacto alto	2012	691.88		1212.40		1455.97	
	2016	736.83	705.21	1099.65	1255.23	1470.44	1468.21
	2020	686.93		1453.62		1478.22	
	<b>Total</b>	<b>----</b>	<b>724.61</b>	<b>1129.78</b>		<b>1457.35</b>	
Impacto alto específico	2012	691.88		1212.40		1455.97	
	2014	747.19		1130.37		1448.31	
	2015	732.62		1161.33		1463.39	
	2016	736.83	708.18	1099.65	1226.62	1470.44	1461.82
	2017	700.44		1258.01		1433.93	
	2018	661.36		1270.92		1482.47	
	2020	686.93		1453.62		1478.22	

*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El impacto específico corresponde a un análisis temporal más corto (1-2 años) durante el subperiodo de impacto alto. La media subperiodo corresponde al valor medio del parámetro analizado en la sección y en el respectivo subperiodo.

**Figura 29**

*Variación temporal de la longitud de semimeandro media por niveles de impacto y secciones de estudio*



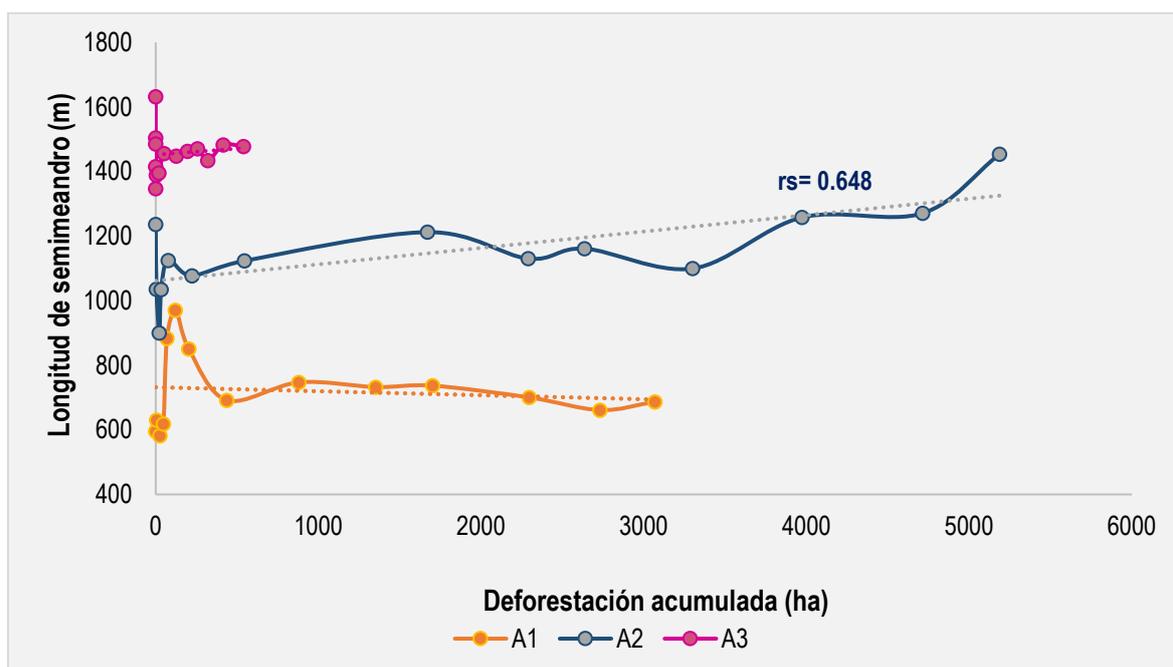
*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas de colores representan los valores medios de longitud de semimeandro en los subperiodos de estudio. El recuadro morado delimitado en la figura muestra el incremento a nivel local del parámetro a medida que el nivel de impacto por la MAPE aumenta.

#### 4.2.2.2 Longitud de semimeandro en función de la deforestación por MAPE

La Figura 30 muestra la variación temporal de la longitud de los semimeandros en función de la deforestación por la MAPE en las tres secciones del río durante el periodo 1984-2020. Solo en la sección A2, que registró el mayor índice de deforestación por la MAPE e incrementos focalizados en la longitud de semimeandros (ver recuadro color morado en la Figura 29) se observó una correlación positiva alta y significativa (Spearman:  $p=0.01$  y  $r_s=0.65$ ). En contraste, las secciones A1 y A3 no presentaron correlación alguna entre las variables (Spearman A1  $p=0.28$  y A2  $p=0.89$ ).

**Figura 30**

*Variación temporal de la longitud de semimeandro del río en función de la deforestación acumulada por la MAPE*



*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El valor  $r_s$  representa el coeficiente de correlación de Spearman entre las dos variables.

### **4.2.2.3 Longitud de semimeandro en función del tipo de MAPE presente**

Las variaciones temporales de la longitud de los semimeandros del río Malinowski no se encontraron haber sido influenciadas significativamente por las operaciones de MAPE en el área de estudio (secciones 4.2.2.1 y 4.2.2.2). Por ello, no fue posible analizar la influencia del tipo de operaciones mineras en este parámetro.

### **4.2.3 Ancho promedio**

#### **4.2.3.1 Ancho promedio por nivel de impacto por MAPE**

El análisis de las medias del ancho promedio del río Malinowski en función del nivel de impacto de la MAPE mostró una tendencia creciente en todas las secciones de estudio (Tabla 10 y Figuras 31 y 32). En la sección A1, el ancho promedio varió entre 122 y 201 m, con el valor más bajo en 1984 y el más alto en 2016. A lo largo de los tres subperiodos, la media aumentó en 1% desde el subperiodo de impacto bajo hasta el medio, y un 23% desde el medio hasta el alto. La sección A2 presentó anchos promedio entre 131 y 207 m, con el valor mínimo en 1984 y el máximo en 2020. La media de los subperiodos aumentó en un 19% desde el subperiodo de impacto bajo al subperiodo de impacto medio, y un 11% entre el subperiodo de impacto medio y alto. Finalmente, la sección A3 presentó un rango de anchos promedio de 164 a 195 m, con el mínimo y máximo registrado en 1984 y 2012, respectivamente. Las medias de los subperiodos aumentaron en un 5% y 2% entre los subperiodos de impacto bajo y medio, y entre el medio y alto. En las tres secciones de estudio, el subperiodo de impacto alto, es decir, donde la deforestación por la MAPE fue más intensa, mostró los valores de ancho promedio más altos (véase Tabla 10 y Figuras 31 y 32). Similar a los parámetros longitud de onda y longitud de semimeandro (secciones 4.2.1 y 4.2.2), la variación del ancho promedio del río durante el subperiodo de impacto alto fue consistente, tanto al analizarse en periodos cortos o más extensos (ver Tabla 10 y líneas rojas punteadas y sólida en la Figura 32).

El análisis estadístico de la influencia de la MAPE en el incremento del ancho promedio del cauce del río Malinowski indicó que la actividad extractiva tuvo una influencia significativa sobre las variaciones temporales de este parámetro en las tres secciones y en los tres subperiodos de estudio (Friedman  $p < 0.05$ ). Esta influencia fue más notable en los tramos del río que presentaron un incremento del ancho promedio más marcado a nivel local (ver recuadro color morado en la Figura 32). El análisis estadístico de la variabilidad del ancho promedio se realizó combinando los datos de las tres secciones de estudio, debido a que todas presentaron una tendencia de aumento a través del tiempo.

**Tabla 10**

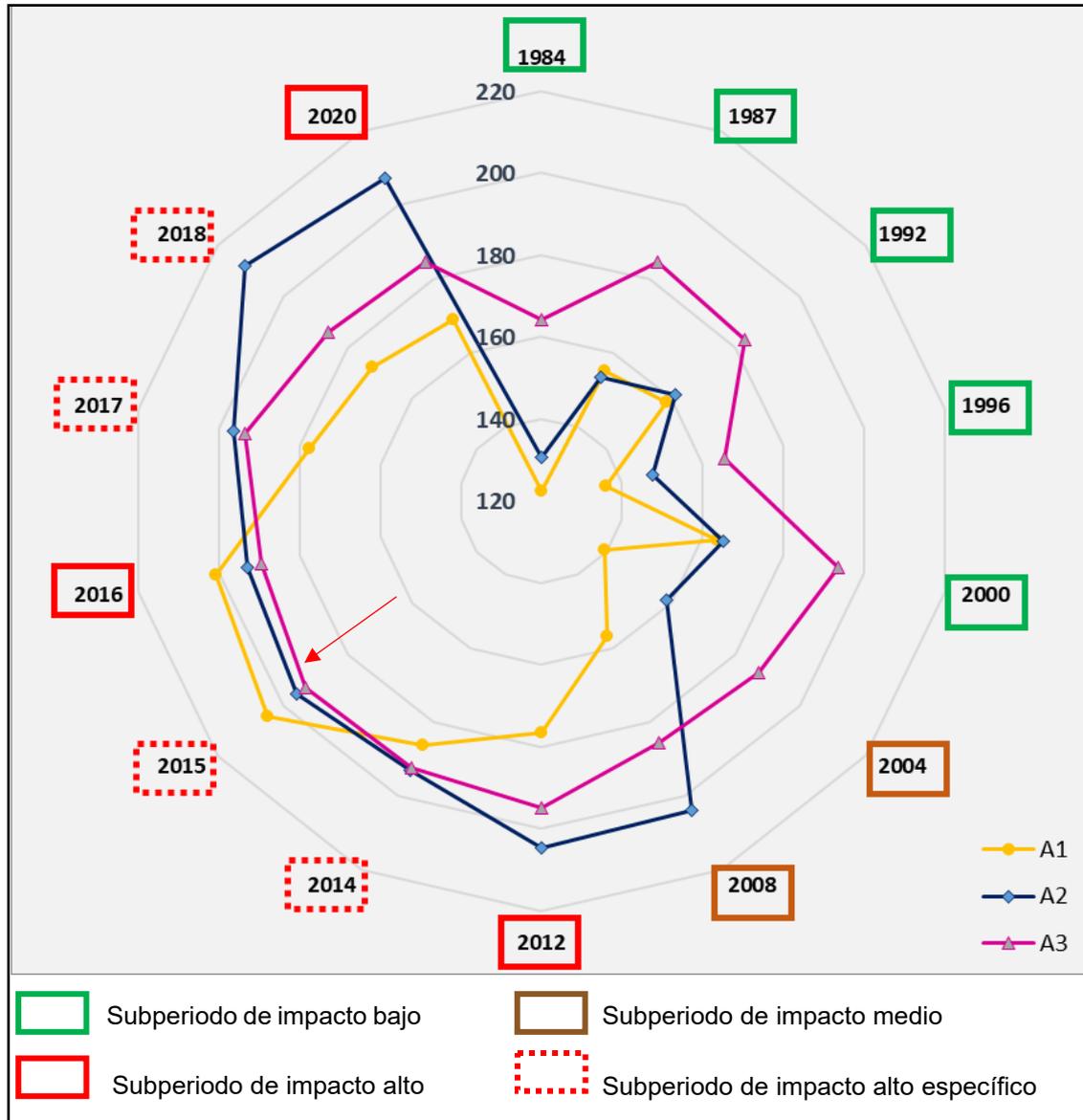
*Media del ancho promedio (m) por sección fluvial y nivel de impacto*

Subperiodo de estudio	Años	Sección A1		Sección A2		Sección A3	
		Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo
Impacto bajo	1984	122.34		130.66		164.26	
	1987	155.08		153.38		184.66	
	1992	158.49	147.12	161.47	151.65	182.86	178.17
	1996	136.14		147.73		165.50	
	2000	163.52		165.03		193.56	
Impacto medio	2004	139.46		158.66		187.33	
	2008	156.58	148.02	203.77	181.22	185.47	186.40
Impacto alto	2012	176.50		204.62		194.94	
	2016	200.86	182.08	192.90	201.59	189.64	189.69
	2020	168.89		207.25		184.49	
	<b>Total</b>	----	<b>157.79</b>		<b>172.55</b>		<b>183.27</b>
Impacto alto específico	2012	176.50		204.62		194.94	
	2014	186.10		193.09		192.16	
	2015	204.64		195.80		192.97	
	2016	200.86	183.83	192.90	200.25	189.64	190.52
	2017	177.44		196.41		193.42	
	2018	172.38		211.69		186.01	
	2020	168.89		207.25		184.49	

*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El impacto específico corresponde a un análisis temporal más corto (1-2 años) durante el subperiodo de impacto alto. La media subperiodo corresponde al valor medio del parámetro analizado en la sección y en el respectivo subperiodo.

**Figura 31**

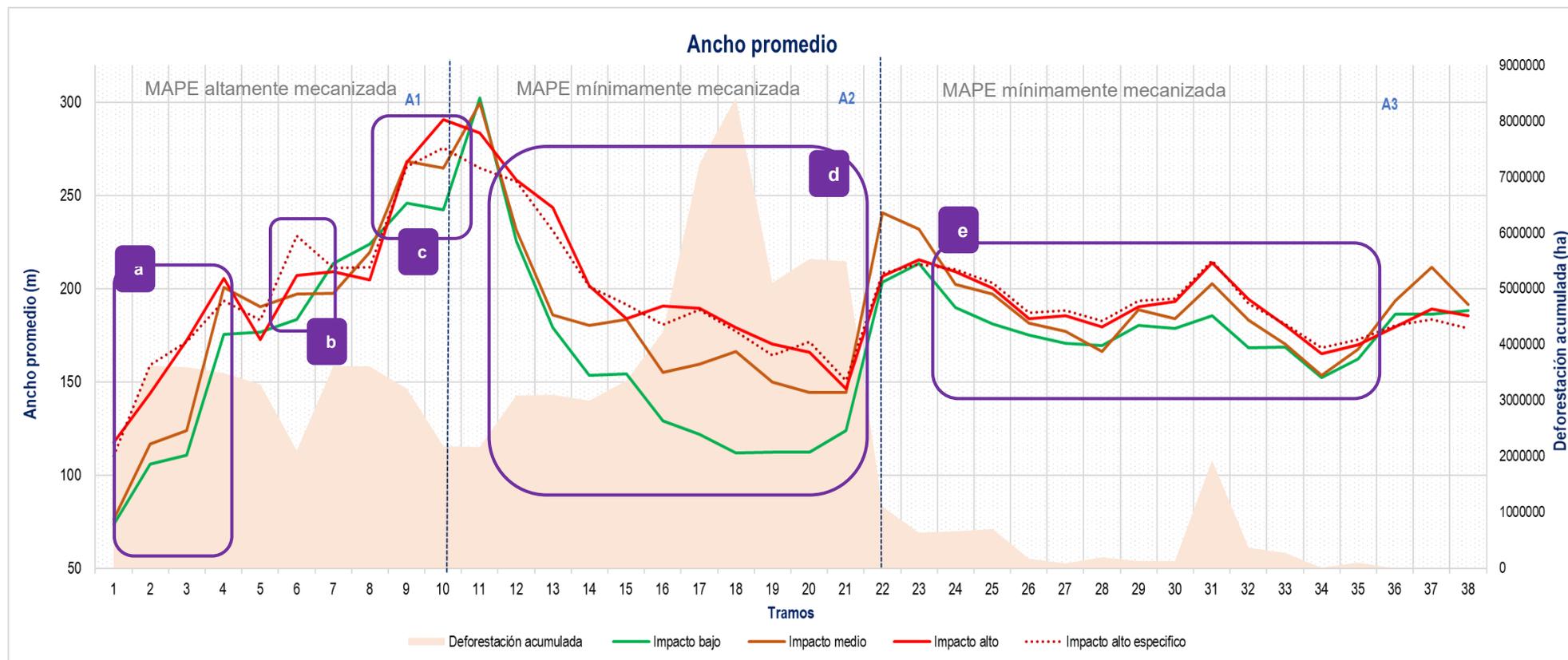
Gráfico radial de la variación temporal del ancho promedio del río (m) en las tres secciones de estudio



Nota: Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El gráfico muestra la variación temporal media anual del ancho del canal en las secciones del río: A1 (líneas amarillas), A2 (líneas azules) y A3 (líneas magenta). Los colores de los recuadros de los años de estudio indican el nivel de impacto por la MAPE al que corresponden.

**Figura 32**

*Variación temporal del ancho promedio por niveles de impacto y secciones de estudio*



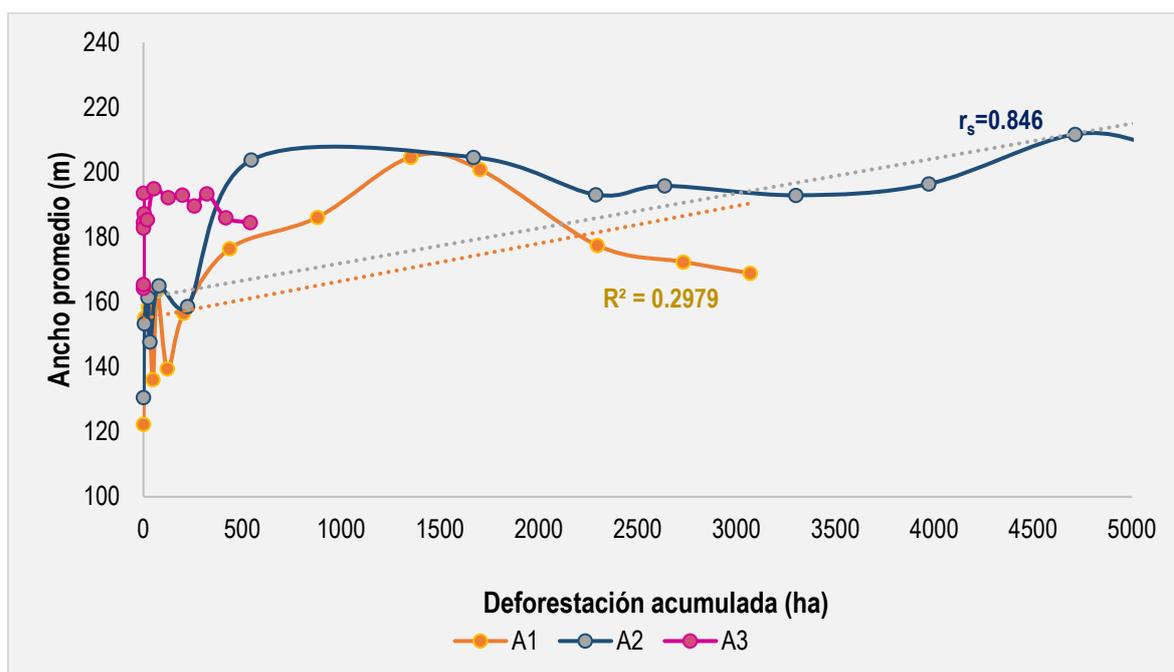
*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas de colores representan los valores medios de ancho promedio en los subperiodos de estudio. Los recuadros morados en la figura muestran los incrementos a nivel local del parámetro a medida que el nivel de impacto por la MAPE aumenta.

#### 4.2.3.2 Ancho promedio en función de la deforestación por la MAPE

La Figura 33 muestra la variación temporal del ancho promedio del canal del río en función de la deforestación acumulada por la MAPE en las secciones de estudio. Se encontró una correlación positiva alta y significativa entre las variaciones del ancho promedio y la deforestación por la MAPE solo en las secciones A1 y A2, que presentaron la mayor área deforestada por MAPE (Spearman:  $p=0.003$  y  $p<0.05$ ;  $r_s=0.736$  y  $0.846$ , respectivamente). El ancho promedio no estuvo correlacionado con la deforestación en la sección A3 (Spearman:  $p=0.23$ ).

**Figura 33**

*Variación temporal del ancho promedio del río en función de la deforestación acumulada por la MAPE*



*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El valor  $r_s$  representa el coeficiente de correlación de Spearman entre las dos variables.

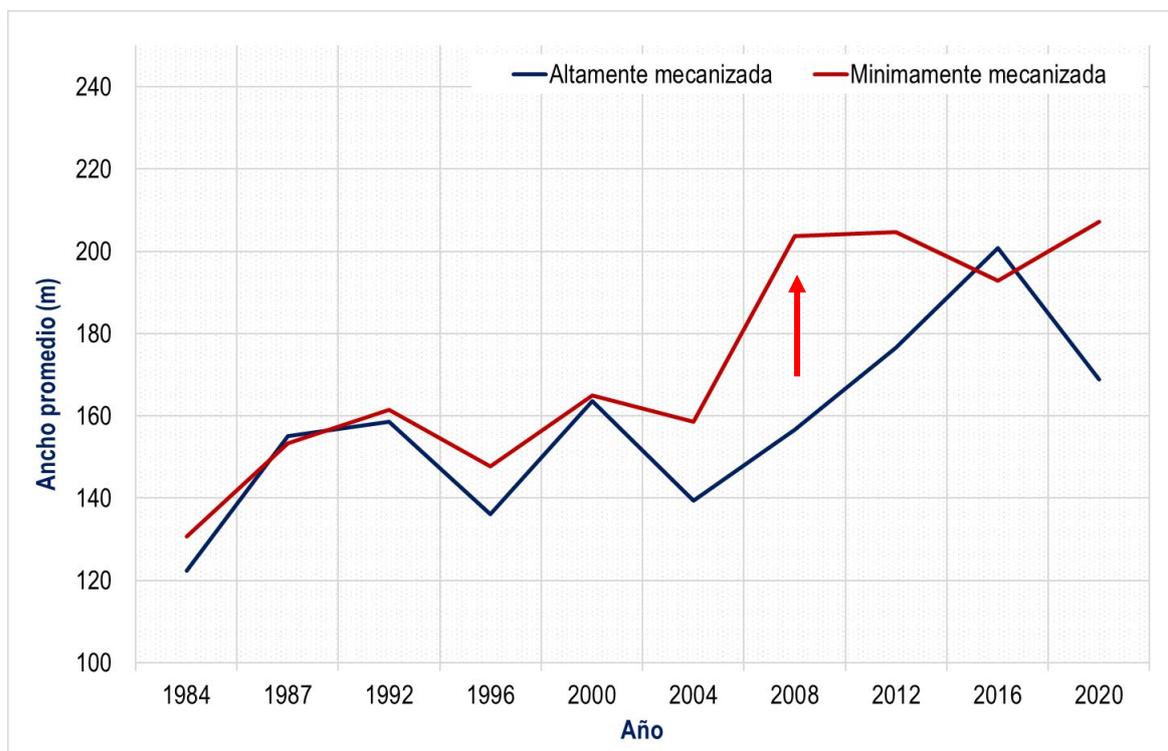
#### **4.2.3.3 Ancho promedio en función del tipo de MAPE presente**

El análisis de la influencia del tipo de MAPE en la variabilidad temporal del ancho promedio se realizó utilizando los datos de las secciones A1 y A2, debido a que estas presentaron un grado de afectación similar en los tres niveles de impacto por MAPE. Los datos de la sección A3 no fueron considerados para este análisis debido a su impacto mínimo directo de la MAPE (bajos valores de deforestación acumulada en la sección).

La media anual del ancho promedio fue equiparable en las secciones con MAPE altamente mecanizada (A1) y mínimamente mecanizada (A2) durante el subperiodo de bajo impacto, es decir, entre el 1984 y 2000 (ver Figura 34). A partir del año 2004, con la intensificación de la MAPE en el área de estudio, los valores del ancho promedio aumentaron notoriamente en ambas secciones. Sin embargo, este aumento fue más pronunciado o acelerado en la sección con MAPE mínimamente mecanizada que en la sección con MAPE altamente mecanizada (curva roja con una pendiente más alta que la curva azul). Incluso, a partir de 2016, los valores del ancho promedio disminuyeron en la sección afectada por la MAPE altamente mecanizada, a diferencia de la sección con MAPE mínimamente mecanizada, donde los valores continuaron en aumento.

**Figura 34**

*Variación promedio anual del ancho promedio según tipo de MAPE*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas azules y rojas representan la variación anual del valor medio del ancho promedio en las secciones con MAPE altamente mecanizada (A1) y mínimamente mecanizada (A2), respectivamente.

#### **4.2.4 Sinuosidad**

##### **4.2.4.1 Sinuosidad por nivel de impacto por MAPE**

El análisis de la sinuosidad en función del nivel de impacto de la MAPE evidenció diferentes tendencias entre las tres secciones de estudio (Tabla 11). La sección A1 presentó valores de sinuosidad del río entre 1.10 y 1.21. En esta sección, la media de la sinuosidad aumentó en 3% desde el subperiodo de impacto bajo al subperiodo de impacto medio. Luego, la media disminuyó en 6% desde el subperiodo de impacto medio al de impacto alto. Por otro lado, la sección A2 presentó un rango de sinuosidades de 1.24 a 1.52, con una tendencia constante de reducción del 11% desde el subperiodo de impacto bajo al alto. La sección A3 presentó sinuosidades entre 1.43 y 1.66, con una tendencia de

variación opuesta a la sección A1, es decir, con un incremento del 8% desde el subperiodo de impacto bajo al de impacto medio, y una reducción de 1% desde el subperiodo de impacto medio al alto (véase Tabla 11 y Figuras 35 y 36).

La Figura 36 muestra que las variaciones más notables de la sinuosidad se observaron en la sección A2, donde se delimitó el recuadro “a” para resaltar la notable reducción de la sinuosidad en casi toda la sección durante el periodo de mayor intensificación de la MAPE (líneas rojas). En contraste, las zonas “b” y “c”, indicadas con los recuadros de color celeste, muestran que una gran parte de la sección A3 presentó un incremento en la sinuosidad.

Al igual que en el análisis de los demás parámetros morfométricos, el análisis a escalas temporales más cortas no reveló diferencias notables en los valores medios de las tres secciones de estudio en comparación con el análisis realizado cada cuatro años (ver Tabla 11 y líneas rojas punteada y sólida en la Figura 36). Esto sugiere que la variación de la sinuosidad del río es consistente, ya sea que se examine en periodos cortos o más extensos.

El análisis estadístico mostró que las variaciones de los valores de sinuosidad promedio durante los tres subperiodos de estudio fueron significativamente diferentes tanto en las secciones con deforestación por la MAPE media/alta (secciones A1 y A2) (Friedman:  $p=0.028$ ) como en la sección con deforestación mínima (sección A3) (Friedman:  $p=0.02$ ).

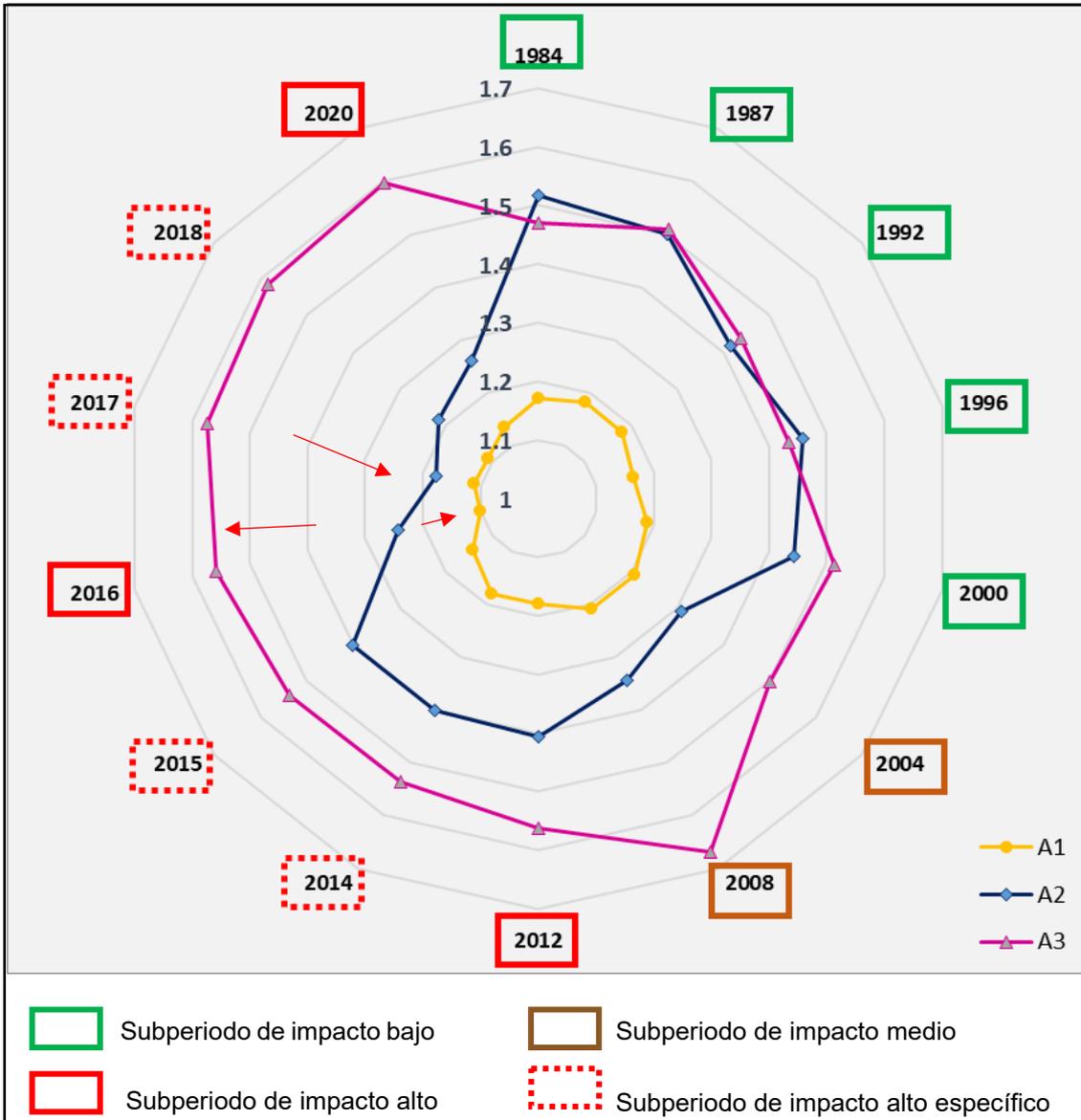
**Tabla 11***Sinuosidad media por sección fluvial y nivel de impacto*

Subperiodo de estudio	Años	Sección A1		Sección A2		Sección A3	
		Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo
Impacto bajo	1984	1.1703		1.5165		1.4706	
	1987	1.1833		1.5009		1.5097	
	1992	1.1811	1.1776	1.4172	1.4672	1.4386	1.4731
	1996	1.1652		1.4576		1.4334	
	2000	1.1881		1.4438		1.5132	
Impacto medio	2004	1.2095	1.2089	1.3089	1.3262	1.4995	1.5839
	2008	1.2083		1.3436		1.6683	
Impacto alto	2012	1.1806		1.4061		1.5632	
	2016	1.0996	1.1382	1.2423	1.3032	1.5580	1.5730
	2020	1.1345		1.2612		1.5979	
<b>Total</b>	----	<b>1.1720</b>		<b>1.3898</b>		<b>1.5252</b>	
Impacto alto específico	2012	1.1806		1.4061		1.5632	
	2014	1.1815		1.4019		1.5374	
	2015	1.1411		1.4007		1.5386	
	2016	1.0996	1.1365	1.2423	1.3004	1.5580	1.5649
	2017	1.1109		1.1764		1.5740	
	2018	1.1076		1.2144		1.5854	
	2020	1.1345		1.2612		1.5979	

*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El impacto específico corresponde a un análisis temporal más corto (1-2 años) durante el subperiodo de impacto alto. La media subperiodo corresponde al valor medio del parámetro analizado en la sección y en el respectivo subperiodo.

**Figura 35**

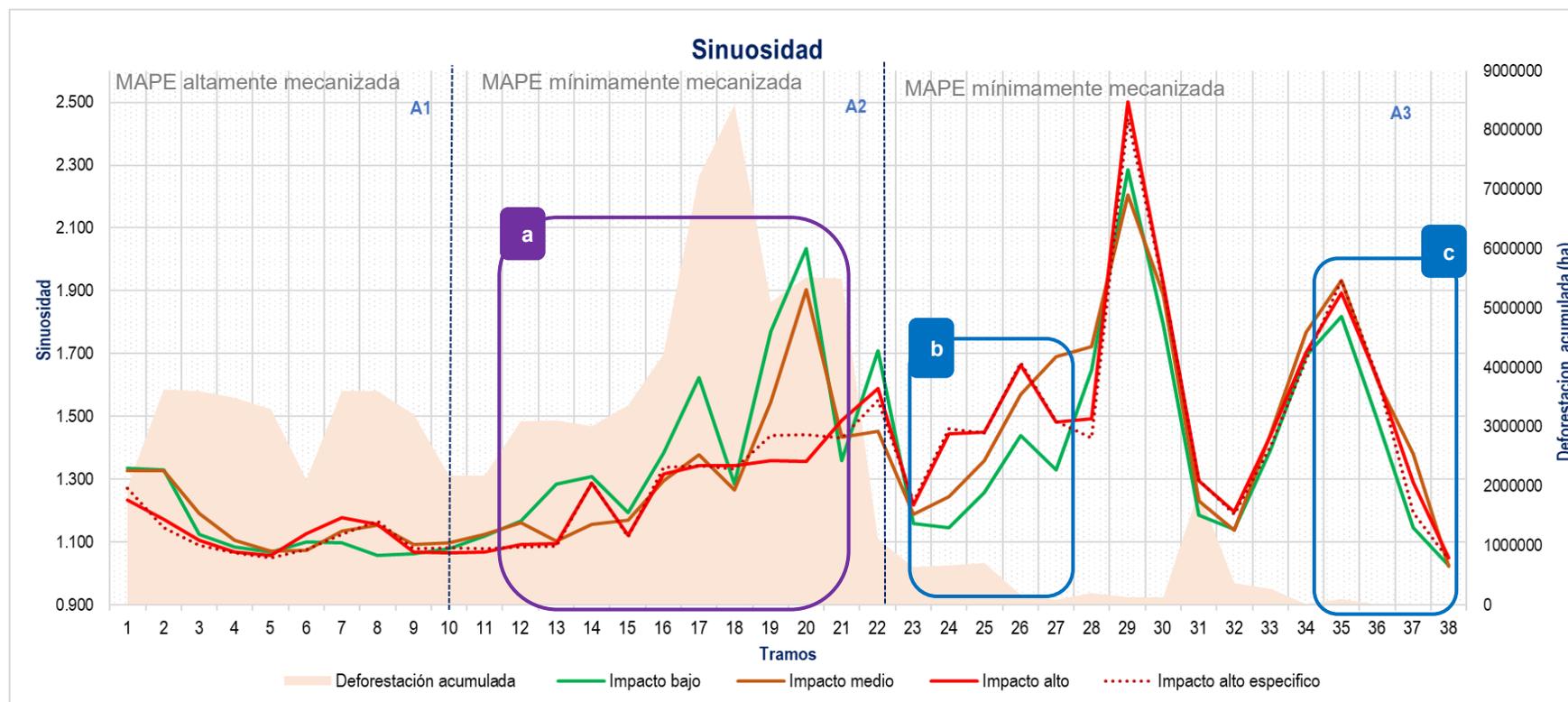
*Gráfico radial de la variación temporal de la sinuosidad en las tres secciones de estudio*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El gráfico muestra la variación temporal del parámetro en las secciones del río: A1 (líneas amarillas), A2 (líneas azules) y A3 (líneas magenta). Los colores de los recuadros de los años de estudio indican el nivel de impacto por la MAPE al que corresponden.

**Figura 36**

*Variación temporal de la sinuosidad por sección y nivel de impacto*



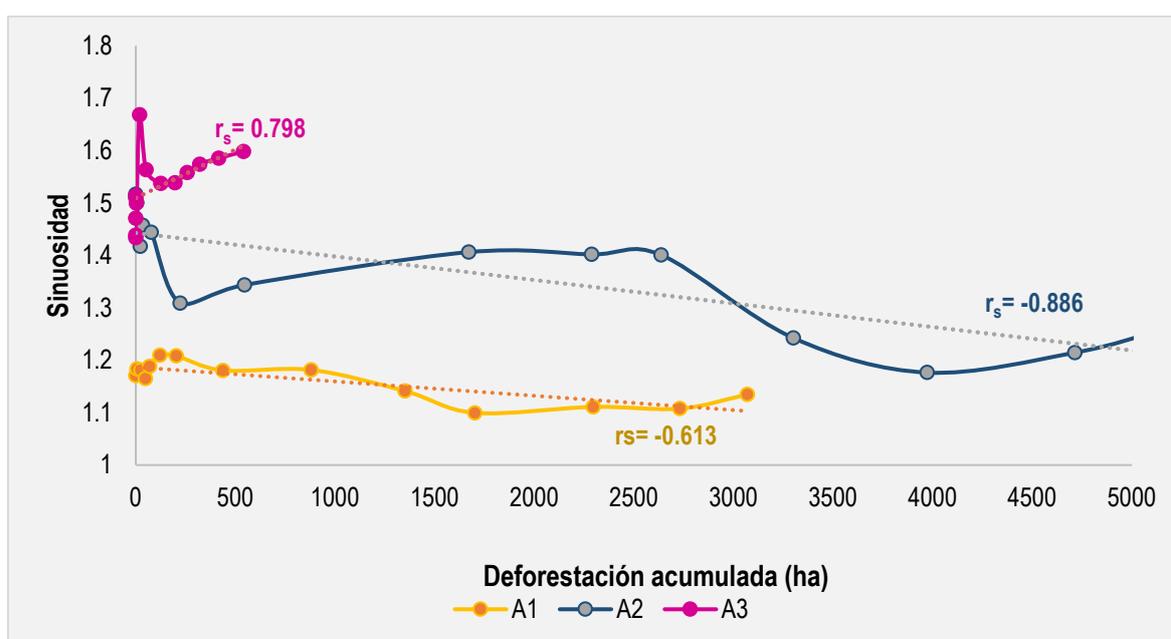
*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas de colores representan los valores medios de sinuosidad en los subperiodos de estudio. Los recuadros celestes en la figura muestran los incrementos a nivel local del parámetro, el recuadro morado representa la reducción de la sinuosidad a nivel local en la sección A2.

#### 4.2.4.2 Sinuosidad en función de la deforestación por MAPE

No se identificó una tendencia general de variación de la sinuosidad en función de la deforestación por la MAPE a lo largo del tramo fluvial de estudio (Figura 37). Las secciones con las mayores áreas deforestadas por minería (secciones A1 y A2) presentaron una correlación negativa entre la sinuosidad y las superficies de deforestación por la MAPE, es decir, una disminución en su sinuosidad a medida que la deforestación por la MAPE aumentó. El análisis estadístico reveló una correlación negativa alta entre la sinuosidad y la deforestación en la sección A1 (Spearman  $p=0.02$ ,  $r_s= -0.613$ ) y una correlación negativa muy alta en la sección A2 (Spearman  $p<0.05$ ,  $r_s= -0.886$ ). En contraste, la sección con la menor área deforestada (sección A3) presentó una correlación positiva alta, es decir, una tendencia al incremento de la sinuosidad promedio a medida que aumenta la deforestación por la MAPE (Spearman:  $p=0.01$ ,  $r_s= 0.798$ ).

**Figura 37**

*Variación temporal del valor medio sinuosidad en función de la deforestación acumulada por la MAPE*



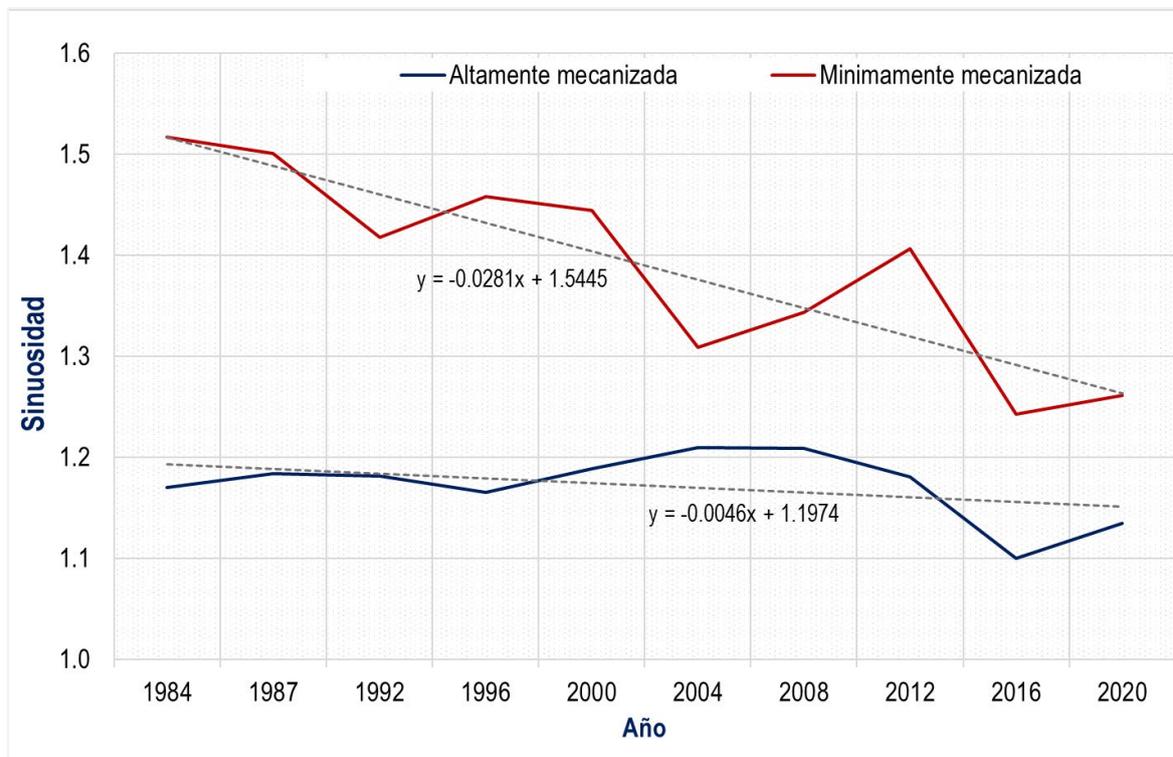
*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El valor  $r_s$  representa el coeficiente de correlación de Spearman entre las dos variables.

#### **4.2.4.3 Sinuosidad por tipo de MAPE presente**

El análisis de la sinuosidad en función del tipo de MAPE presente en el área de estudio se realizó, al igual que en el caso del parámetro ancho promedio (sección 4.2.3.3), únicamente con los datos de las secciones A1 y A2, debido a que estas presentaron un grado de afectación similar en cada nivel de impacto por MAPE. La Figura 38 muestra la variación temporal de la sinuosidad en las secciones A1 (MAPE altamente mecanizada) y A2 (MAPE mínimamente mecanizada). En ambas secciones, la media anual de la sinuosidad disminuyó a través del tiempo. Sin embargo, la media de la sinuosidad se redujo más pronunciadamente en la sección A2 que en la A1 en el periodo de mayor intensificación de la MAPE (2012-2020) (ver Figuras 35 y 36). Estos resultados sugieren que el tipo de MAPE presente en el área de estudio sí influyó en la variación temporal de la sinuosidad del río, y que la MAPE mínimamente mecanizada redujo más drásticamente la sinuosidad fluvial.

**Figura 38**

*Variación promedio anual de la sinuosidad según tipo de MAPE*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas azules y rojas representan la variación anual del valor medio de la sinuosidad en las secciones con MAPE altamente mecanizada (A1) y mínimamente mecanizada (A2), respectivamente.

### **4.3 Análisis de parámetros morfodinámicos**

A continuación, se presentan los resultados del análisis multitemporal de los tres parámetros morfodinámicos de estudio: erosión, migración y deposición, en función del nivel de impacto, la deforestación y el tipo de minería en el valle geológico del río Malinowski.

#### **4.3.1 Erosión**

##### **4.3.1.1 Erosión por nivel de impacto de la MAPE**

El análisis temporal de la erosión según el nivel de impacto de la MAPE en el área de estudio reveló que las tendencias de variación de este parámetro no fueron bien

definidas en las tres secciones de estudio, es decir, no presentaron tendencias de crecimiento o decrecimiento en todo el periodo de estudio (Tabla 12).

En la sección A1, las tasas de erosión variaron entre 2.48 y 6.88 ha/año, con una reducción del 21% desde el subperiodo de impacto bajo al medio, seguido de un incremento del 35% hacia el subperiodo de impacto alto. En la sección A2, la erosión osciló entre 3.93 y 7.76 ha/año, con una tendencia de aumento del 22% del subperiodo de impacto bajo al medio y una reducción del 4% hacia el subperiodo de impacto alto. Finalmente, la sección A3 presentó valores de erosión entre 1.51 y 4.58 ha/año, con una variación similar a la de la sección A1, es decir, con una reducción del 17% hasta el subperiodo de impacto medio y un incremento del 34% hacia el impacto alto.

El análisis a escalas temporales más cortas reveló una tasa media de erosión significativamente más alta en comparación con el análisis en periodos de cuatro años. La Figura 39 muestra que los valores de este parámetro fueron considerablemente mayores en el análisis a corto plazo (líneas rojas punteadas versus sólida), sugiriendo una mayor influencia de la MAPE en periodos más inmediatos (uno o dos años) con respecto a los periodos de análisis más amplios (cuatro años).

No se encontró una influencia significativa de los niveles de impacto de la MAPE en la variabilidad de la erosión (Friedman  $p=0.125$ ). Esto sugiere que, si bien se observaron incrementos en las tasas de erosión en la sección A2 para los diferentes niveles de impacto (ver recuadros a, b, c y d en la Figura 39), la influencia de estos niveles de impacto no fue estadísticamente significativa, y que las variaciones en la erosión podrían haber sido influenciadas por otros factores ajenos a la actividad extractiva.

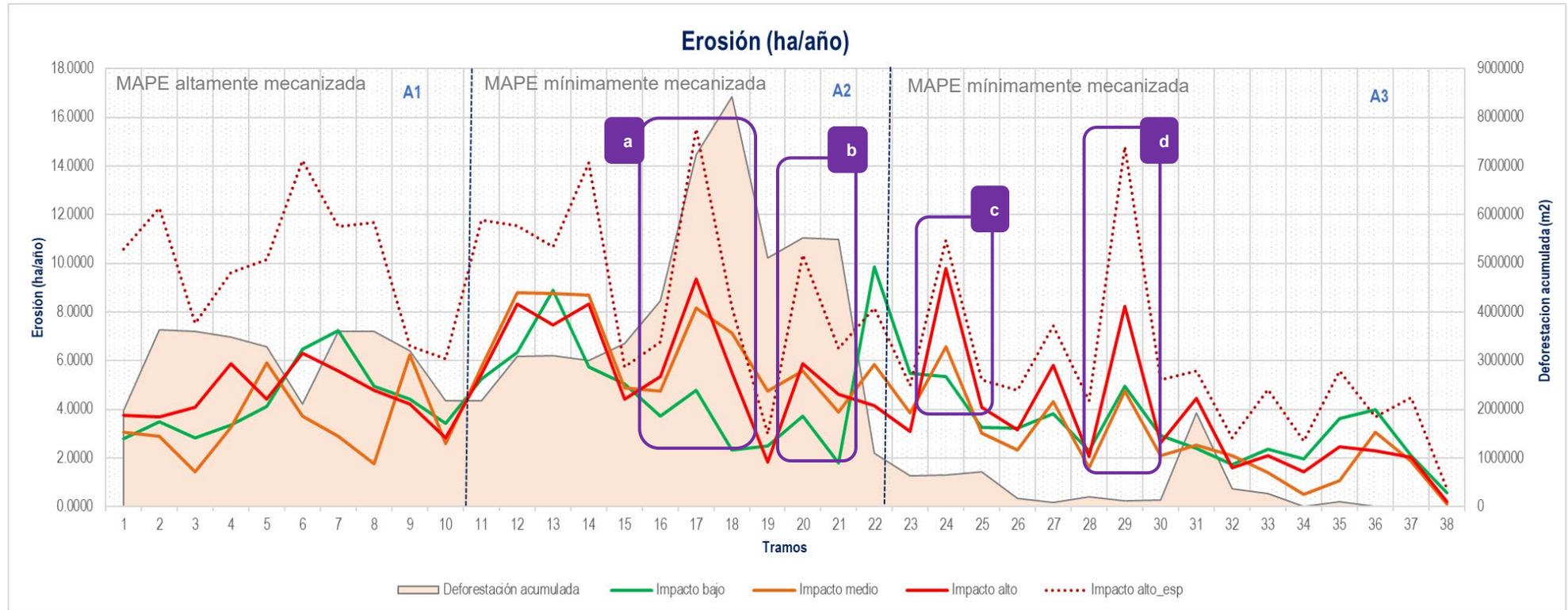
**Tabla 12***Tasas de erosión (ha/año) media por sección y nivel de impacto*

Subperiodo de estudio	Año	Sección A1		Sección A2		Sección A3	
		Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo
Impacto bajo	1984-1987	6.88		6.83		4.58	
	1987-1992	3.25	4.30	4.09	5.00	2.33	3.12
	1992-1996	2.48		3.93		1.51	
	1996-2000	4.58		5.16		4.08	
Impacto medio	2000-2004	3.88	3.38	4.49	6.12	2.89	2.58
	2004-2008	2.87		7.76		2.27	
Impacto alto	2008-2012	3.55		5.31		3.99	
	2012-2016	5.61	4.56	6.14	5.89	3.37	3.47
	2016- 2020	4.51		6.23		3.05	
<b>Total</b>	----	4.19		5.55		3.12	
Impacto alto específico	2008-2012	3.55		5.31		3.99	
	2012-2014	10.07		8.03		4.38	
	2014-2015	12.59		8.10		6.24	
	2015-2016	11.44	10.03	11.06	9.04	7.62	10.03
	2016-2017	17.09		12.57		6.77	
	2017-2018	9.54		8.91		5.28	
	2018- 2020	5.91		9.27		4.28	

*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El impacto específico corresponde a un análisis temporal más corto (1-2 años) durante el subperiodo de impacto alto. La media subperiodo corresponde al valor medio del parámetro analizado en la sección y en el respectivo subperiodo.

**Figura 39**

*Variación temporal de la erosión por secciones y nivel de impacto*



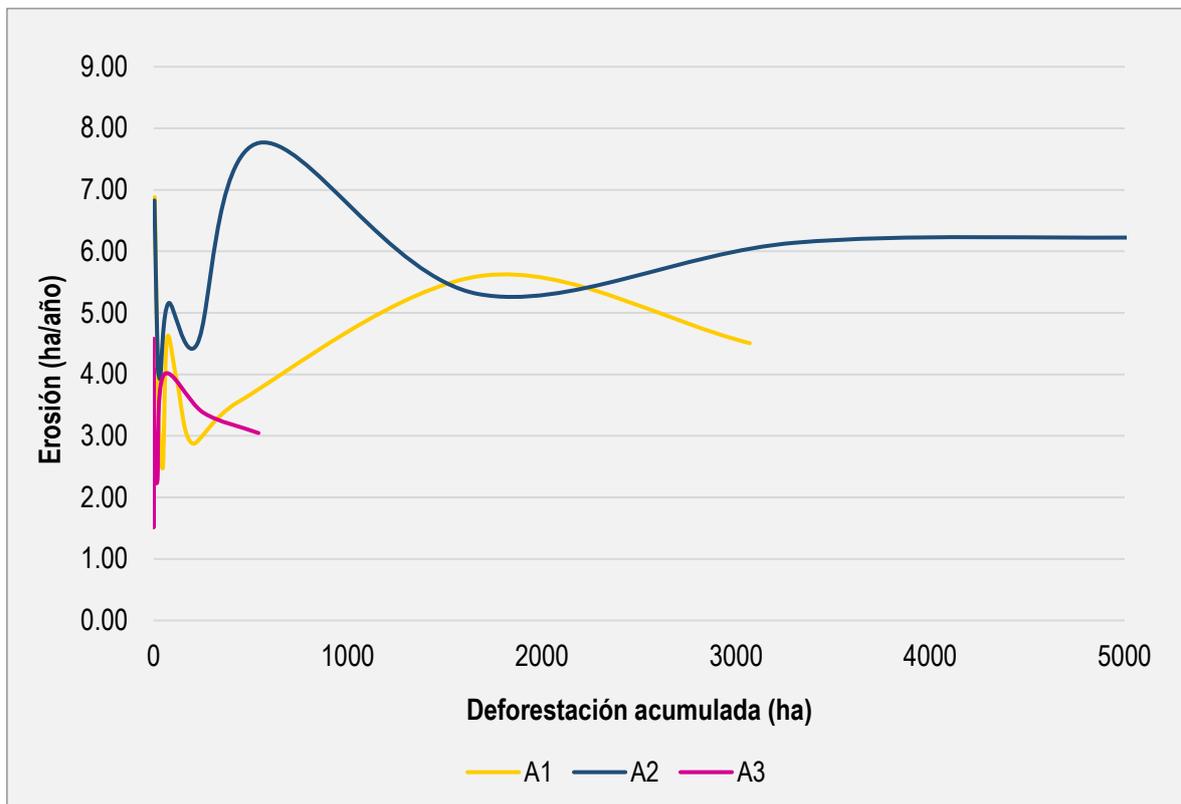
*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas de colores representan los valores medios de erosión en los subperiodos de estudio. Los recuadros morados delimitados en la figura muestran los incrementos a nivel local del parámetro a medida que el nivel de impacto por la MAPE aumenta.

#### 4.3.1.2 Erosión en función de la deforestación por MAPE

La Figura 40 muestra la variabilidad de la erosión media del río Malinowski en relación a la deforestación por la MAPE en las tres secciones fluviales de estudio. El análisis de correlación de Spearman reveló que la variabilidad de las tasas medias de erosión no estuvo correlacionada con la deforestación acumulada en las secciones del río: A1 (Spearman  $p=0.865$ ), A2 (Spearman  $p=0.356$ ) y A3 (Spearman  $p=0.947$ ).

**Figura 40**

*Variación temporal del valor medio de la erosión en función de la deforestación acumulada por la MAPE*



*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia.

### **4.3.1.3 Erosión en función del tipo de MAPE presente**

No se analizó la influencia del tipo de MAPE en las variaciones temporales de la erosión del río, debido a que la presencia de esta actividad no tuvo un impacto significativo en las variaciones de este parámetro (secciones 4.3.1.1 y 4.3.1.2).

### **4.3.2 Deposición**

#### **4.3.2.1 Deposición en función del nivel de impacto por MAPE**

Las tasas de deposición media del río Malinowski aumentaron en función del nivel de impacto de la MAPE en todo el tramo fluvial estudiado (Tabla 13). En los subperiodos de impacto bajo (1984-2000), impacto medio (2001-2009) e impacto alto (2010-2020) las tasas medias fueron 3.19, 3.43 y 4.92 ha/año, respectivamente. En las secciones A1, A2 y A3, la deposición varió entre 2 y 6 ha/año, 2 y 8 ha/año y 1 y 4 ha/año, respectivamente, con tendencias de aumento del 48%, 61% y 52% desde el subperiodo de impacto bajo al de impacto alto. Adicionalmente, la Figura 41 muestra un gran porcentaje de los 38 tramos del río presentaron una clara tendencia de incremento en función del nivel de impacto por MAPE. Las tasas de deposición más altas se observaron en los periodos de mayor intensificación de la deforestación por la MAPE (2012-2016 y 2016-2020) en todas las secciones (véase Tabla 13).

El análisis a escalas temporales más cortas reveló una tasa de deposición media significativamente más alta (9 ha/año) en comparación con el análisis en periodos de cuatro años (5 ha/año). La Figura 41 muestra que las tasas de deposición fueron más altas en el análisis en periodos más cortos (líneas rojas punteadas), sugiriendo una mayor influencia de la MAPE durante los periodos más inmediatos.

El análisis estadístico de las variaciones de la deposición por nivel de impacto reveló que las variaciones de la deposición durante los subperiodos de impacto bajo,

impacto medio e impacto alto fueron significativamente diferentes (Friedman  $p < 0.05$ ). Este resultado sugiere que el nivel de impacto por la MAPE tuvo una influencia significativa sobre la variación temporal del parámetro deposición.

**Tabla 13**

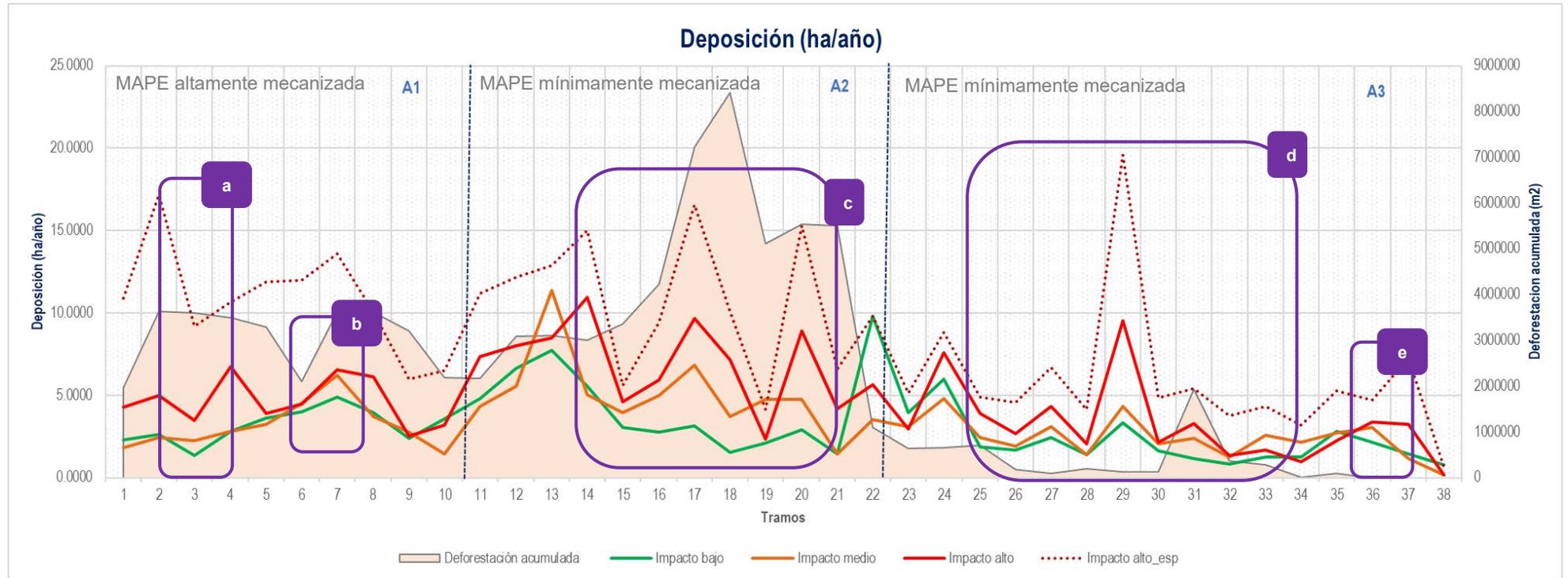
*Deposición (ha/año) media por sección y nivel de impacto*

Subperiodo de estudio	Año	Sección A1		Sección A2		Sección A3	
		Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo
Impacto bajo	1984-1987	2.08		3.24		1.99	
	1987-1992	4.26	3.15	4.41	4.30	2.57	2.13
	1992-1996	4.28		5.45		2.96	
	1996-2000	1.98		4.08		1.01	
Impacto medio	2000-2004	3.58	3.13	7.19	4.75	2.64	2.41
	2004-2008	2.67		2.31		2.18	
Impacto alto	2008-2012	3.07		4.03		2.20	
	2012-2016	4.80	4.62	7.62	6.93	3.18	3.23
	2016- 2020	6.00		9.14		4.30	
<b>Total</b>	----	<b>3.63</b>		<b>5.27</b>		<b>2.56</b>	
Impacto alto específico	2008-2012	3.07		4.03		2.20	
	2012-2014	6.23		8.00		3.96	
	2014-2015	14.60		10.35		6.35	
	2015-2016	13.85	10.79	14.79	10.96	7.55	5.83
	2016-2017	15.59		21.91		8.99	
	2017-2018	16.31		8.40		7.45	
	2018- 2020	5.91		9.27		4.28	

*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El impacto específico corresponde a un análisis temporal más corto (1-2 años) durante el subperiodo de impacto alto. La media subperiodo corresponde al valor medio del parámetro analizado en la sección y en el respectivo subperiodo.

**Figura 41**

*Variación de la deposición por secciones y nivel de impacto*



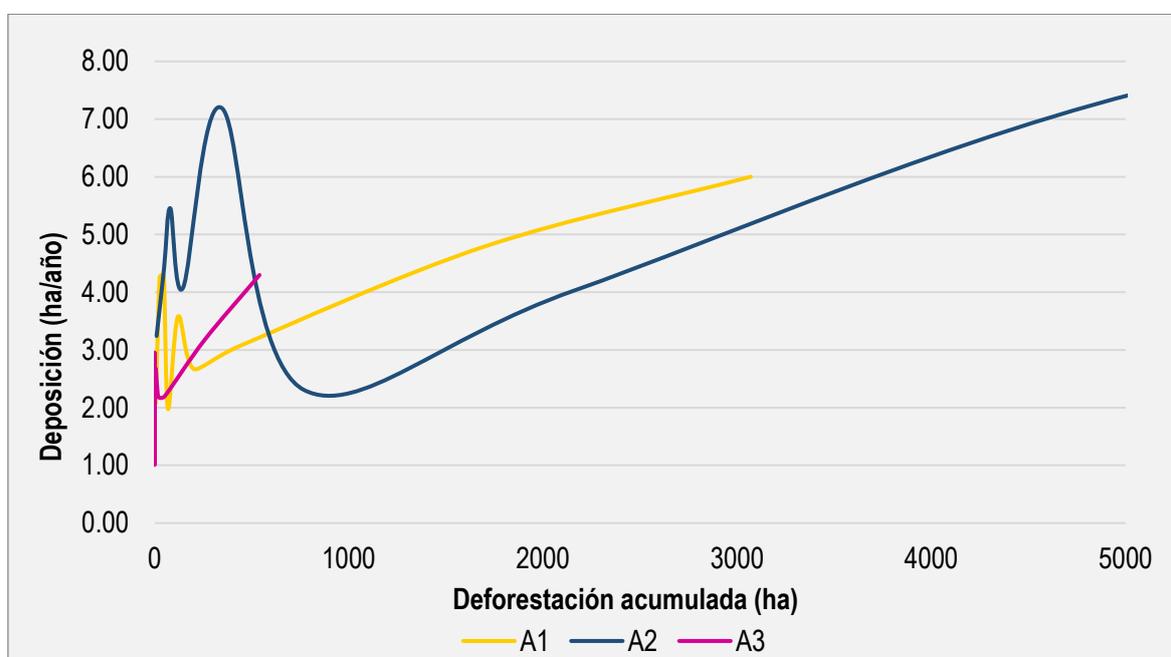
*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas de colores representan los valores medios de deposición en los subperiodos de estudio. Los recuadros morados delimitados en la figura muestran los incrementos a nivel local del parámetro a medida que el nivel de impacto por la MAPE aumenta.

#### 4.3.2.2 Deposición en función de la deforestación por MAPE

El análisis de correlación de Spearman, reveló que las variaciones temporales de la deposición no estuvieron significativamente correlacionadas con la deforestación acumulada en las secciones del río: A1 (Spearman  $p=0.17$ ), A2 (Spearman  $p=0.21$ ) y A3 (Spearman  $p=0.09$ ). Sin embargo, en la Figura 42 se observa que, aunque no existe una relación lineal entre la deposición y la deforestación por la MAPE, en todas las secciones se observaron incrementos notables en los valores de deposición cuando la deforestación por la MAPE estaba ausente o era mínima. Asimismo, la Figura 43 evidencia que las medias de la deposición aumentaron a medida que las áreas de deforestación acumulada se incrementaron en tramos del río donde inicialmente la deposición no era tan alta (tramos 1, 2, 4, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 20, 22, 24, 25, 27 y 29).

**Figura 42**

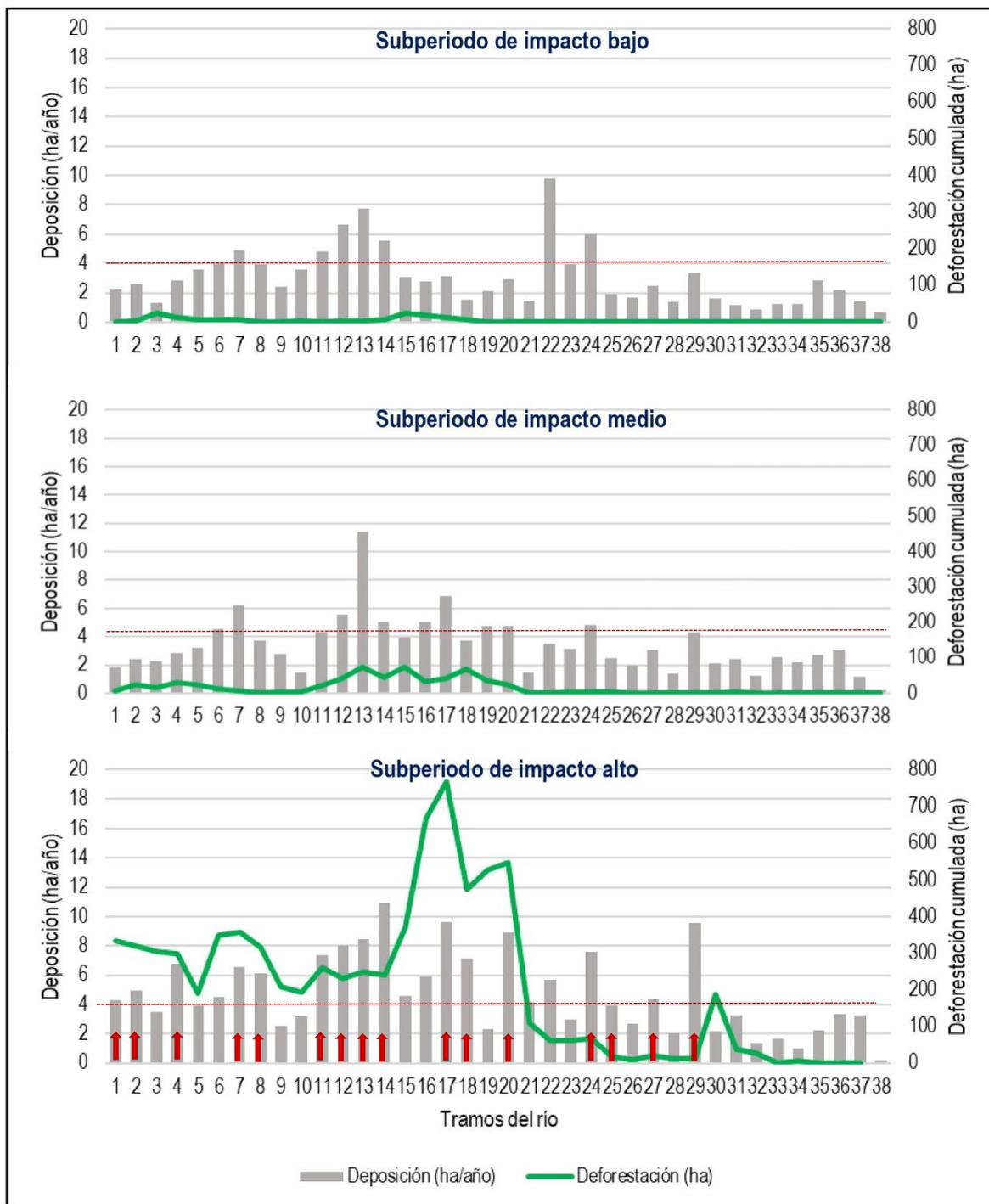
*Variación temporal del valor medio de la deposición en función de la deforestación acumulada por la MAPE*



*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia.

**Figura 43**

*Erosión media en los diferentes superperiodos de impacto por la MAPE*



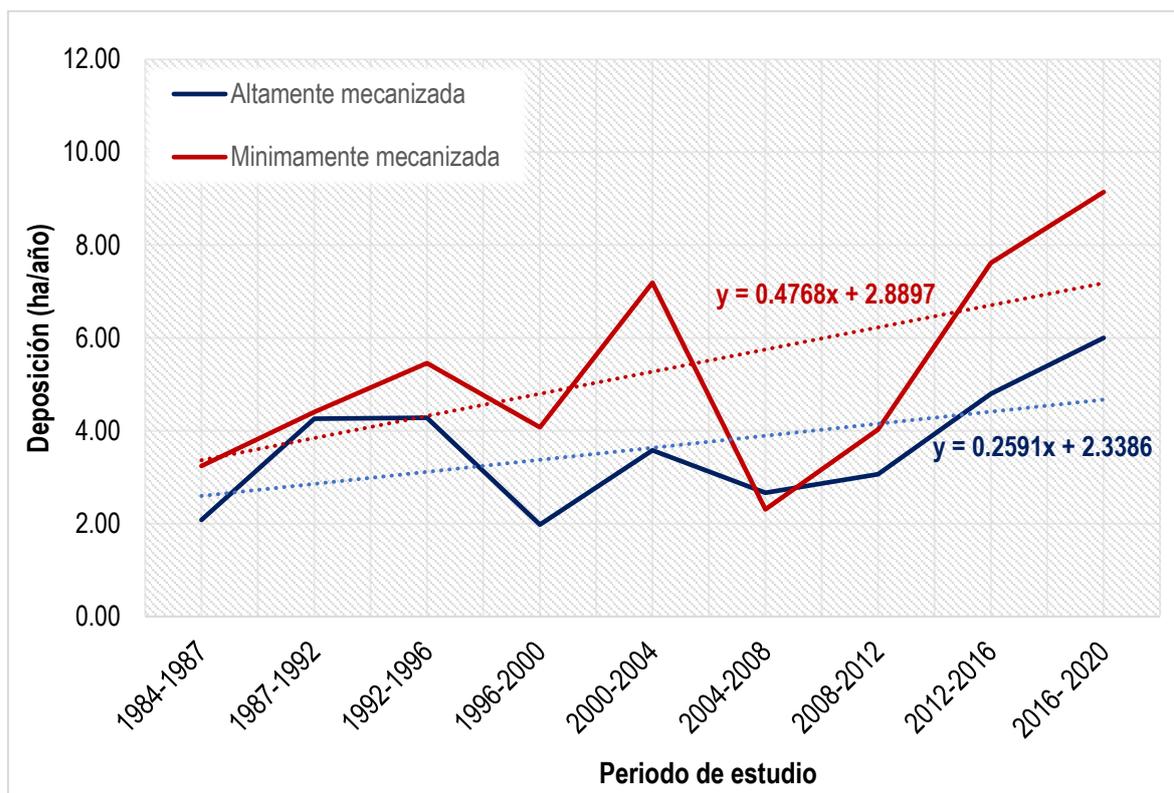
*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. La línea roja punteada es una línea guía establecida en un valor de deposición igual a 4 ha/año, para ayudar al lector a notar el incremento de la deposición en función de la deforestación por la MAPE (tramos indicados con flechas rojas).

### 4.3.2.3 Deposición por tipo de MAPE presente

El análisis de la deposición en función del tipo de MAPE en el área de estudio utilizó los datos de las secciones A1 (MAPE altamente mecanizada) y A2 (MAPE mínimamente mecanizada). La Figura 44 muestra la variabilidad de la deposición a lo largo del periodo de estudio en estas secciones. Ambas secciones presentaron un incremento en la deposición a través del tiempo, aunque la sección A2 presentó un incremento más pronunciado en comparación con la A1. Estos resultados sugieren que el tipo de MAPE sí influyó en la variación de la dinámica deposicional del río Malinowski durante el periodo 1984-2020.

**Figura 44**

*Variación en la deposición del río por tipo de MAPE*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas azules y rojas representan la variación temporal del valor medio de la deposición en las secciones con MAPE altamente mecanizada (A1) y mínimamente mecanizada (A2), respectivamente.

### **4.3.3 Migración**

#### **4.3.3.1 Migración por nivel de impacto por MAPE**

La variación de la migración en función del nivel de impacto por la MAPE presentó diferentes tendencias entre las secciones fluviales de estudio durante el periodo 1984-2020 (Tabla 14). En la sección A1, las tasas de migración variaron entre 10 y 22 m/año, con una reducción del 14% desde el subperiodo de impacto bajo al medio, seguido de un incremento del 30% hacia el alto. Por otro lado, la sección A2 presentó tasas de migración entre 13 y 21 m/año, con un incremento del 18% desde el impacto bajo al alto. Finalmente, en la sección A3, las tasas de migración variaron entre 7 y 14 m/año, con una reducción del 24% desde el impacto bajo al medio, seguido de un incremento del 22% hacia el alto. En las tres secciones, los periodos de mayor intensificación de la deforestación por la MAPE (2012-2016 y 2016-2020) registraron las mayores tasas de migración (véase Tabla 14).

Similar a los parámetros erosión y deposición, el análisis de la tasa de migración media a escalas temporales de 1-2 años durante el subperiodo de impacto alto dio como resultado un valor de la tasa de erosión significativamente más alto en comparación con el análisis cada cuatro años (31 vs 14 m/año) (ver Tabla 14 y líneas rojas punteadas versus línea roja sólida en la Figura 45). La Figura 45 también muestra que algunos tramos del río presentaron un marcado incremento en función del nivel de impacto por la MAPE (línea roja sólida con valores más altos que líneas marrón y verde en recuadros de color morado). En contraste, otros tramos del río mostraron una reducción de su migración (línea roja sólida con valores más bajos que líneas marrón y verde en recuadro de color celeste). En estos tramos, la deforestación también fue mínima o nula (ver área de color crema).

El análisis estadístico de la significancia del nivel de impacto de la MAPE en la migración reveló que las variaciones temporales de la migración fueron significativamente

diferentes (Friedman:  $p=0.009$ ) en los tres subperiodos de impacto. Esto confirma que el nivel de impacto por la MAPE tuvo una influencia significativa sobre la variación temporal de la migración del río Malinowski en el periodo 1984-2020.

**Tabla 14**

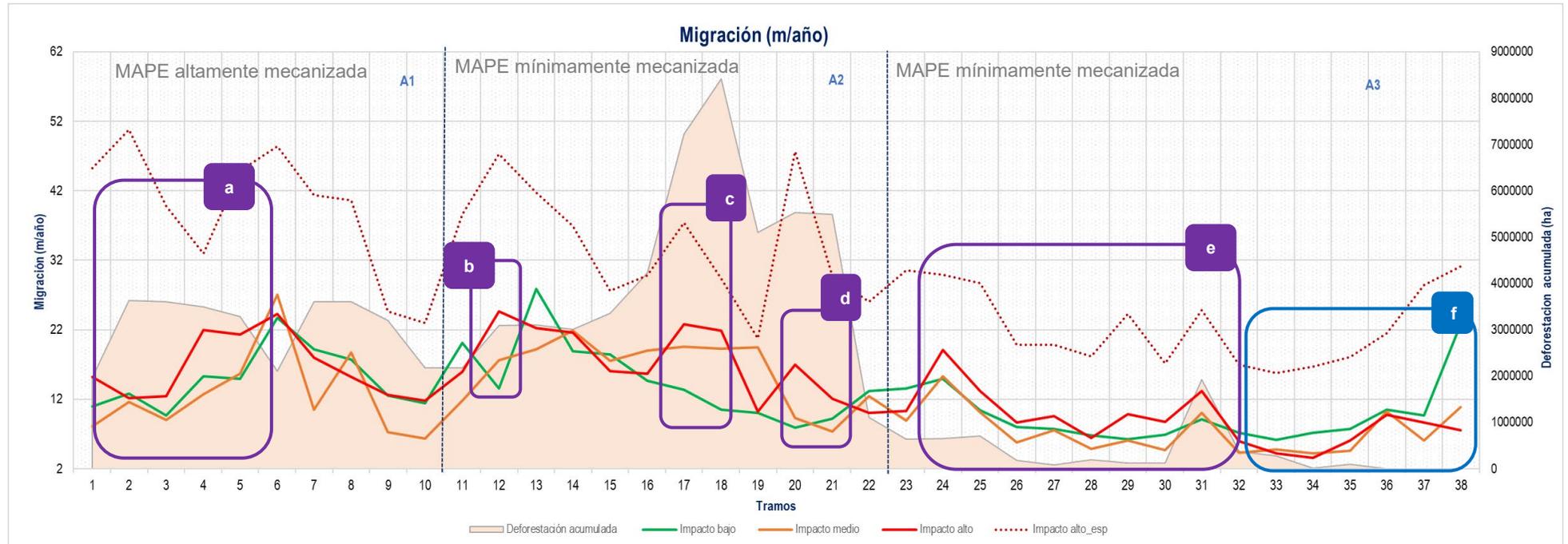
*Tasas de migración media (m/año) por sección y nivel de impacto*

Subperiodo de estudio	Años	Sección A1		Sección A2		Sección A3	
		Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo	Media anual	Media subperiodo
Impacto bajo	1984-1987	21.60		18.58		13.57	
	1987-1992	14.14	14.82	13.46	14.81	8.68	9.69
	1992-1996	13.43		14.66		7.88	
	1996-2000	10.10		12.54		8.61	
Impacto medio	2000-2004	15.01	12.72	16.70	15.45	7.90	7.40
	2004-2008	10.42		14.20		6.90	
Impacto alto	2008-2012	14.44		12.96		7.55	
	2012-2016	16.58	16.50	20.50	17.50	9.77	9.06
	2016- 2020	18.48		19.05		9.85	
<b>Total</b>	----	<b>14.91</b>		<b>15.85</b>		<b>8.97</b>	
Impacto alto específico	2008-2012	14.44		12.96		7.55	
	2012-2014	28.88		31.69		17.82	
	2014-2015	51.22		38.49		25.11	
	2015-2016	48.96	39.17	47.49	32.06	34.32	22.60
	2016-2017	58.95		45.98		30.60	
	2017-2018	50.26		27.79		28.72	
	2018- 2020	21.45		20.02		14.11	

*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. El impacto específico corresponde a un análisis temporal más corto (1-2 años) durante el subperiodo de impacto alto. La media subperiodo corresponde al valor medio del parámetro analizado en la sección y en el respectivo subperiodo.

**Figura 45**

*Variación temporal de la migración por secciones y nivel de impacto*



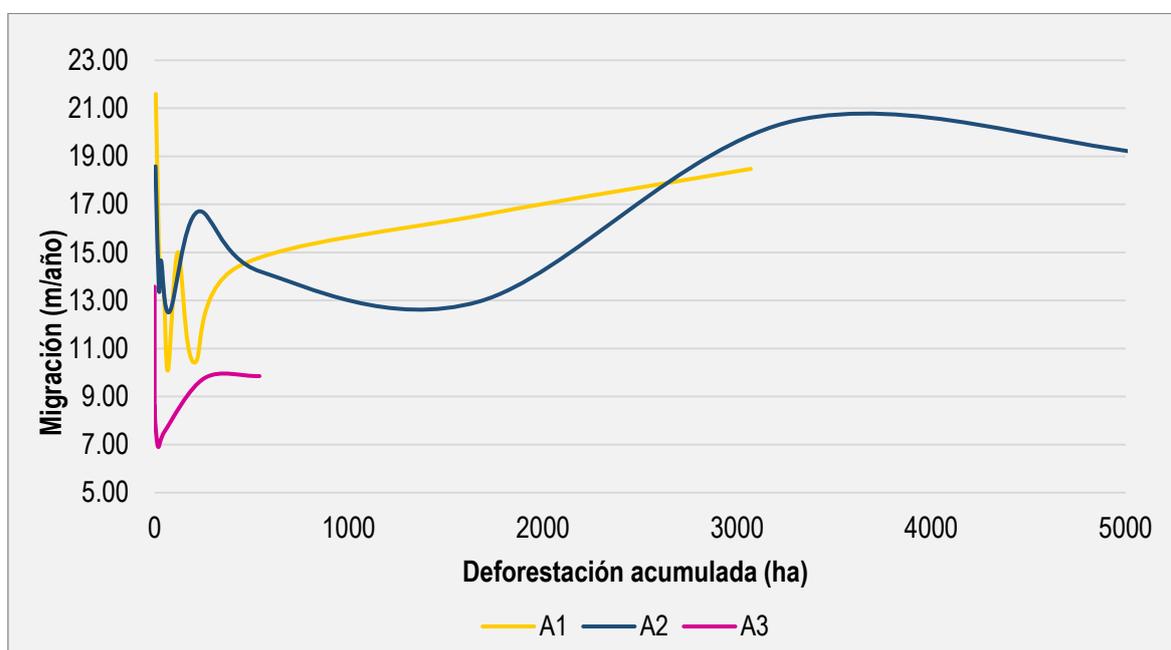
*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas de colores representan los valores medios de migración en los subperiodos de estudio. Los recuadros morados delimitados en la figura muestran los incrementos a nivel local del parámetro a medida que el nivel de impacto por la MAPE aumenta, mientras que el recuadro celeste muestra la reducción de la migración en función del nivel de impacto por la MAPE.

#### 4.3.3.2 Migración en función de la deforestación por MAPE

El análisis de la correlación de Spearman reveló que la variación temporal de la migración no estuvo correlacionada con la deforestación acumulada en ninguna de las secciones del río (Spearman  $p=0.668$ ,  $0.406$  y  $0.982$  en secciones A1, A2 y A3, respectivamente). Sin embargo, las tres secciones presentaron un incremento en este parámetro en comparación a los valores registrados cuando las áreas de deforestación por la MAPE eran bajas o ausentes (Figura 46). Asimismo, a nivel espacial, se registró un incremento de la migración en tramos del río donde inicialmente no se observaban valores de migración tan altos (tramos 1, 3, 4, 5, 12, 14, 17, 18, 20, 21, 24, 31 en Figura 47).

**Figura 46**

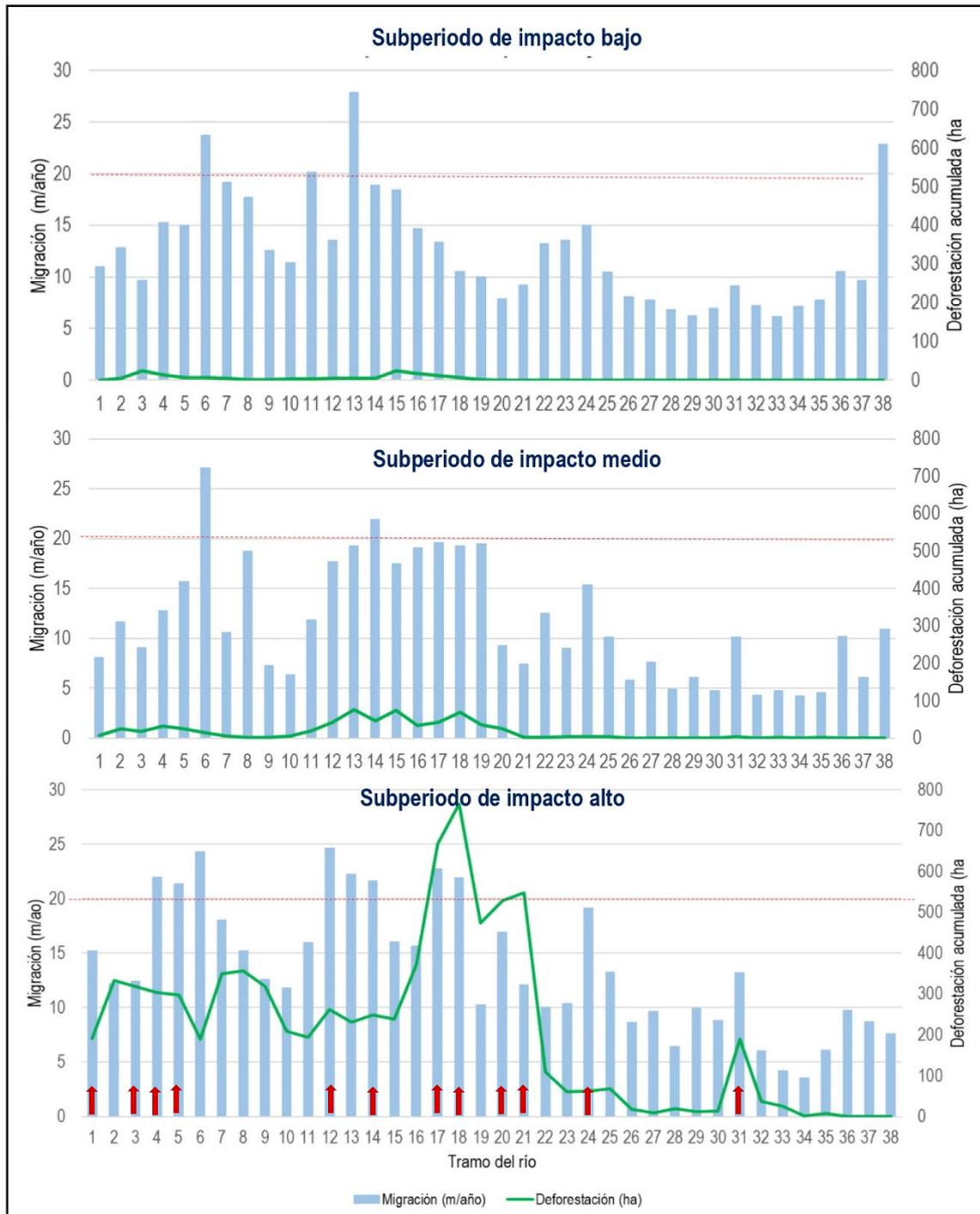
*Variación temporal del valor medio de la migración en función de la deforestación acumulada por la MAPE*



*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia.

**Figura 47**

*Migración media en los diferentes superperiodos de impacto por la MAPE*



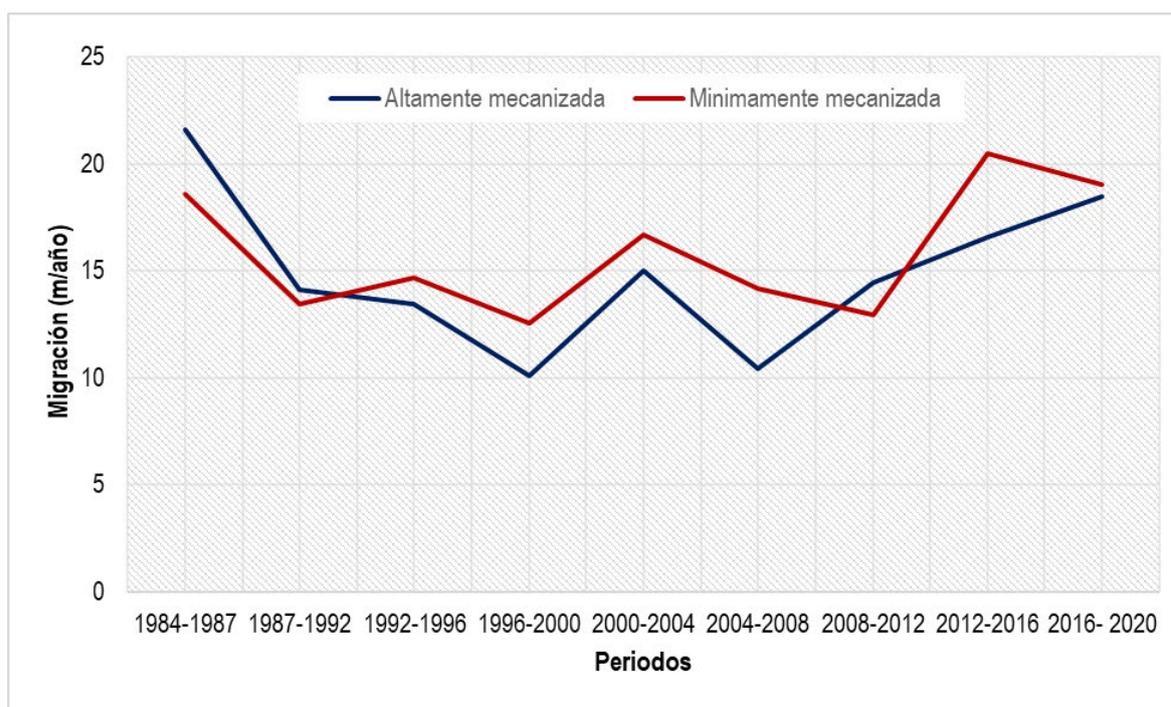
*Nota:* Fuente: Caballero et al. (2018), procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. La línea roja punteada es una línea guía establecida en un valor de migración igual a 15 m/año, para ayudar al lector a notar el incremento de la migración en función de la deforestación por la MAPE (tramos indicados con flechas rojas).

### 4.3.3.3 Migración en función del tipo de MAPE presente

Similar al análisis de la deposición, y debido a la presencia mínima de la MAPE en la sección fluvial A3, el análisis de la influencia del tipo de MAPE en la variabilidad de las tasas de migración consideró únicamente los datos de las secciones A1 (MAPE altamente mecanizada) y A2 (MAPE mínimamente mecanizada). No se encontró diferencias visiblemente notables de la variación de la migración en la sección con MAPE mínimamente y altamente mecanizada (Figura 48), lo que sugiere que el tipo de MAPE no presentó influencia sobre la variación de la migración del río Malinowski.

**Figura 48**

*Variación de la migración por tipo de MAPE*



*Nota:* Fuente: Procesamiento en los programas QGIS 3.22.16 y Excel. Elaboración propia. Las líneas azules y rojas representan la variación temporal del valor medio de la migración en las secciones con MAPE altamente mecanizada (A1) y mínimamente mecanizada (A2), respectivamente.

#### **4.4 Síntesis y discusión de resultados del análisis los parámetros morfológicos**

El análisis de siete parámetros morfológicos: cuatro parámetros morfométricos (longitud de onda de semimeandro, longitud de semimeandro, ancho promedio y sinuosidad) y tres morfodinámicos (erosión, deposición y migración), a lo largo de un tramo de aproximadamente 160 kilómetros del río Malinowski reveló que su variación temporal durante el periodo 1984-2020 estuvo influenciada por la presencia de MAPE en el área de estudio. Tanto los diferentes niveles de impacto, la deforestación como el tipo de MAPE, según la maquinaria utilizada, afectaron la evolución natural de estos parámetros de estudio a nivel espacial y temporal, aunque de manera variable en cada caso.

##### ***Parámetros morfológicos por niveles de impacto de la MAPE***

Los diferentes niveles de impacto (bajo, medio y alto) (ver sección 3.3.1.2 y Tabla 3) de la MAPE influenciaron significativamente ( $p < 0.05$ ) las variaciones en la deposición, el ancho promedio, la migración y la sinuosidad del río. Los tres primeros parámetros presentaron un incremento en las secciones fluviales de estudio cuando la deforestación por la MAPE se intensificó en el valle geológico. En el caso de la sinuosidad, esta se redujo en las secciones alta y media del río, con presencia e impacto directo de la MAPE, y aumentó en la sección baja del río, con bajo impacto de la MAPE. Por otro lado, los parámetros longitud de onda, longitud de semimeandro y erosión no presentaron una influencia temporal significativa de la MAPE, aunque en algunas áreas del tramo fluvial de estudio se observó una tendencia inversa entre las variaciones de la longitud de onda y longitud de semimeandro en relación con la sinuosidad.

Los resultados señalados en el párrafo precedente podrían explicarse debido al aumento de la carga de sedimentos en el río, generado por las actividades mineras durante el proceso de dragado y deforestación, lo que a su vez aumenta la escorrentía y la erosión del suelo (Fiango, 2021; Brack et al., 2011; Dethier et al., 2019; Paiva et al., 2020). Al

superar la carga de sedimentos la capacidad de transporte del río, se generan cambios morfológicos adaptativos (Popović et al., 2021) generando variaciones de los parámetros morfológicos que influyen significativamente en la MAPE (ancho promedio, sinuosidad, deposición, migración). Al-Mamari et al. (2023) y Hou et al. (2023) también reportan que los sistemas fluviales con altas concentraciones de sedimentos pero que carecen de un caudal suficiente para transportarlos sufren un importante incremento de la deposición de sedimentos, aumentando el riesgo de inundaciones y afectando negativamente la integridad ecológica de dichos sistemas fluviales.

Los resultados del análisis de la sinuosidad y el ancho promedio concuerdan con los de Alvarado et al. (2023), quienes reportaron que el incremento de la carga de sedimentos en el río Sinú, debido a la instalación de una represa, afectó la morfología en la zona alta del río, generando un incremento del ancho promedio del cauce y una reducción de su sinuosidad. En el río Malinowski, esta reducción de sinuosidad en las secciones del río con mayor presencia de MAPE estuvo acompañada de un aumento en las longitudes de onda y semimeandro en algunos tramos del río. Esto coincide con el estudio de Morais et al. (2016), quienes observaron una reducción en la sinuosidad y un aumento en la longitud de onda de los meandros en el río Peixe, Brasil, como respuesta a la construcción de embalses y cambios en el uso del suelo en el valle geológico del río. Esto sugiere que los ríos adaptan su morfología a las intervenciones humanas que se llevan a cabo en su entorno. El incremento de la migración del río Malinowski debido a la presencia de operaciones mineras es un comportamiento esperado, ya que los ríos con altas cargas de sedimentos tienden a experimentar tasas de migración más altas que aquellos con cargas más bajas. Esto se debe a que un suministro abundante de sedimentos modula la migración del río y la formación de su llanura aluvial (Constantine et al., 2014; Quintana Cobo, 2015).

Los hallazgos de este estudio no coinciden completamente con los de Estrada et al. (2023a), quienes investigaron los efectos de la MAPE en la morfología del río Madre de Dios. Mientras que este estudio encontró que la variabilidad temporal de tanto el ancho promedio como la sinuosidad del río Malinowski fue afectada por la actividad minera, Estrada et al. (2023a) concluyeron que los cambios en los parámetros morfométricos del río Madre de Dios fueron primariamente afectados por fenómenos naturales o antropogénicos ajenos a la minería. Asimismo, aunque ambos ríos presentaron los valores más altos de sus tasas de deposición durante los años de mayor intensificación de la MAPE, la tasa del río Malinowski aumentó durante dicho periodo, mientras que en el río Madre de Dios se observó una disminución en dicha tasa.

La diferencia en los hallazgos de este estudio y el de Estrada et al. (2023) probablemente se debe a las diferencias inherentes entre el río Malinowski y el Madre de Dios, así como a las características de sus cuencas, lo que dificulta su comparación directa. Si bien ambos ríos son meándricos, cada uno es un sistema complejo, dinámico y único, con diferencias significativas en su hidrología, geología, el entorno y actividades humanas circundantes (Ollero, 2008; Hernández, 2018; Zinger, 2016). Por ejemplo, el río Madre de Dios es notablemente más grande y posee un ancho promedio aproximadamente dos veces mayor que el río Malinowski, lo que podría influir en la forma en la que responden a los cambios del entorno. Esto demuestra la necesidad de realizar estudios adicionales que profundicen en la comprensión de los efectos de la MAPE en los parámetros morfológicos de los ríos en la región de Madre de Dios.

### ***Parámetros morfológicos en función de las áreas de deforestación por MAPE***

El análisis espacial y temporal de las variaciones de los parámetros morfológicos con respecto a la extensión de las áreas de deforestación confirmó una correlación diferenciada entre algunos de los parámetros de estudio y la extensión de las áreas deforestadas por la MAPE durante el periodo de análisis. Se encontró una alta correlación

entre las variaciones del ancho promedio del canal del río y el aumento de la deforestación en las secciones fluviales con mayores índices de deforestación por MAPE. En estas mismas secciones, se observó una disminución en la sinuosidad con el aumento de la deforestación, mientras que en aquellas es con menor deforestación, la sinuosidad aumentó. Las variaciones de la deposición, migración y erosión no mostraron correlación con la deforestación acumulada a lo largo del tramo fluvial de estudio. Sin embargo, la deposición y la migración presentaron valores más altos a nivel localizado durante los periodos de deforestación mínima o inexistente. Por otro lado, la alta correlación positiva entre las variaciones de los parámetros longitud de onda y la longitud de semimeandro con una alta deforestación por la MAPE en la sección media del río, podría deberse a los incrementos localizados de ambos parámetros en tramos específicos de esa sección fluvial. Estos resultados indican que, aunque las variaciones de algunos parámetros no presentaron diferencias significativas entre de los tres niveles de impacto por minería analizados, en los tramos del río con extensas superficies de deforestación por la MAPE se produjeron cambios morfológicos localizados que no se reflejaron en el promedio por secciones y niveles de impacto. Esto resalta la importancia de examinar la correlación entre las variaciones de los parámetros de estudio y las áreas de deforestación por la MAPE, siendo esta la estrategia más adecuada para investigar la influencia de esta actividad en la morfología fluvial en tramos localizados.

### ***Parámetros morfológicos por tipo de MAPE***

Esta investigación también reveló que el tipo de MAPE, según la maquinaria utilizada durante el proceso de extracción del oro, ejerció una influencia en la dinámica morfológica natural del río Malinowski durante los años de estudio. Los tramos del río donde predominó la MAPE mínimamente mecanizada presentaron cambios más pronunciados en comparación con aquellos con MAPE altamente mecanizada o de maquinaria pesada. Estas diferencias podrían explicarse debido a que la MAPE mínimamente mecanizada

implica el uso de dragas, que son embarcaciones utilizadas para excavar material (depósito de oro) del lecho del río, y elevar el material extraído hasta la superficie (Brack et al., 2011). Por otro lado, la MAPE realizada con maquinaria pesada, como excavadoras y cargadores frontales, si bien genera un mayor impacto ambiental, que incluye deforestación del bosque y degradación del suelo, no opera directamente en el lecho del río, sino en las riberas de los ríos, llanuras y terrazas fluviales (Brack et al., 2011). Este segundo tipo de minería canaliza el agua de los cuerpos de agua hacia el lugar de la operación minera para utilizarla en el proceso extractivo. Esto demuestra que el tipo de tecnología o maquinaria utilizada en la MAPE es una variable necesaria a tomar en consideración al investigar el impacto de esta actividad extractiva en la morfología fluvial.

### ***Implicancias ambientales y próximos pasos***

El aumento en la carga de sedimentos, como en el caso del río Malinowski (Dethier et al., 2019), no solo altera la morfología fluvial, sino que también desencadena una serie de consecuencias que afectan la biodiversidad acuática y la calidad del agua. Por ejemplo, puede disminuir la riqueza de los peces debido a la alteración de sus procesos de desove, migración y alimentación (Timana et al., 2023; Mol & Ouboter, 2004), contaminar el ecosistema con el mercurio utilizado en el proceso de extracción del oro, el cual se transporta principalmente adherido a los sedimentos suspendidos (Estrada et al., 2023b), y podría resultar en una mayor exposición de la fauna local a este contaminante (García et al., 2023). Además, el cambio en la dinámica fluvial aumenta el riesgo de inundaciones, amenazando las comunidades humanas ribereñas y los ecosistemas asociados. En este contexto, es crucial mejorar la gestión de los ríos e impulsar la formalización de la actividad minera en Madre de Dios. Esto implica garantizar que la extracción del oro se realice de manera responsable y sostenible, restringiendo las operaciones a áreas específicas dentro del corredor minero. Además, es fundamental implementar prácticas que incorporen

medidas de manejo ambiental para prevenir, mitigar o corregir los impactos negativos en los sistemas fluviales de la región en todas las etapas del proceso de extracción del oro.

Esta investigación resalta la necesidad de realizar más estudios cuantitativos que aborden el impacto de la MAPE en la morfología los ríos de Madre de Dios. Además de analizar los parámetros morfológicos del río y la extensión de la actividad minera, estos estudios deben incorporar otras variables como, eventos meteorológicos extremos, características geológicas del área de estudio, influencia de ríos tributarios y pendiente del valle. Esta información complementaria es necesaria para comprender mejor los fenómenos que controlan los cambios morfológicos de los ríos y las subsecuentes implicancias ambientales.

Asimismo, se resalta la necesidad de complementar los análisis de sensoramiento remoto con datos de campo para validar y lograr una comprensión más profunda y precisa sobre la dinámica de los ríos amazónicos. Para ello, resulta fundamental que se implementen sistemas de monitoreo continuo de los niveles de agua, caudales y carga de sedimentos en ríos afectados por MAPE, tanto aguas arriba como aguas abajo de las operaciones mineras. Finalmente, se resalta la necesidad de complementar el catálogo de imágenes satelitales *Landsat* con otros catálogos de mayor resolución espacial, como *Sentinel* o *Planet*, que permitan estudiar con mayor detalle los cambios morfológicos generados por la actividad minera aluvial en los ríos.

## Conclusiones

- Esta investigación representa el primer estudio cuantitativo de las características morfométricas y morfodinámicas del río Malinowski. Es también el segundo en la región de Madre de Dios en estudiar cuantitativamente los impactos de la MAPE en la morfología de ríos.
- Este estudio confirma que la morfología del río Malinowski fue afectada por los niveles de impacto (deforestación) de la MAPE durante el periodo 1984-2020. Sin embargo, la magnitud de esta influencia varió entre los diferentes parámetros morfológicos de estudio, tanto espacial como temporalmente. Se observó una influencia significativa en el ancho promedio, la sinuosidad, la deposición y la migración, mientras que no se encontró una influencia directa en la longitud de onda de semimeandro, la longitud de semimeandro y la tasa de erosión.
- El incremento de las áreas de deforestación por la MAPE en el valle del río Malinowski estuvo directamente correlacionado con el aumento del ancho promedio e inversamente correlacionado con la sinuosidad. Estos cambios reflejan una adaptación del río frente a la mayor carga de sedimentos, generada por las actividades mineras, y que excede su capacidad de transporte.
- Se demostró la influencia del método extractivo o del tipo de maquinaria utilizada para la extracción del oro en los cambios morfológicos del río, siendo el método que utiliza bombas de succión, es decir, MAPE mínimamente mecanizada, el que generó los cambios más pronunciados y definidos en el río.
- La identificación de cambios morfológicos en la sección baja del río, aguas abajo de la actividad minera, confirma que los impactos de esta actividad extractiva se

extienden más allá de la zona donde se desarrolla la misma. Por tanto, al analizar el impacto de la actividad minera en los ríos, es importante incluir secciones del río que no estén directamente afectadas por la actividad.

## Recomendaciones

- Se requieren más estudios cuantitativos que aborden el impacto de la MAPE en la morfología de los ríos en la región Madre de Dios. Futuros estudios deben ser exhaustivos e incorporar otras variables que podrían influir en los cambios morfológicos, como eventos meteorológicos extremos, las características geológicas del área de estudio, presencia de ríos tributarios, pendiente del valle, los caudales, la cuantificación del aporte de sedimentos y cambios altimétricos del río a través de mediciones de campo, que describan cómo varía la elevación del lecho del río a lo largo de su longitud. Asimismo, se resalta la importancia de la implementación de una estación de monitoreo que permita documentar los niveles de agua, caudales y sedimentos aguas arriba y aguas abajo de tramos de ríos con presencia significativa de deforestación por la MAPE, en un periodo más prolongado que una campaña de recopilación de datos de campo.
- Es necesario complementar el catálogo de imágenes satelitales *Landsat* con otros catálogos de mayor resolución espacial, como *Sentinel* o *Planet*, que permitan estudiar con mayor detalle los cambios planimétricos del río generados por la actividad minera.

## Referencias bibliográficas

Al-Mamari, M. M., Kantoush, S. A., Al-Harrasi, T. M., Al-Maktoumi, A., Abdrabo, K. I., Saber, M., & Sumi, T. (2023). Assessment of sediment yield and deposition in a dry reservoir using field observations, RUSLE and remote sensing: Wadi Assarin, Oman. *Journal of Hydrology*, 617, 128982. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128982>

Alvarado, D. C., Vargas-Luna, A., & Giraldo-Osorio, J. D. (2023). Upstream and Downstream Changes in the Channel Width and Sinuosity Due to Dam Construction in Tropical Rivers: The Case of Colombia. *Applied Sciences*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/app13127109>

Andina Noticias. (2011, junio 3). *Declaran al lobo de río especie representativa de Madre de Dios*. <https://andina.pe/agencia/noticia-declaran-al-lobo-rio-especie-representativa-madre-dios-361846.aspx>

Aparicio Alcázar, L. M. (2015). El mercurio en la cuenca del Tambopata. Repercusiones en la salud humana y del ecosistema. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1164>

Arana, M., & Montoya, P. (2017). *Reporte de Inventario: Estimaciones de referencia del uso y consumo de mercurio en la minería de oro artesanal y de pequeña escala en Perú*. *Artisanal Gold Council*. <https://docplayer.es/205734502-Reporte-de-inventario.html>

Arnaud, F., Piégay, H., Schmitt, L., Rollet, A. J., Ferrier, V., & Béal, D. (2015). Historical geomorphic analysis (1932–2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam

(France, Germany). *Geomorphology*, 236, 163-177.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.009>

Arróspide, F., Mao, L., & Escauriaza, C. (2018). Morphological evolution of the Maipo River in central Chile: Influence of instream gravel mining. *Geomorphology*, 306, 182-197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.019>

Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral- AIDER. (2021). *Minería ilegal en la Reserva Nacional de Tambopata- Siguiendo los pasos de nuestra biodiversidad*.  
[https://aider.com.pe/publicacionesca/cartillas/Cartilla\\_Mineria\\_2021\\_VF\\_opt.pdf](https://aider.com.pe/publicacionesca/cartillas/Cartilla_Mineria_2021_VF_opt.pdf)

Barajas, H. B., & Leiva, P. A. L. (2016). *Evaluación del cambio morfológico y sedimentológico del cauce del Río Sinú aguas abajo de la presa del Embalse Urrá asociados a su construcción y operación* [Tesis de pregrado]. Universidad de La Salle.

Basile, P. A. (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de Ríos Aluviales*. UNR Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario.  
<http://rehip.unr.edu.ar/xmlui/handle/2133/10738>

Brack, A., Ipenza, C., Alvarez, J., & Sotero, V. (2011). *Minería Aurífera en Madre de Dios y Contaminación con Mercurio—Una Bomba de Tiempo* (Primera Edición). Ministerio del Ambiente. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/mineria-aurifera-madre-dios-contaminacion-mercurio-una-bomba-tiempo>

Caballero Espejo, J., Messinger, M., Román-Dañobeytia, F., Ascorra, C., Fernandez, L., & Silman, M. (2018a). Deforestation and Forest Degradation Due to Gold Mining in the Peruvian Amazon: A 34-Year Perspective. *Remote Sensing*, 10(12), 1903. <https://doi.org/10.3390/rs10121903>

Caballero Espejo, J., Pillaca, M., Messinger, M., Román, F., Silman, M., & Fernandez, L. (2018b). *Tres décadas de deforestación por minería aurífera en la Amazonía suroriental Peruana*. <https://cincia.wfu.edu/publicaciones/resumenes-de-investigacion/tres-decadas-de-deforestacion-por-mineria-aurifera-en-la-amazonia-suroriental-peruana/>

Cabanillas, F. (2016). *Manual de buenas prácticas en minería aurífera aluvial para facilitar una adecuada recuperación de áreas*. MINAM. <http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/110>

Callan, N., De la Cruz, A., Guerrero, L., Santillan, B., Langendoen, E., & Moreno Brush, M. (2023). *Bedform dynamics in the mining-impacted Madre de Dios river, Peruvian Amazon*. <https://drive.google.com/file/d/1vLJV0ReYYy1xTziwGD9XqD30eP-02ByS/view>

Cano, A. (2021). *Formalización de la minería artesanal y de pequeña escala en la Amazonía peruana: Lecciones aprendidas y propuestas de solución* (p. 110 pág.). <https://biblioteca.spda.org.pe/biblioteca/catalogo/buscar.php?campos1=&search=%C3%81lvaro,%20Cano&temas&bases=&campos2=autor&search2=&conector1=AND&base=>

Castro, F. (2020). Minería ilegal en Amazonía peruana se frena pero aún sigue incluso en la cuarentena. *Rumbo Minero*. <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/mineria-ilegal-en-amazonia-peruana-se-frena-pero-aun-sigue-incluso-en-la-cuarentena/>

Centro de Innovación Científica Amazónica -CIN CIA. (2021). *Impactos ambientales previstos de la minería aurífera ilegal en cuerpos de agua de la Amazonía peruana* [Documento de síntesis científica].

<https://cincia.wfu.edu/publicaciones/impactos-ambientales-previstos-de-la-mineria-aurifera-ilegal-en-cuerpos-de-agua-de-la-amazonia-peruana/>

Centro de Investigación y Tecnología del Agua- CITA UTEC. (2021). Guía metodológica para la caracterización planimétrica y multitemporal de ríos andino-amazónicos. En *RÍOS DANZANTES: Guías metodológicas para el desarrollo de la línea base física de los ríos en Andes-Amazonía* (Primera edición). [https://drive.google.com/file/d/11LZinE89tchpu98oLUzN-SVXGxSBCx8\\_/view?usp=sharing&usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/d/11LZinE89tchpu98oLUzN-SVXGxSBCx8_/view?usp=sharing&usp=embed_facebook)

Charlton, R. (2010). *Fundamentals of fluvial geomorphology* (Repr). Routledge.

Comiti, F., Da Canal, M., Surian, N., Mao, L., Picco, L., & Lenzi, M. A. (2011). Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200years. *Geomorphology*, 125(1), 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.011>

Constantine, J. A., Dunne, T., Ahmed, J., Legleiter, C., & Lazarus, E. D. (2014). Sediment supply as a driver of river meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin. *Nature Geoscience*, 7(12), 899-903. <https://doi.org/10.1038/ngeo2282>

Damonte, G. (2021). Limited state governance and institutional hybridization in alluvial ASM in Peru. *Resources Policy*, 72, 102118. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102118>

Damonte, G. H. (2018). Mining Formalization at the Margins of the State: Small-scale Miners and State Governance in the Peruvian Amazon. *Development and Change*, 49(5), 1314-1335. <https://doi.org/10.1111/dech.12414>

Decreto legislativo N° 1105 (2012).  
<https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-legislativo-que-establece-disposiciones-para-el-proc-decreto-legislativo-n-1105-778570-2/>

Decreto Legislativo N° 1336 (2017).  
[https://www.minem.gob.pe/\\_legislacionM.php?idSector=20&idLegislacion=11157](https://www.minem.gob.pe/_legislacionM.php?idSector=20&idLegislacion=11157)

Dethier, E. N., Sartain, S. L., & Lutz, D. A. (2019). Heightened levels and seasonal inversion of riverine suspended sediment in a tropical biodiversity hot spot due to artisanal gold mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(48), 23936-23941. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907842116>

Estrada, Y., Guerrero, L., Sisniegas, P., Valdivia, G., Vega, C., Fernandez, L., & Moreno Brush, M. (2023b). *Distribución y transporte del mercurio en la cuenca Madre de Dios, Amazonía peruana: Influencia de los sedimentos y la hidrodinámica*. [https://drive.google.com/file/d/1qGhASek\\_V23J-vip3n5nwnGovTX6mPOD/view](https://drive.google.com/file/d/1qGhASek_V23J-vip3n5nwnGovTX6mPOD/view)

Estrada, Y., Portocarrero Trigos, E. C., Garcia Veramatus, M. P., Pillaca, M., Castro, J., Quispe Flores, E., Fernandez, L., & Moreno-Brush, M. (2023a). *Influencia de la minería aurífera aluvial en la geodinámica fluvial del río Madre de Dios, Amazonía peruana, en el periodo 1984-2020*.

Fianko, A. B. Y. (2021). *Impact of Artisanal and Small-Scale Mining on Water bodies and Treatment: The Case of Birim River Basin in Ghana*.

Finer, M., & Mamani, N. (2020a). MAAP #130: Minería Ilegal baja 78% en la Amazonía Peruana, pero aún Amenaza áreas Clave. MAAP. [https://maaproject.org/2020/mineria\\_ilegal/](https://maaproject.org/2020/mineria_ilegal/)

Finer, M., & Mamani, N. (2020b, enero 17). MAAP #115: Fronteras de la Minería Ilegal, Parte 1: Amazonía Peruana. *MAAP*. <https://www.maaproject.org/2020/fronteras-mineria-peru/>

Finer, M., & Mamani, N. (2023). MAAP #185: Gold Mining Deforestation in the Southern Peruvian Amazon: 2021-2022 Update. *MAAP*. <https://www.maaproject.org/2023/peru-gold-mining-update/>

Finer, M., & Novoa. (2016). MAAP #33: Actividad Minera Aurífera Ilegal Altera el Curso del Río Malinowski (límite Reserva Nacional Tambopata). *MAAP*. <https://maaproject.org/2016/desvio-malinowski/>

Finer, M., & Novoa, S. (2017, octubre 30). MAAP #72: Otra Zona Crítica de Deforestación Minera: Alto Malinowski (Madre de Dios). *MAAP*. <https://www.maaproject.org/2017/alto-malinowski-2017/>

Franco, J. R., Rodríguez, A. I. P., & Jiménez, E. C. R. (2014). *Estadística Aplicada II: Estadística en Administración para Toma de Decisiones*. Grupo Editorial Patria.

Frias, C. E., Abad, J. D., Mendoza, A., Paredes, J., Ortals, C., & Montoro, H. (2015). Planform evolution of two anabranching structures in the Upper Peruvian Amazon River. *Water Resources Research*, 51(4), 2742-2759. <https://doi.org/10.1002/2014WR015836>

García Veramatus, M. P., Vega, C., Fernández, L., Araújo-Flores, J., & Moreno-Brush, M. (2023). *Mercurio en peces y el riesgo ecotoxicológico para peces y aves piscívoras de Madre de Dios, Amazonía peruana*. [https://drive.google.com/file/d/16fcPFflJpGabiOBBcNH\\_KgCf7qYABVc4/view](https://drive.google.com/file/d/16fcPFflJpGabiOBBcNH_KgCf7qYABVc4/view)

González, A. (2020). Operación Mercurio y minería ilegal en La Pampa. *Centro de Estudios Estratégicos del Ejército del Perú*.  
<https://ceeeep.mil.pe/2020/11/30/operacion-mercurio-y-mineria-ilegal-en-la-pampa/>

Grandez U., J., Gonzalo R., J., Ronceros M., V., Bedoya V., S., Grandez C., G., & Pérez Z., C. (2016). *Niveles de mercurio en cabello de mujeres en una comunidad nativa, Madre de Dios, Perú*.  
<http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/520>

Gruel, C. R., & Latrubesse, E. M. (2021). A Monitoring System of Sand Mining in Large Rivers and Its Application to the Ayeyarwady (Irrawaddy) River, Myanmar. *Water*, 13(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/w13172331>

Heck, C., & Tranca, J. (Eds.). (2014). *La realidad de la minería ilegal en países amazónicos: Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela*. Sociedad Peruana de Derecho Ambiental.

Hernández, N. (2018). El río y su territorio. Espacio de libertad: Un concepto de gestión. *Terra. Nueva Etapa*, 34(56).  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72157132006>

Hou, L., Zhang, H., Li, L., Zhao, J., & Li, X. (2023). A Method for Calculating Water Demand for Sediment Transport Based on the Principles of River Dynamics. *Water*, 15(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/w15193514>

Kong, D., Latrubesse, E. M., Miao, C., & Zhou, R. (2020). Morphological response of the Lower Yellow River to the operation of Xiaolangdi Dam, China. *Geomorphology*, 350, 106931. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106931>

Kukuła, K., & Bylak, A. (2020). Synergistic impacts of sediment generation and hydrotechnical structures related to forestry on stream fish communities. *Science of The Total Environment*, 737, 139751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139751>

Lehmkuhl, F., & Stauch, G. (2023). Anthropogenic influence of open pit mining on river floods, an example of the Blessem flood 2021. *Geomorphology*, 421, 108522. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108522>

Leiva, J. D. (2022). Appropriate technologies and the geosocial evolution of informal, small-scale gold mining in Madre de Dios, Peru. *The Extractive Industries and Society*, 12, 101165. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101165>

Ley N° 26311, 1 (1994). <https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/26311.pdf>

Lezama, V. (2019). *Problemas ambientales en las zonas de amortiguamiento del parque nacional Bahuaja Sonene y la reserva nacional Tambopata a causa de la minería ilegal*. 2019: XI Coloquio Internacional de Estudiantes de Geografía y Medio Ambiente PUCP. <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/187066>

Low, P. (2012). *Minería aurífera artesanal y en pequeña escala en Perú: ¿Una bendición o una condena?* <https://www.scribd.com/document/397960106/Low-2012-Mineria-Artesanal-y-en-Pequena-Escala-en-Peru-pdf#>

Ministerio del Ambiente - MINAM. (s. f.). *Principales iniciativas en el Perú*. Conservación de bosques para la mitigación del cambio climático. Recuperado 27 de agosto de 2023, de <https://www.minam.gob.pe/programa-bosques/principales-iniciativas-en-el-peru/>

Ministerio del Ambiente - MINAM. (2013). *Diálogos Ambientales: Minería ilegal y minería informal*. <https://www.minam.gob.pe/prensa/dialogos-ambientales/dialogos-ambientales-mineria-ilegal-y-mineria-informal/>

Ministerio del Interior. (2019). *Operación “Mercurio 2019” permitirá restituir el principio de autoridad en La Pampa*. <https://www.gob.pe/institucion/mininter/noticias/25784-operacion-mercurio-2019-permitira-restituir-el-principio-de-autoridad-en-la-pampa>

Mol, J. H., & Ouboter, P. E. (2004). Downstream Effects of Erosion from Small-Scale Gold Mining on the Instream Habitat and Fish Community of a Small Neotropical Rainforest Stream. *Conservation Biology*, 18(1), 201-214. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00080.x>

Mongabay Latam. (2019, noviembre 27). Lobos de río: Víctimas de la minería ilegal en Madre de Dios. *El Comercio*. <https://elcomercio.pe/tecnologia/ecologia/lobos-de-rio-victimas-de-la-mineria-ilegal-en-madre-de-dios-conservacion-cocha-cashu-noticia/>

Morais, E. S., Rocha, P. C., & Hooke, J. (2016). Spatiotemporal variations in channel changes caused by cumulative factors in a meandering river: The lower Peixe River, Brazil. *Geomorphology*, 273, 348-360. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.026>

Moreno-Brush, M., McLagan, D. S., & Biester, H. (2020). Fate of mercury from artisanal and small-scale gold mining in tropical rivers: Hydrological and biogeochemical controls. A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(5), 437-475. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629793>

Moreno-Brush, M., Rydberg, J., Gamboa, N., Storch, I., & Biester, H. (2016). Is mercury from small-scale gold mining prevalent in the southeastern Peruvian Amazon? *Environmental Pollution*, 218, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.038>

Navarte, R. (2014). *Hidráulica fluvial*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Nanson, G. C., & Hickin, E. J. (1983). Channel Migration and Incision on the Beatton River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 327-337. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(327\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(327))

OEA. (2022). *Tras el dinero del oro ilícito: Fortalecimiento de la lucha contra las finanzas de la minería ilegal: El caso de Colombia*. <https://www.oas.org/es/sms/ddot/docs/Tras-el-dinero-del-oro-ilicito-El-caso-de-Colombia.pdf>

Olivares, E. E. (2017). *Patrones de cambio morfológico y meándrico de 13 ríos pertenecientes a la Cuenca Hidrográfica del Amazonas*. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7619>

Ollero, A. (2008). *Alteraciones geomorfológicas de los ríos en Europa y principios para la restauración de su dinámica* (p. <http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/4B-S1>).

Ortega Páez, E., Ochoa Sangrador, C., & Molina Arias, M. (2022). Pruebas para muestras relacionadas. Variables cuantitativas. *Evid Pediatr*, 18(41). <https://evidenciasenpediatria.es/articulo/8091/pruebas-para-muestras-relacionadas-variables-cuantitativas->

Osores Plenge, F., Rojas Jaimes, J. E., & Manrique Lara Estrada, C. H. (2012). Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública. *Acta Médica Peruana*, 29(1), 38-42.

Paiva, K., Langendoen, E. J., & Abad, J. D. (2020). *Modelling Runoff and Sediment Yield Delivered from Floodplain Mining Activities to the Madre de Dios River*. 2020, H167-0014.

Paiva, K., Rau, P., Horna, D., & Moreno Brush, M. (2023). *El aumento de la deforestación en la cuenca del río Madre de Dios, Amazonía peruana, incrementaría la escorrentía superficial y la concentración de sedimentos*. [https://drive.google.com/file/d/1eTRCdcv2zKx4gFvJjeAfx5h9RPKEDi08/view?usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/d/1eTRCdcv2zKx4gFvJjeAfx5h9RPKEDi08/view?usp=embed_facebook)

Popović, P., Devauchelle, O., Abramian, A., & Lajeunesse, E. (2021). Sediment load determines the shape of rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(49), e2111215118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111215118>

Prevenir Amazonía. (s. f.). Madre de Dios. *Prevenir Amazonía- ¿Qué cuidamos?* Recuperado 27 de agosto de 2023, de <https://preveniramazonia.pe/region/madre-de-dios/>

Quintana Cobo, I. (2015). *Dinámica de meandros del Alto Amazonas (Ucayali Basin)* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad de Cantabria]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=47954>

Resolución Presidencial N°035-2019-SERNANP (2019). <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-actualizacion-plan-maestro-reserva-nacional-tambopata-periodo>

Rocha - Felices, A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial* (Primera Edición). Facultad de Ingeniería Civil- Universidad Nacional de Ingeniería.

Rocha - Felices, A. (2013). *Introducción a la Hidráulica de las Obras Viales* (3ra Edición). Instituto de la construcción y gerencia- Fondo editorial ICG. <https://docplayer.es/19214999-Introduccion-a-la-hidraulica-de-las-obras-viales-arturo-rocha-felices-pt-44-3ra-edicion-2013-2da-edicion-2010-1ra-edicion-2009.html>

Romaina-Flores, J. C. (2012). *Estadística experimental* (1.<sup>a</sup> ed.). Universidad Privada de Tacna. <https://isbn.cloud/9786124610028/estadistica-experimental/>

Rozo, M. G., Nogueira, A. C. R., & Castro, C. S. (2014). Remote sensing-based analysis of the planform changes in the Upper Amazon River over the period 1986–2006. *Journal of South American Earth Sciences*, 51, 28-44. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.12.004>

Ruiz, B. W., & Sim, C. H. (2011). Comparisons of various types of normality tests. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 81(12), 2141-2155. <https://doi.org/10.1080/00949655.2010.520163>

Schwenk, J., Khandelwal, A., Fratkin, M., Kumar, V., & Foufoula-Georgiou, E. (2017). High spatiotemporal resolution of river planform dynamics from Landsat: The RivMAP toolbox and results from the Ucayali River: Annual Planform Morphodynamics, Ucayali. *Earth and Space Science*, 4(2), 46-75. <https://doi.org/10.1002/2016EA000196>

Segnini, S. (2004). *Fundamentos de bioestadística*. Departamento de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad de los Andes.

Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado - SERNANP.  
(s.f.). *Reserva Nacional de Tambopata*.  
<https://old.sernanp.gob.pe/sernanp/zonaturismoj.jsp?ID=8>

Sociedad Peruana de Derecho Ambiental. (2014). *Conservar para crecer: Guía de iniciativas de conservación voluntaria en Madre de Dios*. SPDA.  
[https://spda.org.pe/wpfb-file/conservar-para-crecer\\_guaa-de-iniciativas-de-conservacion-voluntaria-en-madre-de-dios-pdf/](https://spda.org.pe/wpfb-file/conservar-para-crecer_guaa-de-iniciativas-de-conservacion-voluntaria-en-madre-de-dios-pdf/)

Sociedad Peruana de Derecho Ambiental. (2016). *Minería y fiebre del oro en Madre de Dios*. Actualidad ambiental. <http://www.actualidadambiental.pe/febremdd/>

Timana, C., Moreno-Brush, M., Peralta-Argomeda, J., Pillaca, M., Vega, C., Santa-María, M. C., Venail, P., Fernandez, L., & Araújo-Flores, J. (2023). *Inventario biológico rápido en comunidades acuáticas evidencia deterioro ambiental por minería aurífera aluvial en el río Madre de Dios (Perú)*. <https://cita.utec.edu.pe/articulos-post/inventario-biologico-rapido-en-comunidades-acuaticas-evidencia-deterioro-ambiental-por-mineria-aurifera-aluvial-en-el-rio-madre-de-dios-peru/>

Tomás-Sábado, J. (2010). *Fundamentos de bioestadística y análisis de datos para enfermería*. Univ. Autònoma de Barcelona.

UNEP - UN Environment Programme. (2019, abril 3). *Global Mercury Assessment 2018*. UNEP - UN Environment Programme.  
<http://www.unep.org/resources/publication/global-mercury-assessment-2018>

USAID. (2020). *Case Study: Artisanal and Small-Scale Mining in Madre De Dios, Peru*. *LandLinks*. <https://www.land-links.org/document/case-study-artisanal-and-small-scale-mining-in-madre-de-dios-peru/>

Valdés, R., Basombrio, C., & Vera, D. (2019). *La minería no formal en el Perú*. Oficina en el Perú. <https://www.kas.de/es/web/peru/einzeltitel/-/content/la-mineria-no-formal-en-el-peru>

Vargas, S. P., Marrugo Negrete, J. L., Vargas Licona, S. P., & Marrugo Negrete, J. L. (2019). Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: Riesgo por ingesta. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 232-242. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.74128>

Vercruyse, K., & Grabowski, R. C. (2021). Human impact on river planform within the context of multi-timescale river channel dynamics in a Himalayan river system. *Geomorphology*, 381, 107659. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107659>

Wiener, L. (2019). *Manual sobre la formalización de la minería en pequeña escala*. Editorial Cooper Acción. <https://cooperaccion.org.pe/publicaciones/manual-sobre-la-formalizacion-de-la-mineria-en-pequena-escala/>

Wilson, A., Quiñon, A., & Sanchez-Ancochea, D. (2024). *Hacia una mejor formalización de la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) en el Perú: Explorando cuellos de botella y opciones de política pública*. Centro de Estudios sobre Minería y Sostenibilidad de la Universidad del Pacífico y Departamento de Desarrollo Internacional de la Universidad de Oxford. <https://sisisemail.up.edu.pe/sisisemail/docs/2024/184/hacia-una-mejor-formalizacion-de-la-mineria-artesanal.pdf>

WWF. (2022). *Madre de Dios: Un tesoro de biodiversidad para el mundo*. <https://www.wwf.org.ec/en/?376871/Madre-de-Dios-Un-tesoro-de-biodiversidad-para-el-mundo>

Zinger, J. A. (2016). *From meander bend to oxbow lake: Morphodynamics and sedimentology of chute cutoffs* [Text, University of Illinois at Urbana-Champaign].  
<https://hdl.handle.net/2142/90527>

## **Anexos**

Anexo 1: Análisis estadístico de las variaciones de los parámetros por nivel de impacto de la MAPE..... 144

Anexo 2: Análisis estadístico de correlación de la variación de los parámetros morfológicos con la deforestación por MAPE..... 151

**Anexo 1. Análisis estadístico de las variaciones de los parámetros por nivel de impacto de la MAPE**

**DATOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO FRIEDMAN -PARAMETROS MORFOMÉTRICOS**

Tramo del río	Sección	Tipo de minería	Ancho promedio (m)				Longitud de onda (m)				Longitud de semimeandro (m)				Sinuosidad			
			Impacto bajo	Impacto medio	Impacto alto	Impacto alto específico	Impacto bajo	Impacto medio	Impacto alto	Impacto alto específico	Impacto bajo	Impacto medio	Impacto alto	Impacto alto específico	Impacto bajo	Impacto medio	Impacto alto	Impacto alto específico
1	A1	Maquinaria pesada	73.67	76.28	117.36	110.44	255.01	266.44	349.22	334.35	322.74	334.98	412.87	404.17	1.34	1.33	1.23	1.27
2	A1	Maquinaria pesada	105.96	116.53	143.95	159.09	438.70	481.06	524.69	529.14	584.78	643.90	623.90	613.63	1.33	1.33	1.17	1.15
3	A1	Maquinaria pesada	110.74	124.04	172.25	171.48	468.95	598.46	701.71	701.04	531.92	717.36	791.24	775.25	1.12	1.19	1.11	1.09
4	A1	Maquinaria pesada	175.72	200.63	205.65	193.55	655.87	727.33	752.33	767.23	714.92	803.20	812.70	826.55	1.08	1.11	1.07	1.06
5	A1	Maquinaria pesada	176.87	190.30	172.66	183.30	736.82	1001.23	622.92	709.42	783.27	1078.78	658.76	745.42	1.07	1.07	1.06	1.05
6	A1	Maquinaria pesada	183.58	197.19	207.19	228.34	592.77	946.67	580.04	611.66	649.02	1023.81	646.73	653.62	1.10	1.07	1.13	1.08
7	A1	Maquinaria pesada	213.53	197.59	209.13	211.16	700.17	1256.24	843.06	828.61	775.36	1405.96	971.39	927.88	1.10	1.14	1.18	1.12
8	A1	Maquinaria pesada	224.00	219.57	204.66	211.65	1006.58	1677.38	944.96	907.07	1072.89	1892.56	1099.04	1068.79	1.06	1.15	1.16	1.17
9	A1	Maquinaria pesada	246.10	268.57	267.97	265.44	1937.38	3278.99	804.60	772.72	2082.09	3602.28	862.36	839.92	1.06	1.09	1.07	1.08
10	A1	Maquinaria pesada	242.41	264.94	290.82	275.67	1415.68	2801.13	973.59	1053.93	1555.89	3074.10	1043.67	1147.73	1.08	1.10	1.07	1.08
11	A2	Bombas de succión	302.60	299.76	283.50	264.74	1150.87	1539.79	1100.04	1035.66	1291.38	1734.63	1171.09	1120.25	1.12	1.13	1.07	1.08
12	A2	Bombas de succión	225.70	231.65	258.40	257.60	974.00	1086.92	995.53	805.57	1126.58	1259.06	1083.36	873.84	1.17	1.16	1.09	1.08
13	A2	Bombas de succión	179.23	185.88	243.58	231.38	819.93	661.70	817.76	857.27	1056.49	728.51	893.51	924.12	1.28	1.10	1.10	1.09
14	A2	Bombas de succión	153.74	180.49	201.58	201.15	784.81	577.55	786.56	774.65	1054.07	673.03	954.97	954.16	1.31	1.16	1.29	1.29
15	A2	Bombas de succión	154.36	183.49	184.14	191.53	749.42	866.63	1101.20	1051.49	904.76	1043.43	1246.04	1194.57	1.19	1.17	1.12	1.12
16	A2	Bombas de succión	128.99	155.23	190.80	180.86	597.51	861.22	1029.19	1068.05	843.39	1117.95	1321.09	1382.65	1.38	1.30	1.32	1.34
17	A2	Bombas de succión	121.89	159.43	189.60	188.77	604.48	612.91	871.15	892.19	947.63	862.28	1170.65	1175.80	1.62	1.38	1.34	1.34
18	A2	Bombas de succión	111.73	166.48	179.06	177.16	571.34	982.11	1465.27	1531.53	680.95	1199.91	1843.86	1892.80	1.29	1.27	1.34	1.33
19	A2	Bombas de succión	112.25	149.94	170.24	164.55	591.64	1052.25	1677.00	1742.87	1052.11	1440.70	1993.77	2120.70	1.77	1.55	1.36	1.44
20	A2	Bombas de succión	112.45	144.54	166.05	171.73	781.51	806.20	1072.30	1044.99	1518.89	1389.96	1317.17	1339.22	2.04	1.90	1.36	1.44
21	A2	Bombas de succión	123.94	144.25	146.17	150.64	939.96	1004.52	922.25	902.56	1252.69	1401.34	1337.72	1269.86	1.36	1.43	1.49	1.43
22	A2	Bombas de succión	203.71	240.67	206.59	208.23	943.86	1000.42	979.85	1037.76	1558.25	1436.55	1529.47	1585.14	1.71	1.45	1.59	1.55
23	A3	Bombas de succión	213.67	231.96	215.51	213.29	1215.93	1051.34	1034.19	1099.52	1404.57	1302.72	1294.46	1399.03	1.16	1.19	1.22	1.23
24	A3	Bombas de succión	189.90	202.44	209.28	210.48	874.01	855.38	874.76	869.18	1004.87	1069.25	1248.47	1253.43	1.15	1.24	1.45	1.46
25	A3	Bombas de succión	181.09	197.34	200.51	203.37	868.12	832.02	818.42	812.15	1096.51	1125.90	1168.64	1160.35	1.26	1.36	1.45	1.45
26	A3	Bombas de succión	175.01	181.40	183.99	187.08	925.53	932.38	957.82	932.80	1329.14	1452.00	1569.42	1543.26	1.44	1.57	1.66	1.67
27	A3	Bombas de succión	170.71	177.28	185.48	188.17	1072.17	779.26	819.97	809.01	1512.87	1064.75	1163.57	1152.29	1.33	1.69	1.48	1.48
28	A3	Bombas de succión	169.57	166.26	179.53	182.80	1386.93	760.85	868.21	862.28	2237.53	1014.28	1277.36	1226.43	1.65	1.72	1.49	1.43
29	A3	Bombas de succión	180.46	188.59	190.43	193.55	1112.37	877.77	969.12	961.49	2360.24	1983.26	2415.05	2369.78	2.28	2.20	2.50	2.45
30	A3	Bombas de succión	178.91	183.94	193.36	194.64	909.22	997.31	952.03	950.73	1682.63	1813.22	1887.34	1880.06	1.79	1.89	1.92	1.92
31	A3	Bombas de succión	185.40	202.83	214.18	215.21	993.67	913.58	862.59	866.09	1158.45	1114.93	1129.31	1135.28	1.19	1.23	1.30	1.30
32	A3	Bombas de succión	168.41	183.28	194.24	191.84	1416.00	1373.38	1240.36	1252.66	1640.62	1599.11	1537.71	1540.92	1.14	1.14	1.20	1.19
33	A3	Bombas de succión	168.65	170.45	180.21	181.12	1007.01	1069.59	1107.90	1074.96	1377.86	1485.49	1567.96	1508.83	1.39	1.45	1.44	1.41
34	A3	Bombas de succión	152.25	153.39	165.23	168.47	1163.30	1157.63	1157.81	1165.74	1787.28	1824.89	1828.20	1825.72	1.69	1.77	1.70	1.68
35	A3	Bombas de succión	162.29	167.73	169.93	172.78	921.92	916.31	954.70	946.92	1614.89	1672.06	1679.00	1698.31	1.82	1.93	1.89	1.93
36	A3	Bombas de succión	186.26	193.61	179.39	180.29	901.39	927.21	1016.81	990.90	1336.93	1425.58	1538.08	1520.36	1.48	1.61	1.62	1.62
37	A3	Bombas de succión	186.21	211.50	189.25	183.47	971.40	828.06	824.78	833.77	1100.88	1108.41	1032.25	977.68	1.15	1.38	1.29	1.19
38	A3	Bombas de succión	188.19	191.46	185.66	178.64	930.03	611.46	689.92	677.14	954.46	626.72	724.34	707.46	1.03	1.02	1.05	1.04

**DATOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO -PARAMETROS MORFODINÁMICOS**

Tramo	Sección	Tipo de minería	Erosión (ha/año)				Deposición (ha/año)				Migración (m/año)			
			Impacto bajo	Impacto medio	Impacto alto	Impacto alto específico	Impacto bajo	Impacto medio	Impacto alto	Impacto alto específico	Impacto bajo	Impacto medio	Impacto alto	Impacto alto específico
1	A1	Maquinaria pesada	2.79	3.05	3.76	10.58	2.31	1.82	4.28	10.92	10.98	8.08	15.21	45.26
2	A1	Maquinaria pesada	3.49	2.88	3.70	12.27	2.61	2.43	4.97	17.19	12.79	11.66	12.19	50.77
3	A1	Maquinaria pesada	2.84	1.44	4.10	7.52	1.33	2.24	3.47	9.20	9.66	9.06	12.40	39.80
4	A1	Maquinaria pesada	3.37	3.27	5.88	9.61	2.82	2.84	6.74	10.67	15.27	12.75	21.94	32.94
5	A1	Maquinaria pesada	4.12	5.92	4.40	10.14	3.60	3.23	3.92	11.89	14.97	15.69	21.34	44.91
6	A1	Maquinaria pesada	6.47	3.72	6.31	14.25	4.02	4.49	4.49	11.98	23.68	27.06	24.29	48.37
7	A1	Maquinaria pesada	7.24	2.91	5.59	11.53	4.91	6.22	6.53	13.58	19.15	10.55	18.03	41.37
8	A1	Maquinaria pesada	4.95	1.76	4.77	11.68	3.93	3.73	6.11	10.03	17.72	18.70	15.18	40.59
9	A1	Maquinaria pesada	4.43	6.23	4.23	6.61	2.37	2.78	2.51	5.98	12.56	7.28	12.60	24.67
10	A1	Maquinaria pesada	3.43	2.60	2.82	6.08	3.60	1.45	3.18	6.51	11.38	6.32	11.80	22.96
11	A2	Bombas de succión	5.24	5.76	5.46	11.77	4.81	4.32	7.35	11.20	20.15	11.84	15.99	38.62
12	A2	Bombas de succión	6.35	8.80	8.33	11.56	6.63	5.57	7.99	12.19	13.55	17.64	24.62	47.25
13	A2	Bombas de succión	8.90	8.78	7.48	10.67	7.71	11.36	8.47	12.87	27.84	19.22	22.25	41.74
14	A2	Bombas de succión	5.75	8.70	8.33	14.15	5.57	5.02	10.93	14.99	18.91	21.91	21.61	36.91
15	A2	Bombas de succión	5.06	4.88	4.42	5.75	3.04	3.97	4.61	5.58	18.43	17.48	16.03	27.60
16	A2	Bombas de succión	3.72	4.74	5.36	6.78	2.78	5.01	5.93	9.42	14.67	19.05	15.64	29.86
17	A2	Bombas de succión	4.80	8.15	9.37	15.52	3.15	6.85	9.65	16.56	13.37	19.60	22.76	37.43
18	A2	Bombas de succión	2.33	7.12	5.50	8.21	1.54	3.71	7.14	10.11	10.51	19.24	21.90	29.34
19	A2	Bombas de succión	2.49	4.76	1.82	3.01	2.11	4.76	2.32	4.15	10.00	19.45	10.24	20.78
20	A2	Bombas de succión	3.71	5.59	5.86	10.34	2.93	4.74	8.92	15.28	7.89	9.26	16.93	47.70
21	A2	Bombas de succión	1.78	3.90	4.61	6.51	1.46	1.44	4.17	6.61	9.20	7.36	12.05	29.75
22	A2	Bombas de succión	9.87	5.85	4.16	8.16	9.81	3.53	5.65	9.82	13.19	12.47	10.00	26.03
23	A3	Bombas de succión	5.49	3.86	3.09	4.98	3.97	3.10	2.97	5.13	13.56	8.97	10.33	30.53
24	A3	Bombas de succión	5.36	6.58	9.80	10.95	6.00	4.78	7.57	8.83	14.96	15.35	19.10	29.90
25	A3	Bombas de succión	3.26	3.02	4.07	5.22	1.87	2.46	3.91	4.89	10.44	10.10	13.22	28.68
26	A3	Bombas de succión	3.22	2.33	3.15	4.80	1.69	1.93	2.69	4.56	8.05	5.78	8.62	19.81
27	A3	Bombas de succión	3.82	4.32	5.83	7.43	2.45	3.08	4.34	6.69	7.71	7.56	9.62	19.86
28	A3	Bombas de succión	2.28	1.61	2.06	4.34	1.37	1.40	2.05	4.13	6.82	4.85	6.43	18.14
29	A3	Bombas de succión	4.93	4.74	8.24	14.79	3.34	4.33	9.53	19.60	6.25	6.07	9.88	24.23
30	A3	Bombas de succión	2.93	2.10	2.64	5.20	1.63	2.08	2.15	4.87	6.91	4.71	8.77	17.14
31	A3	Bombas de succión	2.38	2.52	4.45	5.56	1.18	2.41	3.30	5.41	9.10	10.07	13.16	24.80
32	A3	Bombas de succión	1.73	2.10	1.60	2.84	0.85	1.24	1.36	3.76	7.21	4.28	6.00	16.97
33	A3	Bombas de succión	2.35	1.40	2.10	4.83	1.23	2.56	1.66	4.31	6.13	4.75	4.18	15.75
34	A3	Bombas de succión	1.97	0.52	1.43	2.70	1.24	2.15	0.99	3.20	7.14	4.18	3.55	16.69
35	A3	Bombas de succión	3.62	1.07	2.48	5.59	2.82	2.71	2.27	5.28	7.72	4.55	6.06	18.10
36	A3	Bombas de succión	3.98	3.07	2.31	3.69	2.18	3.03	3.36	4.68	10.49	10.18	9.72	21.54
37	A3	Bombas de succión	2.08	1.88	2.04	4.48	1.45	1.17	3.24	7.26	9.64	6.09	8.69	28.41
38	A3	Bombas de succión	0.56	0.10	0.22	0.74	0.80	0.19	0.18	0.64	22.81	10.89	7.55	31.11

## ANCHO PROMEDIO

### Análisis de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Impacto bajo	,136	38	,072	,961	38	,206
Impacto medio	,142	38	,051	,968	38	,330
Impacto alto	,170	38	,007	,915	38	,007
Impacto alto específico	,147	38	,038	,933	38	,025

a. Corrección de significación de Lilliefors

### Análisis de muestras relacionadas-Friedman

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de Impacto bajo, Impacto medio, Impacto alto and Impacto alto específico son las mismas.	Análisis de varianza de dos vías por rangos de Friedman para muestras relacionadas	,000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

## LONGITUD DE ONDA

### Análisis de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Impacto bajo	,136	38	,073	,952	38	,105
Impacto medio	,272	38	,000	,697	38	,000
Impacto alto	,114	38	,200*	,946	38	,065
Impacto alto específico	,138	38	,067	,921	38	,010

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

### Análisis de muestras relacionadas-Friedman

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de Impacto bajo, Impacto medio and Impacto alto son las mismas.	Análisis de varianza de dos vías por rangos de Friedman para muestras relacionadas	,479	Retener la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

## LONGITUD DE SEMIMEANDRO

### Análisis de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Impacto bajo	,097	38	,200 <sup>*</sup>	,974	38	,503
Impacto medio	,164	38	,011	,851	38	,000
Impacto alto	,114	38	,200 <sup>*</sup>	,977	38	,617
Impacto alto específico	,095	38	,200 <sup>*</sup>	,976	38	,570

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

### Análisis de muestras relacionadas-Friedman

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de Impacto bajo, Impacto medio and Impacto alto son las mismas.	Análisis de varianza de dos vías por rangos de Friedman para muestras relacionadas	,172	Retener la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

## SINUOSIDAD

### Análisis de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Impacto bajo	,162	38	,014	,864	38	,000
Impacto medio	,147	38	,037	,881	38	,001
Impacto alto	,158	38	,018	,835	38	,000
Impacto alto específico	,156	38	,020	,839	38	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota: Fuente: Procesamiento de datos software SPSS

## Análisis de muestras relacionadas-Friedman

### Secciones A1 y A2

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de Impacto bajo, Impacto medio and Impacto alto son las mismas.	Análisis de varianza de dos vías por rangos de Friedman para muestras relacionadas	,028	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

### Sección A3

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de Impacto bajo, Impacto medio and Impacto alto son las mismas.	Análisis de varianza de dos vías por rangos de Friedman para muestras relacionadas	,002	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

## EROSIÓN

### Análisis de normalidad

#### Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Impacto bajo	,121	38	,175	,934	38	,026
Impacto medio	,128	38	,121	,951	38	,093
Impacto alto	,095	38	,200 <sup>*</sup>	,962	38	,215
Impacto alto específico	,118	38	,200 <sup>*</sup>	,961	38	,201

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

### Análisis de muestras relacionadas-Friedman

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de Impacto bajo, Impacto medio and Impacto alto son las mismas.	Análisis de varianza de dos vías por rangos de Friedman para muestras relacionadas	,201	Retener la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

## DEPOSICION

### Análisis de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Impacto bajo	,144	38	,045	,864	38	,000
Impacto medio	,118	38	,200 <sup>*</sup>	,878	38	,001
Impacto alto	,127	38	,124	,959	38	,181
Impacto alto específico	,146	38	,040	,951	38	,098

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

### Análisis de muestras relacionadas-Friedman

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de Impacto bajo, Impacto medio and Impacto alto son las mismas.	Análisis de varianza de dos vías por rangos de Friedman para muestras relacionadas	,000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

## MIGRACION

### Análisis de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Impacto bajo	,130	38	,102	,914	38	,007
Impacto medio	,125	38	,140	,919	38	,009
Impacto alto	,113	38	,200 <sup>*</sup>	,954	38	,118
Impacto alto específico	,115	38	,200 <sup>*</sup>	,941	38	,045

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

### Análisis de muestras relacionadas-Friedman

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las distribuciones de Impacto bajo, Impacto medio and Impacto alto son las mismas.	Análisis de varianza de dos vías por rangos de Friedman para muestras relacionadas	,009	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

**Anexo 2. Análisis estadístico de correlación de la variación de los parámetros morfológicos con la deforestación por MAPE**

**DATOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN -PARAMETROS MORFOMÉTRICOS**

Año	Sinuosidad			Longitud de semimeandro (m)			Longitud de onda (m)			Ancho promedio (m)			Deforestación (ha)		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
1984	1.17	1.52	1.47	595.41	1236.07	1632.18	521.91	860.13	1149.26	122.34	130.66	164.26	0.00	0.00	0.00
1987	1.18	1.50	1.51	630.02	1035.69	1504.12	558.98	709.94	1014.10	155.08	153.38	184.66	5.94	4.50	0.00
1992	1.18	1.42	1.44	581.79	900.59	1347.10	512.80	640.05	926.50	158.49	161.47	182.86	26.24	22.33	0.00
1996	1.17	1.46	1.43	618.00	1034.89	1415.06	552.39	706.35	980.25	136.14	147.73	165.50	47.62	33.41	0.00
2000	1.19	1.44	1.51	883.59	1124.37	1485.87	778.89	811.51	997.80	163.52	165.03	193.56	68.88	77.53	0.00
2004	1.21	1.31	1.50	970.62	1077.02	1389.18	851.40	823.15	943.33	139.46	158.66	187.33	120.76	222.95	3.54
2008	1.21	1.34	1.67	850.99	1123.49	1395.39	740.36	866.10	916.95	156.58	203.77	185.47	203.32	545.80	19.32
2012	1.18	1.41	1.56	691.88	1212.40	1455.97	607.43	920.68	940.68	176.50	204.62	194.94	436.71	1670.47	51.47
2014	1.18	1.40	1.54	747.19	1130.37	1448.31	664.83	849.02	949.29	186.10	193.09	192.16	879.95	2288.90	125.84
2015	1.14	1.40	1.54	732.62	1161.33	1463.39	651.49	869.14	954.11	204.64	195.80	192.97	1352.07	2636.42	196.57
2016	1.10	1.24	1.56	736.83	1099.65	1470.44	663.62	904.56	963.73	200.86	192.90	189.64	1701.83	3301.24	258.03
2017	1.11	1.18	1.57	700.44	1258.01	1433.93	639.47	1065.52	920.02	177.44	196.41	193.42	2296.26	3972.49	320.81
2018	1.11	1.21	1.59	661.36	1270.92	1482.47	604.70	1048.17	952.55	172.38	211.69	186.01	2731.19	4713.10	416.25
2020	1.13	1.26	1.60	686.93	1453.62	1478.22	615.69	1169.43	945.90	168.89	207.25	184.49	3069.50	5185.87	540.21

**DATOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN -PARAMETROS MORFODINÁMICOS**

Periodo	Erosión (ha/año)			Deposición (ha/año)			Migración (m/año)			Deforestación (ha)		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
1984-1987	6.880	6.826	4.579	2.081	3.243	1.990	21.596	18.585	13.574	5.942	4.502	0.000
1987-1992	3.251	4.088	2.328	4.258	4.406	2.566	14.143	13.458	8.677	26.245	22.331	0.000
1992-1996	2.485	3.929	1.512	4.281	5.455	2.955	13.431	14.661	7.875	47.618	33.407	0.000
1996-2000	4.581	5.158	4.077	1.979	4.077	1.008	10.096	12.536	8.610	68.883	77.529	0.000
2000-2004	3.885	4.485	2.887	3.578	7.188	2.644	15.010	16.697	7.902	120.757	222.954	3.541
2004-2008	2.873	7.764	2.266	2.668	2.308	2.185	10.416	14.202	6.899	203.317	545.799	19.317
2008-2012	3.553	5.307	3.987	3.066	4.027	2.196	14.437	12.956	7.545	436.715	1670.470	51.469
2012-2016	5.607	6.140	3.374	4.795	7.618	3.176	16.580	20.497	9.772	1701.831	3301.245	258.028
2016- 2020	4.507	6.228	3.046	6.001	9.142	4.298	18.479	19.052	9.852	3069.497	5185.865	540.209

## PARAMETROS MORFOMÉTRICOS

### ANCHO PROMEDIO Y DEFORESTACIÓN POR MAPE

#### Correlaciones

			AA1	DA1	AA3	AA2	DA2	DA3
Rho de Spearman	AA1	Coefficiente de correlación	1,000	,736**	,697**	,622*	,736**	,708**
		Sig. (bilateral)	.	,003	,006	,018	,003	,005
		N	14	14	14	14	14	14
	DA1	Coefficiente de correlación	,736**	1,000	,429	,846**	1,000**	,978**
		Sig. (bilateral)	,003	.	,126	,000	.	,000
		N	14	14	14	14	14	14
	AA3	Coefficiente de correlación	,697**	,429	1,000	,455	,429	,344
		Sig. (bilateral)	,006	,126	.	,102	,126	,229
		N	14	14	14	14	14	14
	AA2	Coefficiente de correlación	,622*	,846**	,455	1,000	,846**	,825**
		Sig. (bilateral)	,018	,000	,102	.	,000	,000
		N	14	14	14	14	14	14
	DA2	Coefficiente de correlación	,736**	1,000**	,429	,846**	1,000	,978**
		Sig. (bilateral)	,003	.	,126	,000	.	,000
		N	14	14	14	14	14	14
	DA3	Coefficiente de correlación	,708**	,978**	,344	,825**	,978**	1,000
		Sig. (bilateral)	,005	,000	,229	,000	,000	.
		N	14	14	14	14	14	14

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

DA1: Deforestación por MAPE en la sección A1

DA2: Deforestación por MAPE en la sección A2

DA3: Deforestación por MAPE en la sección A3

## SINUOSIDAD Y DEFORESTACIÓN POR MAPE

### Correlaciones

			A1	A2	A3	Deforestación - A1	Deforestación -A2	Deforestación -A3
Rho de Spearman	A1	Coefficiente de correlación	1,000	,477	-,305	-,613*	-,613*	-,650*
		Sig. (bilateral)	.	,085	,288	,020	,020	,012
		N	14	14	14	14	14	14
	A2	Coefficiente de correlación	,477	1,000	-,714**	-,886**	-,886**	-,874**
		Sig. (bilateral)	,085	.	,004	,000	,000	,000
		N	14	14	14	14	14	14
	A3	Coefficiente de correlación	-,305	-,714**	1,000	,789**	,789**	,798**
		Sig. (bilateral)	,288	,004	.	,001	,001	,001
		N	14	14	14	14	14	14
	Deforestación- A1	Coefficiente de correlación	-,613*	-,886**	,789**	1,000	1,000**	,978**
		Sig. (bilateral)	,020	,000	,001	.	.	,000
		N	14	14	14	14	14	14
	Deforestación-A2	Coefficiente de correlación	-,613*	-,886**	,789**	1,000**	1,000	,978**
		Sig. (bilateral)	,020	,000	,001	.	.	,000
		N	14	14	14	14	14	14
	Deforestación-A3	Coefficiente de correlación	-,650*	-,874**	,798**	,978**	,978**	1,000
		Sig. (bilateral)	,012	,000	,001	,000	,000	.
		N	14	14	14	14	14	14

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

\*\*.. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

## LONGITUD DE ONDA Y DEFORESTACIÓN POR MAPE

### Correlaciones

			A1	A2	A3	Deforestación - A1	Deforestación -A2	Deforestación -A3
Rho de Spearman	A1	Coefficiente de correlación	1,000	,169	-,235	,336	,336	,250
		Sig. (bilateral)	.	,563	,418	,240	,240	,390
		N	14	14	14	14	14	14
	A2	Coefficiente de correlación	,169	1,000	-,314	,846**	,846**	,897**
		Sig. (bilateral)	,563	.	,274	,000	,000	,000
		N	14	14	14	14	14	14
	A3	Coefficiente de correlación	-,235	-,314	1,000	-,398	-,398	-,380
		Sig. (bilateral)	,418	,274	.	,159	,159	,180
		N	14	14	14	14	14	14
	Deforestación- A1	Coefficiente de correlación	,336	,846**	-,398	1,000	1,000**	,978**
		Sig. (bilateral)	,240	,000	,159	.	.	,000
		N	14	14	14	14	14	14
	Deforestación-A2	Coefficiente de correlación	,336	,846**	-,398	1,000**	1,000	,978**
		Sig. (bilateral)	,240	,000	,159	.	.	,000
		N	14	14	14	14	14	14
	Deforestación-A3	Coefficiente de correlación	,250	,897**	-,380	,978**	,978**	1,000
		Sig. (bilateral)	,390	,000	,180	,000	,000	.
		N	14	14	14	14	14	14

\*\*.. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

## LONGITUD DE SEMIMEANDRO Y DEFORESTACIÓN POR MAPE

### Correlaciones

			A1	A2	A3	Deforestación -A1	Deforestación -A2	Deforestación -A3
Rho de Spearman	A1	Coefficiente de correlación	1,000	,029	-,187	,310	,310	,223
		Sig. (bilateral)	.	,923	,523	,281	,281	,444
		N	14	14	14	14	14	14
	A2	Coefficiente de correlación	,029	1,000	,451	,648	,648	,704**
		Sig. (bilateral)	,923	.	,106	,012	,012	,005
		N	14	14	14	14	14	14
	A3	Coefficiente de correlación	-,187	,451	1,000	-,015	-,015	,043
		Sig. (bilateral)	,523	,106	.	,958	,958	,885
		N	14	14	14	14	14	14
Deforestación- A1	Coefficiente de correlación	Coefficiente de correlación	,310	,648	-,015	1,000	1,000**	,978**
		Sig. (bilateral)	,281	,012	,958	.	.	,000
		N	14	14	14	14	14	14
Deforestación-A2	Coefficiente de correlación	Coefficiente de correlación	,310	,648	-,015	1,000**	1,000	,978**
		Sig. (bilateral)	,281	,012	,958	.	.	,000
		N	14	14	14	14	14	14
Deforestación-A3	Coefficiente de correlación	Coefficiente de correlación	,223	,704**	,043	,978**	,978**	1,000
		Sig. (bilateral)	,444	,005	,885	,000	,000	.
		N	14	14	14	14	14	14

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

\*\*.. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

## PARAMETROS MORFODINÁMICOS

### EROSIÓN Y DEFORESTACIÓN POR MAPE

#### Correlaciones

			A1	A2	A3	Deforestación -A2	Deforestación -A1	Deforestación -A3
Rho de Spearman	A1	Coefficiente de correlación	1,000	,417	,867**	,067	,067	,139
		Sig. (bilateral)	.	,265	,002	,865	,865	,721
		N	9	9	9	9	9	9
	A2	Coefficiente de correlación	,417	1,000	,367	,350	,350	,479
		Sig. (bilateral)	,265	.	,332	,356	,356	,192
		N	9	9	9	9	9	9
	A3	Coefficiente de correlación	,867**	,367	1,000	-,017	-,017	,026
		Sig. (bilateral)	,002	,332	.	,966	,966	,947
		N	9	9	9	9	9	9
Deforestación-A2	Coefficiente de correlación	Coefficiente de correlación	,067	,350	-,017	1,000	1,000**	,957**
		Sig. (bilateral)	,865	,356	,966	.	.	,000
		N	9	9	9	9	9	9
Deforestación- A1	Coefficiente de correlación	Coefficiente de correlación	,067	,350	-,017	1,000**	1,000	,957**
		Sig. (bilateral)	,865	,356	,966	.	.	,000
		N	9	9	9	9	9	9
Deforestación-A3	Coefficiente de correlación	Coefficiente de correlación	,139	,479	,026	,957**	,957**	1,000
		Sig. (bilateral)	,721	,192	,947	,000	,000	.
		N	9	9	9	9	9	9

\*\*.. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

## DEPOSICIÓN Y DEFORESTACIÓN POR MAPE

			Correlaciones						
			A1	A2	A3	Deforestación - A1	Deforestación -A2	Deforestación -A3	
Rho de Spearman	A1	Coefficiente de correlación	1,000	,833**	,983**	,500	,500	,540	
		Sig. (bilateral)	.	,005	,000	,170	,170	,134	
		N	9	9	9	9	9	9	
	A2	Coefficiente de correlación	,833**	1,000	,867**	,467	,467	,426	
		Sig. (bilateral)	,005	.	,002	,205	,205	,252	
		N	9	9	9	9	9	9	
	A3	Coefficiente de correlación	,983**	,867**	1,000	,550	,550	,583	
		Sig. (bilateral)	,000	,002	.	,125	,125	,099	
		N	9	9	9	9	9	9	
	Deforestación- A1	Coefficiente de correlación	,500	,467	,550	1,000	1,000**	,957**	
		Sig. (bilateral)	,170	,205	,125	.	.	,000	
		N	9	9	9	9	9	9	
	Deforestación-A2	Coefficiente de correlación	,500	,467	,550	1,000**	1,000	,957**	
		Sig. (bilateral)	,170	,205	,125	.	.	,000	
		N	9	9	9	9	9	9	
	Deforestación-A3	Coefficiente de correlación	,540	,426	,583	,957**	,957**	1,000	
		Sig. (bilateral)	,134	,252	,099	,000	,000	.	
		N	9	9	9	9	9	9	

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

## MIGRACIÓN Y DEFORESTACIÓN POR MAPE

			Correlaciones						
			A1	A2	A3	Deforestación - A1	Deforestación -A2	Deforestación -A3	
Rho de Spearman	A1	Coefficiente de correlación	1,000	,783*	,717*	,167	,167	,392	
		Sig. (bilateral)	.	,013	,030	,668	,668	,297	
		N	9	9	9	9	9	9	
	A2	Coefficiente de correlación	,783*	1,000	,583	,317	,317	,470	
		Sig. (bilateral)	,013	.	,099	,406	,406	,202	
		N	9	9	9	9	9	9	
	A3	Coefficiente de correlación	,717*	,583	1,000	-,117	-,117	,009	
		Sig. (bilateral)	,030	,099	.	,765	,765	,982	
		N	9	9	9	9	9	9	
	Deforestación- A1	Coefficiente de correlación	,167	,317	-,117	1,000	1,000**	,957**	
		Sig. (bilateral)	,668	,406	,765	.	.	,000	
		N	9	9	9	9	9	9	
	Deforestación-A2	Coefficiente de correlación	,167	,317	-,117	1,000**	1,000	,957**	
		Sig. (bilateral)	,668	,406	,765	.	.	,000	
		N	9	9	9	9	9	9	
	Deforestación-A3	Coefficiente de correlación	,392	,470	,009	,957**	,957**	1,000	
		Sig. (bilateral)	,297	,202	,982	,000	,000	.	
		N	9	9	9	9	9	9	

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).