

Influencia de la minería aurífera aluvial en la geodinámica fluvial del río Madre de Dios, Amazonía peruana, en el periodo 1984-2020

Resumen de Investigación N° 04 | Marzo 2023

Palabras clave: Cambios morfológicos, teledetección, análisis multitemporal, ríos amazónicos, minería aluvial.



Puntos clave

- Este estudio ofrece el primer análisis cuantitativo de los cambios morfométricos y morfodinámicos en un tramo de 328 km del río Madre de Dios, y la evaluación de la posible influencia de la minería aluvial de oro durante un periodo de 36 años (1984-2020).
- Los tramos del río aguas abajo de la minería presentaron alteraciones en su dinámica natural, evidenciando que el impacto de la minería en los ríos se extiende más allá del área geográfica donde se realiza.
- El aumento en las tasas de erosión y deposición estuvo relacionado con el aumento de la deforestación causado por la actividad minera durante el periodo 2012-2020.
- La migración lateral del río disminuyó durante los periodos de mayor intensificación de deforestación minera respecto a los periodos con menor deforestación minera.
- Este estudio resalta la magnitud del impacto de la minería aurífera aluvial en la dinámica natural del río Madre de Dios, así como la importancia de monitorear la dinámica fluvial de los ríos amazónicos impactados por esta actividad.

Introducción

La excepcional biodiversidad de la región Madre de Dios en la Amazonía sudeste peruana es, en gran medida, creada y mantenida por la dinámica de sus ríos (Salo *et al.*, 1986). Por ello, la gran preocupación entre los tomadores de decisiones, la comunidad científica y los pobladores locales ante el hecho que la cuenca del río Madre de Dios (MDD), el principal río de la región, albergue operaciones de Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE) de oro por más de 50 años (Brack Egg *et al.*, 2011). Solo entre 1984 y el 2017, la MAPE deforestó aproximadamente 100 000 ha de bosque amazónico prístino en la cuenca del río MDD (Caballero Espejo *et al.*, 2018).

La MAPE en la cuenca del río Madre de Dios se realiza primariamente de manera aluvial, es decir, en las riberas de los ríos y en sus paleocauces. El proceso de extracción de minerales consiste principalmente en la remoción de los sedimentos del fondo y de las márgenes haciendo uso de bombas de succión hidráulicas a alta presión, lo que provoca la agradación y traslocación de sedimentos de mayor tamaño en las orillas del río (Brack Egg *et al.*, 2011). Esto, sumado a la deforestación asociada a la actividad, puede alterar la dinámica fluvial natural de los ríos al alterar el ancho, la profundidad, la sinuosidad y la estabilidad del canal (Morais *et al.*, 2016).

El incremento de la carga de sedimentos presenta también efectos ecológicos, ya que modifican el hábitat de los peces y se asocia con condiciones bióticas deficientes (Kukuła & Bylak, 2020). El aumento de la sedimentación y turbidez del agua disminuye la supervivencia de huevos y larvas de peces, reduce la producción primaria local; y desencadena una cascada de impactos en las redes tróficas (Goulding *et al.*, 2019). En cada nivel trófico, la concentración excesiva de sedimentos puede causar efectos directos (mortalidad, reducción de la función fisiológica y alienación del hábitat) e indirectos (disminución

de las tasas de crecimiento y reproducción) vinculados a la reducción del suministro de alimentos (Gebrekiros, 2016).

Las variaciones temporales en los parámetros morfológicos fluviales son conocidas y han sido ampliamente estudiadas en otras latitudes (Morais *et al.* 2016; Gutierrez-Cori *et al.* 2021). Sin embargo, hasta donde se tiene conocimiento del tema, aún no se han realizado estudios que aborden los cambios morfológicos por actividades mineras en ríos tropicales. Más aún, no se conocen estudios cuantitativos sobre los cambios morfológicos en ríos con presencia de MAPE como el río Madre de Dios.

Frente a esta grave problemática ambiental, el Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC), junto con el Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), y en colaboración con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), realizaron un estudio cuantitativo de los cambios morfológicos ocurridos en el río Madre de Dios durante el periodo 1984-2020, con el objetivo de caracterizar los cambios en la morfodinámica planimétrica usando análisis espacial de datos de sensoramiento remoto y examinar la relación de estos cambios con la evolución de las actividades mineras en la región. El estudio se realizó en el marco del proyecto “River Mining: impactos de la minería aluvial en la cuenca del río Madre de Dios - efectos físicos y planeamiento para su mitigación”.

Área de estudio

El área de estudio abarcó 328 km del río Madre de Dios (MDD) ubicado en el departamento de Madre de Dios, Perú y su valle de inundación (310 362 ha), desde la confluencia del río Manu con el río Piquen [12° 31' 19.2" S 70° 27' 39.6" W] hasta su confluencia con el río Heath [12° 28' 22.8" S 68° 39' 0.0" W] en la frontera Perú - Bolivia (Figura 1).

Delimitación de los tramos de río para el análisis espacial

El tramo estudiado del río MDD se dividió en cuatro zonas, (A1, A2, A3 y A4, Figura 1), en función del área deforestada por MAPE en el valle de inundación en el periodo 1984-2020, según el estudio de (Caballero Espejo *et al.*, 2018). La zona A1 (con aproximadamente 2 ha del valle de inundación deforestado por minería) abarcó la

zona alta del río MDD y se consideró como zona de referencia o control; es decir, sin impacto por deforestación de la MAPE. La zona A2 (14 014 ha del valle deforestado) se consideró con mediano impacto y la zona A3 (23 527 ha) se consideró de alto impacto por tener la mayor área deforestada por minería. La zona A4 (113 ha), abarcó la zona baja del río MDD y se consideró de bajo impacto por deforestación en el valle.

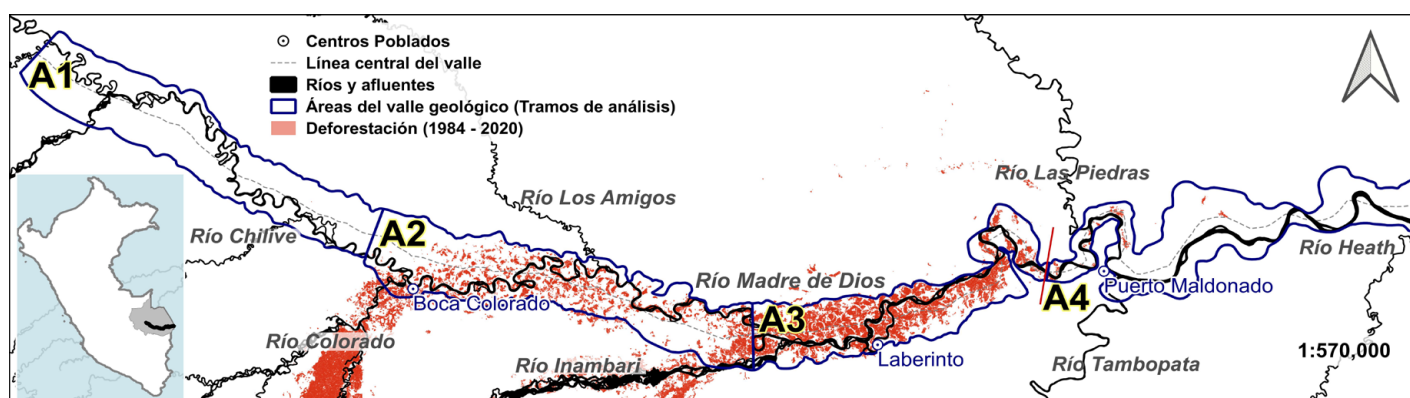


Figura 1. Mapa del río Madre de Dios indicando las cuatro zonas de estudio (A1, A2, A3 y A4).

Metodología

Análisis temporal

El periodo de análisis se seleccionó según el incremento de la actividad minera en el área de estudio. Tomando como referencia el estudio realizado por (Caballero Espejo *et al.*, 2018). Se consideraron los años 1984, 1990 y 1996 debido a que en estos no existían vías de acceso hacia las principales zonas mineras lo cual limitaba su explotación (Van Dijck, 2013), por lo que se considera como periodo antes de la minería o de bajo impacto, siendo el área acumulada de deforestación dentro del valle de inundación 825 ha, lo cual representa el 1% del área total del mismo.

Los años 2001, 2006, 2012 y 2020 se consideraron de alto impacto, puesto que en estos años se intensificó la actividad minera,

siendo el área deforestada acumulada el 12.4% del área del valle de inundación, debido a la apertura de accesos y a la creciente demanda del oro a nivel mundial (Figura 2A).

Los meses analizados en cada año corresponden al periodo de transición de creciente y vaciante (marzo-octubre), en el cual la actividad minera se intensifica por la facilidad de acceso al río debido al menor caudal (Fraser, 2009) (Figura 2B). No se analizaron datos de la temporada de creciente (noviembre-febrero) debido a que: (1) el río ocupa gran parte del valle de inundación durante dicha temporada y el objetivo era obtener el área promedio del espejo de agua y (2) las imágenes satelitales disponibles presentaban un mayor porcentaje de nubosidad que afecta la calidad requerida para el estudio.

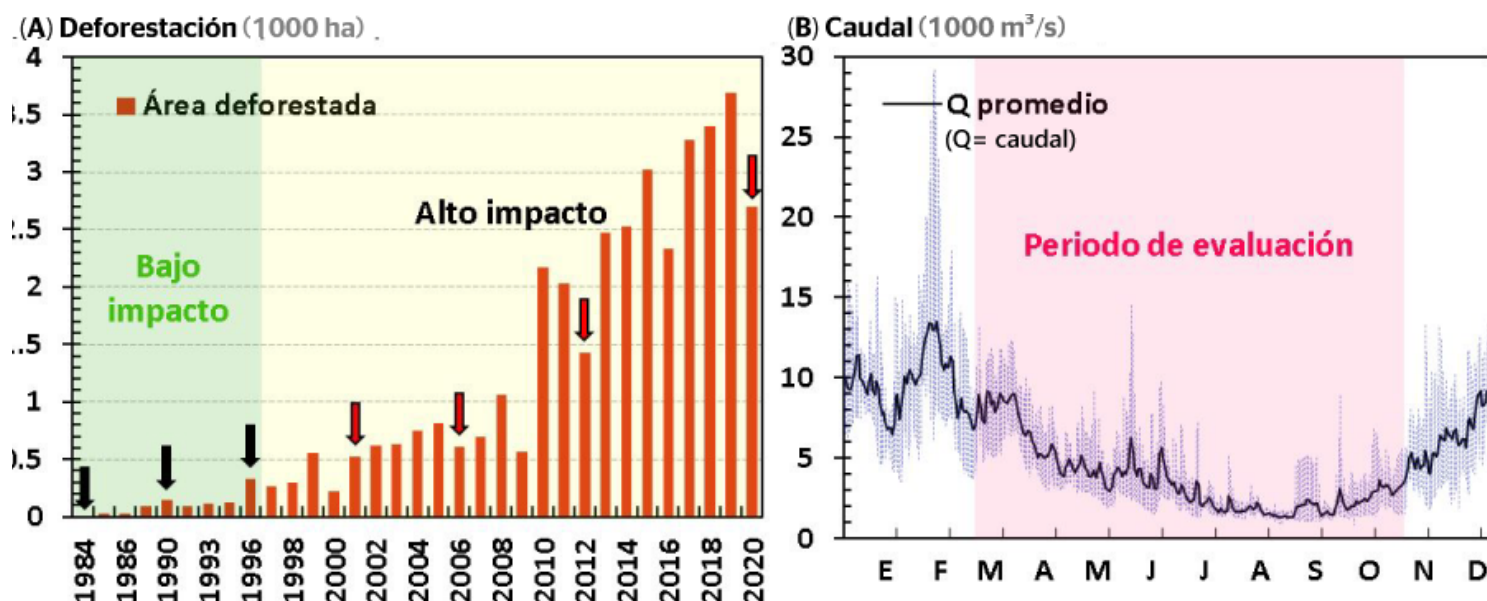


Figura 2. (A): Área deforestada anualmente dentro del valle de inundación del río Madre de Dios (MDD). Fuente: Actualizado a partir de Caballero Espejo *et al.*, 2018 **(B)** Ciclo hidrológico anual promedio del río MDD. Fuente: ANA, 2021.

En la Figura 2a las flechas negras y rojas indican los años considerados de bajo y alto impacto por actividades mineras, respectivamente”

Procesamiento de la información

El análisis de los parámetros morfológicos se realizó en tres etapas utilizando como referencia la *Guía metodológica para la caracterización planimétrica y multitemporal de ríos andino-amazónicos* (CITA-UTEC, 2021) y añadiendo el análisis del impacto antropogénico a través de la evaluación temporal de las áreas deforestadas a causa de la minería en el valle de inundación (Figura 3).

1. Preprocesamiento: Se desarrolló utilizando la plataforma Google Earth Engine (GEE), la cual permite obtener un mosaico de imágenes satelitales a partir del repositorio de imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 (resolución espacial: 30 m, resolución temporal: 16 días, nubosidad <10%). La delimitación y diferenciación del cuerpo de agua se desarrolló a través de

la aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) que ayuda a diferenciar el cuerpo de agua (Frias *et al.*, 2015).

2. Procesamiento: Consistió en la poligonización del río de cada año seleccionado para obtener la línea central y los puntos de inflexión necesarios para la obtención y el análisis de los parámetros morfológicos.

3. Postprocesamiento: Comprendió el cálculo de dos tipos de parámetros morfológicos como indicadores de cambios en la forma del cauce del río a lo largo de los años estudiados: (1) parámetros morfométricos (longitud de semi meandro, longitud de onda de semi meandro, sinuosidad, ancho promedio del cauce) y (2) parámetros morfodinámicos (migración y erosión - deposición).

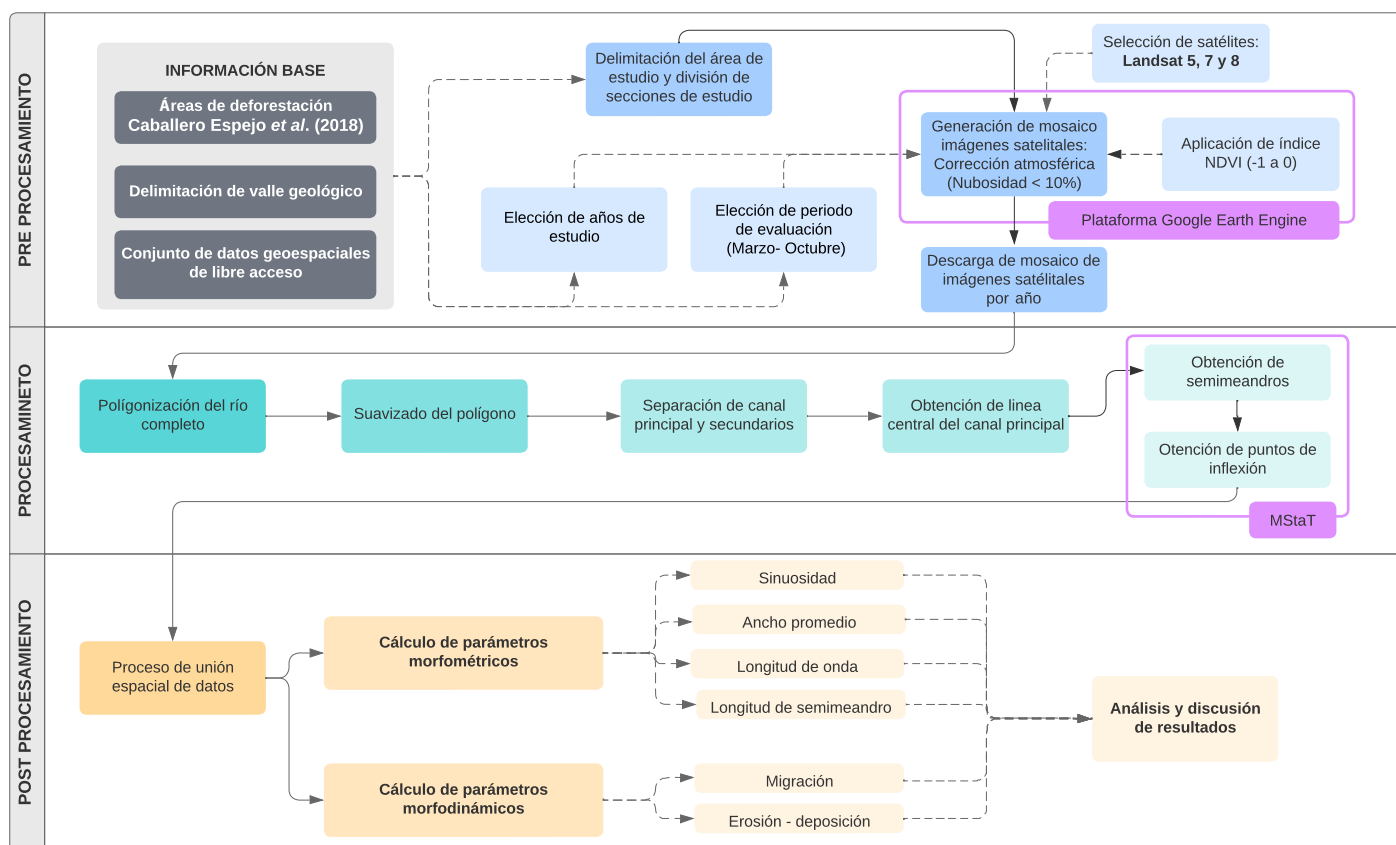


Figura 3. Flujograma de procesamiento de información. Adaptado de CITA-UTEC (2021).

Parámetros geomorfológicos (morfométricos y morfodinámicos)

Parámetros morfométricos

La longitud de onda (Arc), la longitud de los semi meandro (L), el ancho promedio del canal (A) y la sinuosidad (S) son parámetros métricos que proporcionan información sobre los cambios temporales de un río (Figura 4). Valores más altos de L y Arc indican mayor estabilidad en el río, es decir, menor probabilidad de que ocurra un corte de meandro. La sinuosidad, definida como la relación entre la longitud de onda y la longitud de semi meandro, indica la forma y el grado de dinamismo del canal (Motta, 2012). Por otro lado, la variabilidad del ancho de los canales (A) se presume estar relacionada con el grado de la actividad morfológica natural del río, la cual puede ser modificada por cambios en la forma, la distribución y el aporte de los sedimentos en las márgenes del río (Luchi, 2012).

Parámetros morfodinámicos

La migración neta del cauce en los ríos naturales es el resultado del desplazamiento lateral de ambas orillas del cauce, sujetas a diferentes tasas de erosión y deposición que son variables en el espacio e intermitentes en el tiempo (Hasegawa, 1989). El proceso de migración puede representarse como un proceso continuo para las escalas de tiempo largas de la evolución de la forma del meandro. En ríos meándricos, como el Madre de Dios, las dos orillas opuestas se desplazan lateralmente a la misma velocidad, manteniendo la anchura del canal constante en el tiempo y en el espacio (Luchi *et al.*, 2012). Las tasas de migración del canal cambian con la progresión del crecimiento de la curvatura y la sinuosidad y presentan un máximo a una determinada sinuosidad del río (Friedkin, 1945).

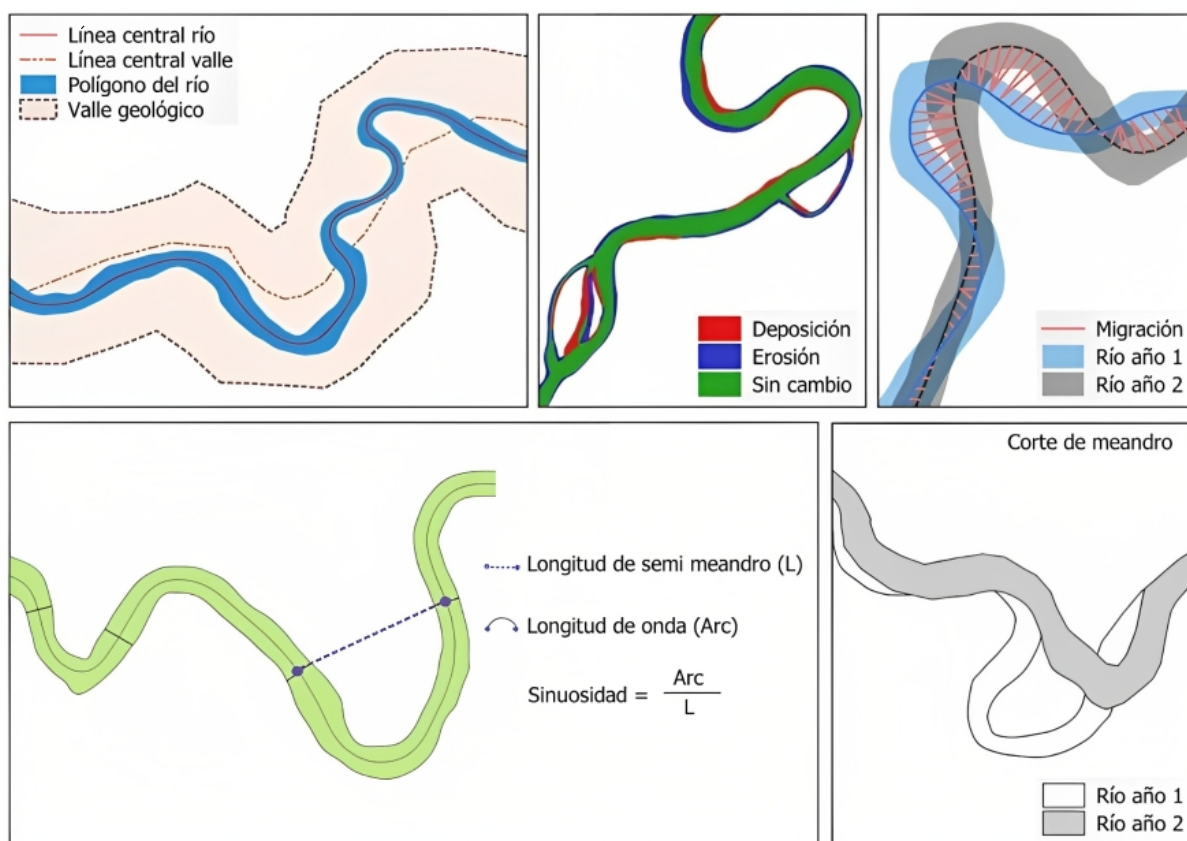


Figura 4. Parámetros morfodinámicos analizados en este estudio.
Polígono del río y su valle de inundación con sus respectivas líneas centrales.
Áreas de deposición (rojo), erosión (azul), y sin cambios (verde) entre dos años de estudio.
Vectores de migración del río entre diferentes años.
Parámetros (Arc, L) para el cálculo de la sinuosidad.
Cortes de meandros ocurridos entre el año 1 (blanco) y el año 3 (gris).

Resultados

Análisis de la evolución de los parámetros morfométricos (L, Arc, A)

Sección A1. Como se muestra en la Figura 5, la sección A1, aguas arriba de las actividades de MAPE, presentó meandros más pequeños y angostos que las demás secciones aguas abajo, lo que se ve reflejado en un mayor número de semi meandros ($n=83$). Los valores de L y Arc en esta sección presentaron un incremento paulatino a lo largo del cauce. En esta sección del río no se detectó presencia de minería durante todo el periodo de evaluación, por lo que se puede deducir que las variaciones observadas en los parámetros morfométricos durante el periodo

2001-2020 respondieron a dinámicas fluviales naturales. Respecto al ancho promedio, hubo un incremento en la sección A1 entre el periodo con bajo impacto de la minería (periodo 1984-1996) y el periodo con alto impacto por minería (2001-2020). El incremento del ancho promedio del río fue gradual hasta la confluencia del río MDD y su tributario Colorado, lo que coincide con la variabilidad de la longitud (L) y amplitud de los semi meandros.

Sección A2 y A3. Las secciones A2 y A3 presentaron un menor número de semi meandros que la sección A1 (58 y 33, respectivamente), aunque presentaron mayores longitudes y anchos promedio. También se observó un

menor número de cortes de meandro (5 y 1 en las secciones A2 y A3, respectivamente). Ambas secciones también presentaron incrementos en la longitud de semi meandro (L) y de onda (Arc) a lo largo del recorrido. No se observaron diferencias marcadas en los parámetros L y Arc al comparar los periodos con bajo (1984-1996) y alto impacto de la minería (2001-2020). Las únicas variaciones que podrían considerarse evidentes en L se presentaron en el límite de las secciones A2 y A3, las cuales podrían relacionarse con los dos cortes de meandro observados aguas arriba de la confluencia del río MDD con su tributario Inambari (Km 145).

Asimismo, en la sección A3, el tramo comprendido entre la confluencia de los ríos MDD e Inambari y el sector denominado Laberinto, se observó una reducción gradual del ancho del cauce del río, lo cual podría asociarse al incremento de L y Arc en

este mismo tramo, y a la aparición de un mayor número de canales secundarios. La disminución del ancho del río en las zonas donde se puede apreciar un mayor incremento de actividad minera en el valle podría asociarse a una profundización del canal o a un proceso de canalización artificial posiblemente relacionado a la MAPE.

Sección A4. Se presentó una mínima variabilidad temporal en todos los parámetros durante los dos periodos de evaluación en la sección A4. Esta sección presentó el menor número de semi meandros (27) de todas las secciones, y fueron los más largos, anchos y estables, independientemente de los impactos de la minería sobre el río en las otras secciones. El incremento de los valores de longitud de onda a medida que su ancho aumenta son propios de corrientes naturales de ríos de un solo canal.

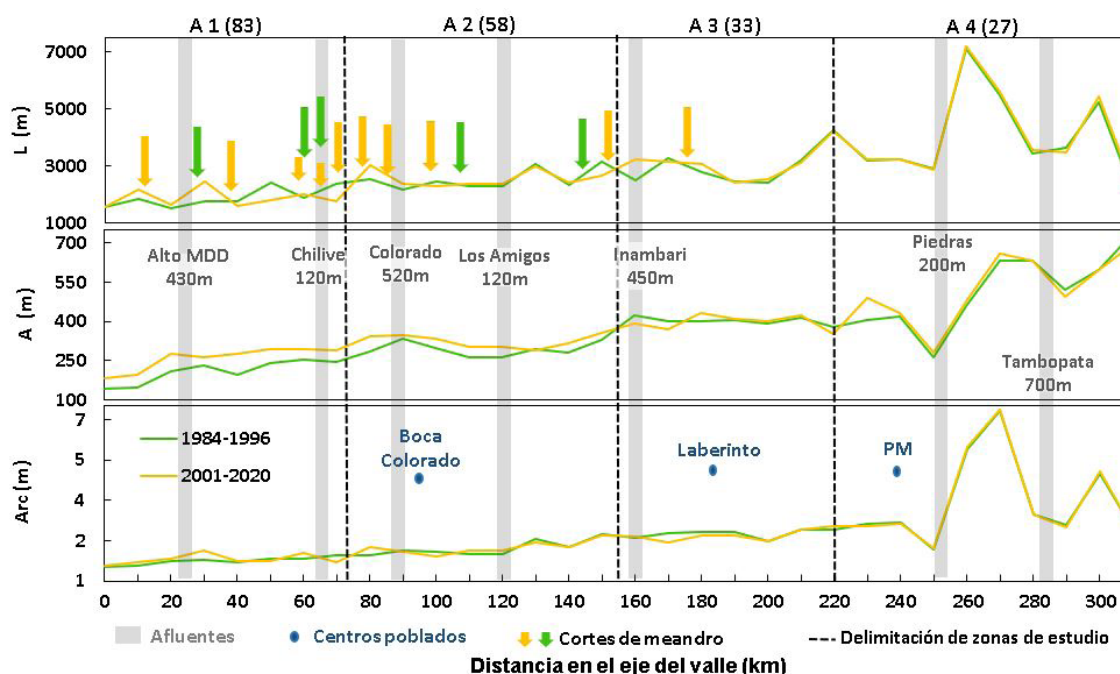


Figura 5. Variaciones temporales y espaciales en el promedio de longitud de semi meandro (L), ancho promedio (A) y longitud de onda (Arc) a lo largo del río Madre de Dios. La línea amarilla representa el periodo con alto impacto por minería (2001-2020) y la línea verde el periodo con bajo impacto (1984-1996). Las flechas representan los cortes de meandro ocurridos en los periodos con alto y bajo impacto, respectivamente. Las barras verticales grises indican los afluentes del río MDD dentro del área de estudio. Los números entre paréntesis al costado de los nombres de cada sección indican el número de semi meandros.

Análisis de la evolución de la sinuosidad (S)

La sinuosidad del río MDD tuvo una configuración de meandros diferente en cada una de las secciones de estudio (Figura 6A). Las secciones A1 (S promedio = 1.52) y A2 (S promedio = 1.52) presentaron una mayor sinuosidad promedio que las secciones A3 (S promedio = 1.32) y A4 (S promedio = 1.24).

Sección A1. En el período 2001-2020, la sección A1 tuvo cambios importantes en su morfología, ajustando los valores de sinuosidad y transformando sus meandros a unos más amplios y menos definidos con respecto al período 1984-1996. Esto responde a una menor estabilidad del canal y a cortes de meandros, lo cual se puede observar con mayor detalle en la Figura 6B-zona A. Estos cambios pueden relacionarse con la dinámica natural del río, ya que no se observa deforestación por minería durante ambos periodos de evaluación.

Sección A2. La sección A2 presentó un comportamiento similar que la sección A1 en cuanto a los patrones de meandros. Sin embargo, a pesar de que en esta sección las áreas de deforestación asociadas a la minería aumentan en el período de alto impacto (2001-2020), no se puede asociar a una influencia directa de esta actividad sobre la morfología del río en esta escala de estudio. No hay diferencia entre los valores promedio de S en este período de alto impacto (S promedio = 1.52) y los del período de 1984-1996 de bajo impacto (S promedio = 1.52). La zona b (Figura 6B) es un tramo del río en el límite

de A2 y A3 que presentó 2 cortes de meandro, los cuales sumados al impacto de la deforestación por minería podrían estar relacionados a ajustes de la sinuosidad en ambos periodos.

Sección A3. En la sección A3, desde el km 154 hasta el km 190, la sinuosidad promedio en el período 2001-2020 (S promedio = 1.31) fue mayor a la del período 1984-1996 (S promedio = 1.25), lo que coincide con que estas zonas presentaron las mayores áreas acumuladas de deforestación por minería y que ciertos tramos del río en esta zona presentaron cambios locales como la reducción del ancho promedio del canal principal y la aparición de un mayor número de canales secundarios (zonas c y d en Figura 6B).

Sección A4. En la sección A4, la sinuosidad en los periodos de bajo y alto impacto no presentaron diferencias significativas (S promedio = 1.25 y 1.23, respectivamente). Esta sección presentó un patrón de canales con baja sinuosidad durante todo el período de evaluación, lo que corresponde a los procesos de estabilización natural y el confinamiento geológico propio de la sección.

En resumen, no se encontró evidencias claras de una influencia de la minería en los parámetros morfométricos a lo largo de los 328 kilómetros estudiados. Sin embargo, se identificaron cambios morfológicos leves relacionados con la minería, principalmente en las zonas donde la actividad minera fue más intensa.



Fotografías aéreas de la zona minera Huepetuhe.

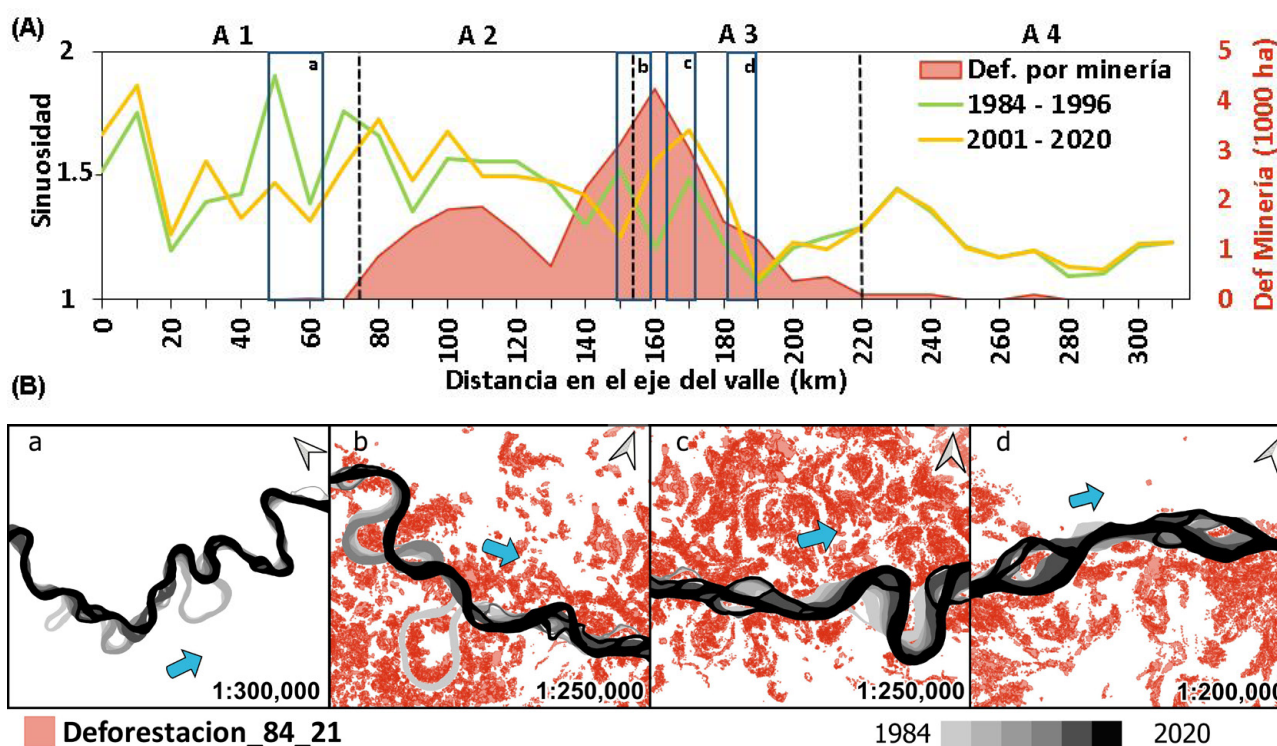


Figura 6. La Figura 6A representa la variación espacial y temporal de la sinuosidad del río Madre de Dios mientras que la figura 6B muestra la evolución de la deforestación por minería y la dinámica del río en las áreas a, b, c y d en el periodo 1984-2020.

Análisis de la evolución de los parámetros morfodinámicos (migración y erosión - deposición)

Tasas de migración

Sección A1. La sección A1 presentó una tasa media de migración (TMM) de ~ 10 m/año para el periodo de bajo impacto y ~ 12 m/año para el periodo de alto impacto. Estos valores se encuentran por debajo del promedio de ríos amazónicos de origen andino (Huallaga = ~ 25 m/año y Ucayali = ~ 50 m/año), ya que estos se ubican en un área con menor confinamiento del valle geológico (CITA-UTEC, 2021). Los cambios en el desplazamiento lateral del canal (migración) en los diferentes puntos de esta sección (picos en la Figura 7A) indican la ocurrencia de cortes de meandros en ambos periodos de evaluación. Se considera un comportamiento normal o esperado de un río de estas características naturales.

Sección A2. En la sección A2, el promedio de la TMM fue de ~ 9 m/año para el periodo de bajo impacto y de ~ 12 m/año para el periodo de alto impacto. Durante el periodo de bajo impacto se observó un aumento gradual de la migración extendiéndose hasta el 2006. Posteriormente se observó una disminución pronunciada durante los periodos 2006-2012 y 2012-2020 (12.4 y 8.2. m/año) lo que podría responder al proceso de estabilización del canal provocado por la actividad minera.

Sección A3. La sección A3 presentó la mayor TMM tanto en el periodo de bajo impacto (14.5 m/año) como en el periodo alto impacto (13.4 m/año), con respecto a las demás secciones. Se identificó una ligera disminución de la TMM entre el periodo de bajo y alto impacto, las cuales estuvieron focalizadas en los primeros kilómetros de la sección A3 (i.e. entre la confluencia con el

río Inambari y el centro poblado Laberinto), donde también se observaron los valores más altos de deforestación acumulada por minería y el ingreso del río Inambari, el cual está fuertemente impactado por actividades de MAPE (Figura 7A).

Sección A4. La sección A4 se identificó como la sección con mayor estabilidad en su cauce con una TMM de 7.1 m/año en el periodo de bajo impacto (1984-1996). En el periodo de alto impacto por minería (2001-2012) se observaron valores de migración cercanos a 0 entre los km 264 y km 297, donde no existe presencia de MAPE; esto podría indicar que el impacto de la minería también se extiende hasta por 33 km aguas abajo de la zona directamente afectada. La tasa de migración después de la confluencia con el río Tambopata (km 297) se incrementa a valores comparables con el periodo de bajo impacto por minería, evidenciando la capacidad de recuperación del río tras el impacto de la MAPE.

Asimismo, en la Figura 7B se puede observar el análisis de la influencia del incremento de áreas deforestadas por minería en el valle de inundación sobre las tasas de migración en las zonas con presencia de minería (Km 88-264).

Se logró identificar que en los periodos de bajo impacto el río tuvo una capacidad de migración lateral máxima de hasta 30 m/año, mientras que en el periodo de alto impacto se observó una disminución gradual de la migración principalmente en las áreas con mayor área deforestada, registrando en algunos casos valores cercanos a cero.

Los resultados de este estudio sugieren que el proceso natural de migración del río MDD podría verse influenciado por la actividad minera, presentando incluso un posible impacto aguas abajo de la zona directamente afectada. La disminución de la tasa de migración del río podría deberse a la alteración de la granulometría (textura) natural de los sedimentos de las márgenes del canal durante el proceso de extracción del oro con bombas de succión. Las operaciones con bombas de succión amplían horizontalmente el espacio de las playas y colmatan el cauce de los ríos al remover los sedimentos del lecho y formar barreras de hasta 5 m de altura con sedimentos del tamaño de cantos rodados (Figura 7C), esto podría incrementar el riesgo de inundaciones y afectar a la navegabilidad, además puede afectar de manera directa o indirecta los ecosistemas acuáticos (Heritage *et al.*, 2015).



Minería altamente mecanizada en el valle de inundación de río Madre de Dios.

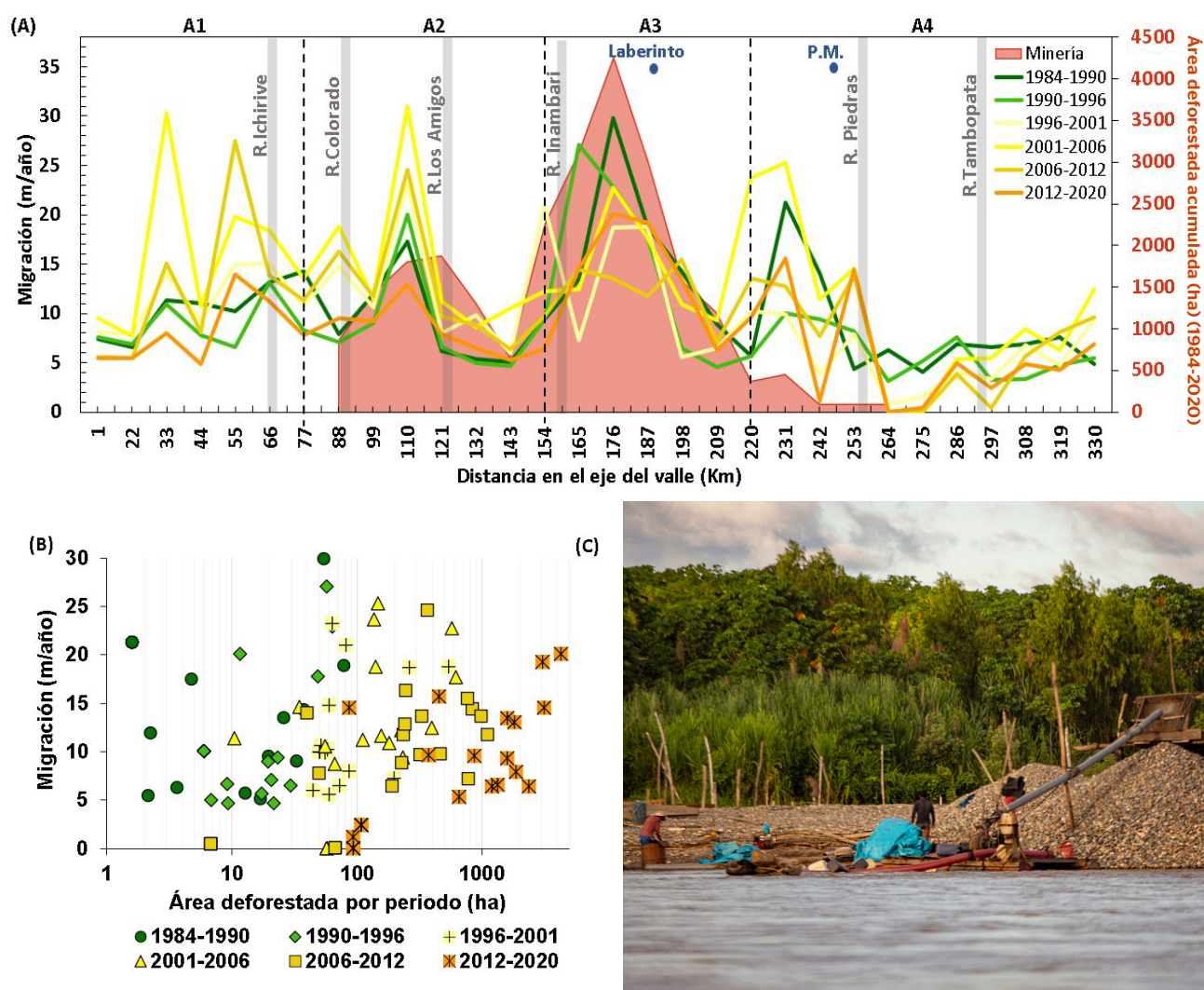


Figura 7. (A) Variación en las tasas de migración (m/año) del río Madre de Dios en los periodos de estudio. Los puntos en color azul indican la ubicación de los centros poblados Laberinto y Puerto Maldonado (P.M.) y las barras grises indican las confluencias con los principales ríos tributarios **(B)** Dispersión de la migración promedio del río Madre de Dios cada 10 km correlacionada con el área deforestada acumulada en los seis periodos de estudio. Los iconos de colores verdes y los iconos de colores amarillo-naranja, representan los periodos con bajo y alto impacto por minería, respectivamente. **(C)** Fotografía aérea de zona minera en el río Madre de Dios, a 10 km de la confluencia con el río Inambari.

Erosión - deposición de sedimentos

El análisis de los efectos de la minería en el proceso de erosión-deposición del río MDD se enfocó en las secciones A2, A3 y A4 (tramo km 80-240 en el eje del valle), consideradas las más impactadas por la MAPE debido a que presentaron deforestación por minería en su valle de inundación. El análisis demostró que las mayores áreas de erosión y deposición en todos los periodos de evaluación se presentaron en

el km 100 y entre los km 140 y 180 (Figura 8). El km 100 mantuvo su dinámica durante todo el periodo de evaluación, con tasas de erosión y deposición relativamente altas.

En este punto, la deforestación por minería alcanzó un valor máximo de 1723 ha de área de valle deforestado en el periodo 2012-2020. En el tramo entre los km 140 y 180 la variación en las tasas de erosión y deposición estuvieron

posiblemente influenciadas por el incremento de la deforestación por minería sobre el valle de inundación. En este tramo, el periodo 2012-2020 presentó las mayores tasas de erosión y deposición de todos los periodos de estudio, siendo el máximo las correspondientes al km 170, donde se registraron valores de 69 ha/año de erosión y 100 ha/año de deposición. La tasa de deposición en el periodo 2012-2020 fue un 97% más alta que la del periodo 2006-2012 (Figura 8), lo que coincide con la intensificación de la deforestación por minería en el valle geológico y en las subcuencas afluentes del río MDD.

En conclusión, este análisis sugiere que el aumento en las tasas de erosión y deposición en el río MDD durante el periodo 2012-2020

estaría directamente relacionado con el incremento de la deforestación ocasionada por la intensificación de la minería. La deforestación asociada a las actividades de minería de oro aluvial parecen haber alterado la morfología y el ciclo hidrosedimentológico del río MDD en los periodos estudiados. Al incrementar la erosión del suelo y la escorrentía superficial, además de exponer el material del fondo durante el proceso de succión con bombas en el valle de inundación del río, se favorece un incremento del proceso de erosión-deposición a nivel local. Estos hallazgos confirman lo que ha sido reportado por estudios previos dentro y fuera de la región de MDD (Mol and Ouboter 2004; Diringier *et al.*, 2020; Anto Rubio, 2020; Diaz, 2021; Fianko, 2021).

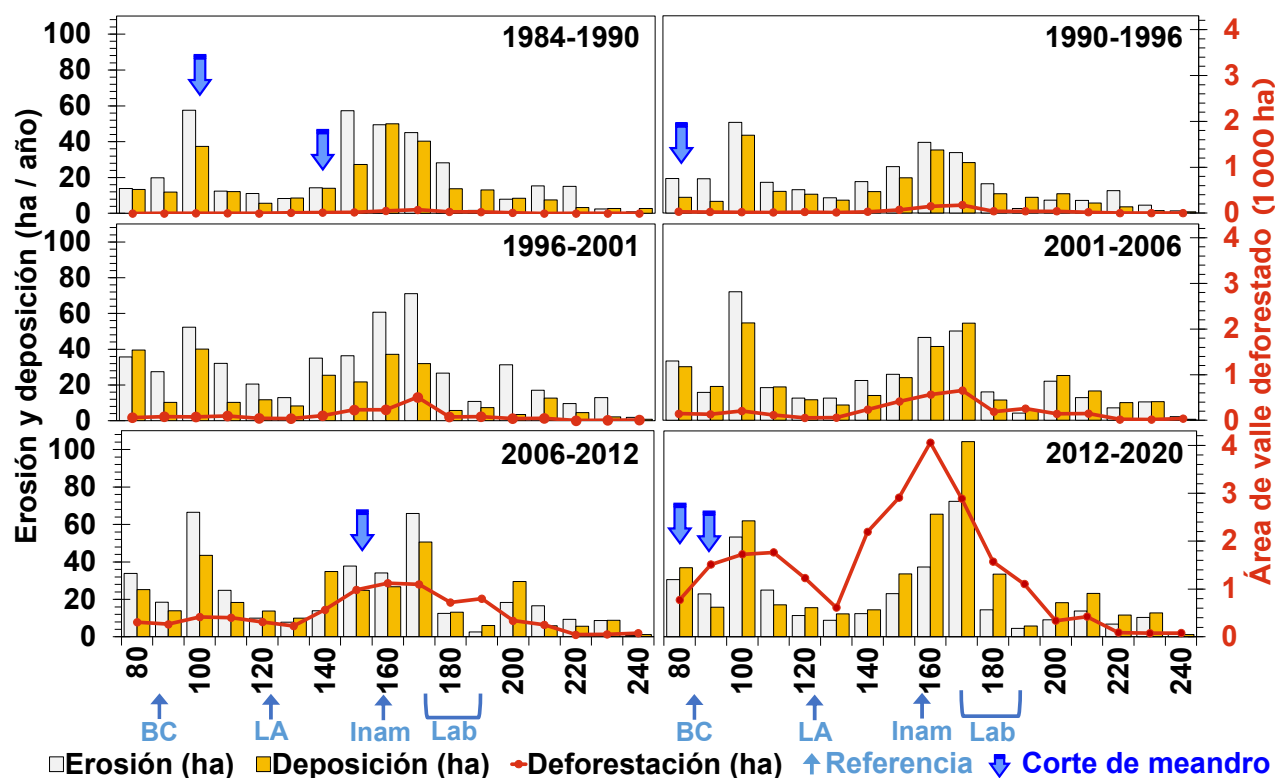


Figura 8. Tasas de erosión (gris) y deposición (naranja) a lo largo del tramo km 80-240 (A2, A3 y A4) del río Madre de Dios en los diferentes periodos de estudio. La línea roja indica el área de deforestación por minería y las flechas azules indican los cortes de meandro. Se indican los puntos de confluencia con otros ríos y ubicación de centros poblados (BC: Boca Colorado, LA: Los Amigos, Inam: Inambari, Lab: Laberinto).

Conclusiones

- El aumento en las tasas de erosión y deposición en el río Madre de Dios durante el periodo 2012-2020 está posiblemente relacionado con el aumento de la deforestación causada por la minería aurífera aluvial.
- La evaluación de los parámetros morfológicos (morfométricos y morfodinámicos) indica que el río Madre de Dios es un río con una fuerte dinámica fluvial natural pero que se ve afectada de forma desigual en el espacio y el tiempo por la minería que se lleva a cabo en su cauce.
- La sección del río aguas abajo de la minería presentó alteraciones en su dinámica natural, como en el caso de la estabilidad del cauce, indicando que el impacto de la minería en la dinámica de los ríos se extiende más allá del área geográfica donde se realiza. En comparación, las secciones del río aguas arriba de la minería presentaron una dinámica natural con altas tasas de migración del cauce.
- El río Madre de Dios presentó cambios morfométricos en algunas de las zonas donde la actividad minera fue más intensa; sin embargo, no se encontró una relación directa entre los parámetros morfométricos y la deforestación por minería a lo largo de los casi 330 km del tramo de estudio. Futuros estudios morfodinámicos deben considerar incluir la erosión lateral, la simetría del cauce y la geología del valle como variables de análisis, así como la recopilación de datos de campo, como la profundidad y la forma de sección transversal.
- El proceso de migración lateral del río Madre de Dios disminuyó durante los periodos de mayor intensificación de deforestación por la MAPE. Si bien esta disminución no se puede asociar únicamente a la actividad minera, es necesario señalar que la remoción de los sedimentos de lecho para la extracción del mineral y el consecuente cambio en la granulometría de los sedimentos en las márgenes podría tener un significativo impacto a escala local.
- Los procesos de erosión y deposición en el río Madre de Dios aumentaron en los tramos del río con mayor presencia de minería, por lo que se puede relacionar con el aumento de la deforestación por esta actividad. Los valores más altos de erosión y deposición se observaron en el periodo 2012-2020.
- Los hallazgos de este primer estudio que analizó la relación entre la minería artesanal de oro y los cambios en la morfología y las características sedimentarias del río Madre de Dios durante un periodo de 36 años (1984-2020) resalta la magnitud del efecto potencial de la minería en ecosistemas acuáticos en la cuenca amazónica.
- Este estudio resalta la importancia de monitorear a la dinámica fluvial natural de los ríos amazónicos impactados por minería aluvial. Conservar la dinámica natural de los ríos es fundamental para el sustento de la biodiversidad y las formas de vida en la Amazonía.

Referencias bibliográficas

Anto Rubio, M. del P. (2020). Impacto de la minería y tala ilegal en el desarrollo y la Seguridad Nacional. *Revista De Ciencia E Investigación En Defensa - CAEN*.

Brack Egg, A., Ipenza Peralta, C. A., Álvarez, J., & Sotero, V. (2011). *Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio: Una bomba de tiempo*. Ministerio del Ambiente - MINAM.

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

CITA-UTEC. (2021). *RÍOS DANZANTES: Guías metodológicas para el desarrollo de la línea base física de los ríos en Andes-Amazonía* (1st ed.). Perú.

Diaz, J. (2021). *Ecologies of Gold: Understanding the social, political, and ecological impacts of mercury use in informal, small-scale gold mining in Madre de Dios, Peru*. Presented at the UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations.

Diringer, S. E., Berky, A. J., Marani, M., Ortiz, E. J., Karatum, O., Plata, D. L., ... Hsu-Kim, H. (2020). Deforestation Due to Artisanal and Small-Scale Gold Mining Exacerbates Soil and Mercury Mobilization in Madre de Dios, Peru. *Environmental Science & Technology*, 54(1), 286-296. doi:10.1021/acs.est.9b06620

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

Fraser, B. (2009). Peruvian gold rush threatens health and the environment. *Environmental Science & Technology*, 43(19), 7162-7164. doi: 10.1021/es902347z

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. doi: 10.1002/2014WR015836

Friedkin, J. F. (1945). A laboratory study of the meandering of alluvial rivers. *A Laboratory Study of the Meandering of Alluvial Rivers*.

Goulding, M., Venticinque, E., Ribeiro, M. L. de B., Barthem, R. B., Leite, R. G., Forsberg, B., ... Cañas, C. (2019). Ecosystem-based management of Amazon fisheries and wetlands. *Fish and Fisheries*, 20(1), 138-158. doi: 10.1111/faf.12328

Gutierrez-Cori, O., Espinoza, J. C., Li, L., Wongchuig, S., Arias, P. A., Ronchail, J., & Segura, H. (2021). The hydroclimate-vegetation relationship in the southwestern Amazon

during the last 20 years. *Earth and Space Science Open Archive*. doi: 10.1002/essoar.105063581

Hasegawa, K. (1989). Universal bank erosion coefficient for meandering rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(6), 744-765. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:6(744)

Heritage, G., & Entwistle, N. (2020). Impacts of river engineering on river channel behaviour: implications for managing downstream flood risk. *Water*, 12(5), 1355. doi: 10.3390/w12051355

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

Luchi, R., Bolla Pittaluga, M., & Seminara, G. (2012). Spatial width oscillations in meandering rivers at equilibrium. *Water Resources Research*, 48(5). doi:10.1029/2011WR011117

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*, 201-214.

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. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.07.026

Motta, D., Abad, J. D., Langendoen, E. J., & García, M. H. (2012). The effects of floodplain soil heterogeneity on meander planform shape. *Water Resources Research*, 48(9). doi:10.1029/2011WR011601

Salo, J., Kalliola, R., Häkkinen, I., Mäkinen, Y., Niemelä, P., Puhakka, M., & Coley, P. D. (1986). River dynamics and the diversity of Amazon lowland forest. *Nature*, 322(6076), 254-258. doi:10.1038/322254a0

Tesfay Gebrekiros, S. (2016). Factors affecting stream fish community composition and habitat suitability. *Journal of Aquaculture & Marine Biology*, 4(2). doi: 10.15406/jamb.2016.04.00076

Van Dijck, P. (2013). *The impact of the IIRSA road infrastructure programme on amazonia*. Routledge. doi: 10.4324/9780203084021

Wohl, E., Bledsoe, B. P., Jacobson, R. B., Poff, N. L., Rathburn, S. L., Walters, D. M., & Wilcox, A. C. (2015). The natural sediment regime in rivers: broadening the foundation for ecosystem management. *Bioscience*, 65(4), 358-371. doi: 10.1093/biosci/biv002

Autores

Yulissa Estrada. Líder del grupo de trabajo Sensoramiento Remoto del proyecto River Mining y Coordinadora del Laboratorio de Calidad de Aguas y Sedimentos del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC).

Elisa Consuelo Portocarrero Trigoso. Asistente de Investigación y Coordinadora Lógica y Administrativa del proyecto River Mining del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC).

María Paz García Veramatus. Practicante Real Life Experience (RLE) del proyecto River Mining del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC).

Camila Timana Mendoza. Practicante Real Life Experience (RLE) del proyecto River Mining del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC).

Isabel Quintana Cobo. Investigadora/Consultora externa del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC). Especialista en Cambio Climático y Dinámica fluvial amazónica

Jorge Martin Pillaca Ortiz. Responsable del área SIG & Drones del Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA)

Joshua Castro. Asistente de Investigación de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). Especialista en Sensoramiento Remoto e Hidrología

Edwin Luis Quispe Flores. Técnico del área SIG & Drones del Centro de Innovación Científica Amazónica - CINCIA.

Luis E. Fernandez. Director Ejecutivo del Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), Profesor de Investigación del departamento de Biología y el Centro de Energía, Ambiente y Sustentabilidad de Wake Forest University, y Co-Investigador Principal del proyecto River Mining.

Mónica Moreno Brush. Coordinadora de Proyectos del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC). Investigadora Principal del Proyecto River Mining.

Proyecto River Mining (PEER 8 -235)

El estudio se realizó en el marco del proyecto “River Mining: impactos de la minería aluvial en la cuenca del río Madre de Dios - efectos físicos y planeamiento para su mitigación”, ejecutado en el periodo 2020 - 2022 por el Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC), y el Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), en colaboración con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA); y financiado por el Programa Partnerships for Enhanced Engagement in Research (PEER) de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la National Academy of Sciences (NAS).

Reconocimientos

Esta publicación ha sido posible gracias al apoyo del Pueblo de los Estados Unidos de América a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) con el Programa Partnerships for Enhanced Engagement in Research (PEER), y la National Academy of Sciences (NAS) bajo el acuerdo de USAID AID-OAA-A11-00012.

Partnerships for Enhanced Engagement in Research (PEER) es un programa de subvenciones internacionales que financia a científicos e ingenieros en los países socios de USAID que colaboran con investigadores financiados por el gobierno de los EE. UU. para abordar los desafíos del desarrollo global.

Las opiniones aquí expresadas son las de los autores y no reflejan necesariamente la opinión de USAID, la NAS, ni del Gobierno de los Estados Unidos.

Contacto

- River mining - Google Sites
- <https://cincia.wfu.edu/>
- <https://cita.utec.edu.pe/>



Cita (7a ed.) EstradaTerrel, Y., Portocarrero Trigos, E. C., García Veramatus, M. P., Timana Mendoza, C., Quintana Cobo, I., Pillaca Ortiz, J. M., & Castro, J. (2023). *Influencia de la minería aurífera aluvial en la geodinámica fluvial del río Madre de Dios, Amazonía peruana, en el periodo 1984-2020* (p. 20). Proyecto River Mining (PEER 8-235).

Título: Influencia de la minería aurífera aluvial en la geodinámica fluvial del río Madre de Dios, Amazonía peruana, en el periodo 1984-2020

Editado por:
Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC)
Jr. Medrano Silva No. 165 Barranco, Lima 04, Perú

Co-editado por:
Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA)
Jr. Ucayali 750, Puerto Maldonado 17001, Perú

1a. edición - marzo 2023

Depósito Legal N° 2023-02443