

Artículo Original

Detección de los cambios geomorfológicos fluviales del río El Bañado y la formación de la Laguna San Juan de Candua, Chuquisaca, Bolivia

Detection of fluvial geomorphological changes in the El Bañado River and the Formation of San Juan lake from Candua, Chuquisaca, Bolivia

Céspedes-Llave Ariel Angel ^{1*}, Andrea Bolaños Angulo ² & Natalio Roque Marca ³

*Autor de Correspondencia: cespedes-ariel@usfx-bo

¹ Instituto Experimental de Biología "Luis Adam Briançon", Facultad de Ciencias de Bioquímica, Química Farmacéutica y Bioquímica, Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0001-6131-4925>.

² Sociedad de Ingenieros de Bolivia. <https://orcid.org/0009-0009-3847-1338>.

³ Asociación Boliviana para la Investigación y Conservación de Ecosistemas Andino-Amazónicos (Conservación amazónica - ACEAA): Cobija, Pando, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0001-7184-0929>.

Recibido: 28/05/2025 Aceptado para publicación: 22/06/2025

Resumen

El estudio analiza los cambios de la geomorfología del sistema fluvial del río El Bañado que se encuentra en el municipio de Monteagudo (Bolivia: Chuquisaca) durante los últimos 47 años, con énfasis en su relación con la formación y cambios de la laguna San Juan de Candúa. Se emplearon imágenes satelitales de alta resolución de libre acceso como KH-9 HEXAGON, SPOT y Airbus. Los resultados muestran mediante imágenes satelitales históricas, que el río presentaba un curso sinuoso en 1978, pero entre 1980 a 1987 comenzó a rectificarse, probablemente debido a procesos naturales como erosión y sedimentación, junto con intervenciones humanas como la expansión urbana y la construcción de infraestructura vial. Estos cambios influyeron en la aparición de la laguna San Juan, visible desde 1991, cuya formación se atribuye a inundaciones, acumulación de agua superficial o alteraciones en el cauce del río El Bañado. La laguna ha experimentado fluctuaciones significativas en el área del espejo de agua notables desde el 2002, con un pico máximo en 2020 (8000 m²) asociado a lluvias intensas y eventos de inundación, seguido de una disminución en años posteriores, posiblemente debido a sequías, sedimentación o actividades humanas. Actualmente, la laguna presenta un área de 1528.2 m² en época seca, con un volumen estimado de 1,588,564 m³ de agua. Sin embargo, muestra signos de eutrofización, con más del 90% de su superficie cubierta por macrofitas flotantes, lo que afecta su dinámica ecológica. Estos resultados subrayan la importancia de monitorear la dinámica fluvial y lacustre para una adecuada gestión de los recursos hídricos, especialmente en contextos donde las actividades humanas interactúan fuertemente con sistemas naturales.

Palabras clave: dinámica morfológica fluvial, lago pequeño y palustre

Abstract

The study analyzes the geomorphological changes in the fluvial system of the El Bañado River, located in the municipality of Monteagudo (Chuquisaca, Bolivia), over the past 47 years, with an emphasis on its relationship with the formation and transformation of San Juan lake from Candua. High-resolution, freely accessible satellite imagery, including KH-9 HEXAGON, SPOT, and Airbus, was used. The results, based on historical satellite images, indicate that the river exhibited a sinuous course in 1978. However, between 1980 and 1987, it began to straighten, likely due to natural processes such as erosion and sedimentation, along with human interventions like urban expansion and road infrastructure development. These changes influenced the formation of San Juan lake, which became visible in 1991. Its formation is attributed to flooding, surface water accumulation, or alterations in the river channel. The lake has experienced significant fluctuations in its water surface between 2002 and 2023, reaching a peak of 8,000 m² in 2020, associated with heavy rainfall and flood events, followed by a decline in subsequent years, possibly due to droughts, sedimentation, or human activities. Currently, the lake covers an area of 1,528.2 m² during the dry season, with an estimated water volume of 1,588,564 m³. However, it exhibits signs of eutrophication, with more than 90% of its surface covered by floating macrophytes, which affect its ecological dynamics. These findings highlight the importance of monitoring fluvial and lacustrine dynamics for the effective management of water resources, particularly in contexts where human activities strongly interact with natural systems.

Keywords: fluvial morphological dynamics, marsh system and small-lake. .

Introducción

Los lagos de origen fluvial en regiones montañosas constituyen sistemas naturales dinámicos, moldeados por la interacción de procesos geomorfológicos, climáticos e hidrológicos (Tandon & Sinha, 2007). Estas formaciones pueden adoptar características tanto lacustres como palustres, en función de factores como la actividad tectónica, la dinámica glaciár, los patrones de sedimentación y las fluctuaciones hidrológicas, a menudo modificadas por la intervención humana. Dichos procesos generan ecosistemas únicos, dotados de un elevado valor ecológico, geológico y socioeconómico, ya que sustentan la biodiversidad regional y proveen servicios ecosistémicos clave. El estudio de estos mecanismos resulta fundamental para garantizar una gestión sostenible de los recursos hídricos y la conservación de estos entornos frágiles (Chaoyong et al., 2024).

El empleo de herramientas de teledetección (imágenes satelitales y sensores de alta resolución) ha revolucionado el estudio de estas formaciones al proporcionar registros multitemporales de alta precisión (Bishop et al., 2012). Técnicas como el análisis de datos multiespectrales han permitido caracterizar procesos geomorfológicos en sistemas lacustres y fluviales (Mertes et al., 1995; Paulino et al., 2023). Mientras que la integración de imágenes satelitales, mapas históricos, fotografías aéreas, topografía y estudios de campo ha mejorado la comprensión de la evolución planimétrica y la morfodinámica en múltiples escalas espaciotemporales (Boothroyd et al., 2021).

Entre las aplicaciones fluviales destacan: la cuantificación de la erosión de canales laterales (Salo et al., 1986; Puhakka et al., 1992); el mapeo geomorfológico y balance de sedimentos (Latrubesse et al. 2009); evolución de la forma de terreno (Dewan et al., 2017); cambios morfohidrodinámicos inducidos por represas(Kong et al., 2020). En ambientes lacustres, tecnologías como radar de apertura sintética (SAR) y sensores MODIS han facilitado el monitoreo de superficies acuáticas, con avances recientes en segmentación de imágenes para detectar cuerpos hídricos en áreas remotas (Hou et al., 2019; Ling et al., 2020; Chen et al., 2022; Shen et al., 2022; Wang et al., 2022). Estos métodos han documentado la variabilidad espacio-temporal de lagos, como el emblemático caso de la cuenca del lago Poopó en Bolivia, cuyos cambios drásticos reflejan su vulnerabilidad ante perturbaciones naturales y antrópicas (Torres-Batllo, 2020).

La Laguna San Juan de Candua, ubicada en Chuquisaca (Bolivia) y vinculada al río El Bañado, representa un sistema lacustre de interés por su evolución no evaluada en décadas recientes. Su estudio mediante un enfoque de morfología fluvial, es crucial para entender su rol como humedal regional. Estos ecosistemas no solo albergan biodiversidad única, sino que regulan ciclos hidrológicos y nutrientes, como evidencian estudios previos (Moss, 2012; Schallenberg et al., 2013; Heino et al., 2021). El objetivo de este estudio es describir los cambios de la forma del sistema fluvial del río El Bañado durante los últimos 47 años, y como este influjo en la formación de la laguna San

Juan de Candúa. El cual se analizó de manera multitemporal la morfología sistema fluvial de estos cuerpos de agua, utilizando imágenes satelitales históricas y de libre acceso..

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en la localidad de la esLa laguna San Juan de Candua está ubicada en el Cantón los Sauces del municipio de Monteagudo, perteneciente al departamento de Chuquisaca (Bolivia), en las coordenadas geográficas 19°48'18.69" latitud sur y 63°59'26.24" de longitud oeste, a una altitud de 1134 m sobre el nivel del mar. Esta laguna se encuentra entre el río El Bañado y el río Yanguilo, además de estar próxima a la Ruta Nacional 6 (Padilla-Monteagudo). Además, está muy próximo al centro poblado Candua y al centro urbano de Monteagudo (aproximadamente 4.46 km) (Figura 1)

Métodos

En este estudio se realizó el análisis de los cambios de morfología fluvial que dieron origen a la laguna San Juan de Candua, se utilizó información cartográfica del Instituto Geográfico Militar (IGM), específicamente la hoja 6834-IV H731 a escala 1:50,000 publicada en 1980 (IGM, 2021). Adicionalmente, se emplearon imágenes satelitales históricas disponibles y de alta resolución, como: fotografías satelitales KH-9 HEXAGON desclasificadas de 1978 (USGS, 1995); también se emplearon imágenes SPOT adquiridas por el Programa Spot de Patrimonio Mundial (CNES, 2023), para visualizar y analizar los cambio del tramo del río EL Bañado desde un período desde 1987 al 2013 (Tabla 1).

Complementariamente para el 2013 al 2025, se usaron imágenes Maxar Technologies y Airbus disponibles en Google Earth Pro Ver 7.3.6. Se aplico el índice de sinuosidad a la morfología fluvial digitalizada en base a las imágenes previamente descritas, para cuantificar patrones de canales mediante relaciones entre longitud del canal y longitud del valle (Schumm, 1963). Para el análisis hipsométrico del cambio del rio EL Bañado, se utilizó imágenes radar del 2010, de ALOS PALSAR (AP_24973_FBD_F6780_RT1) con 12.5 metros de resolución.

Tabla 1. Imágenes utilizadas para los análisis de cambio según la fecha y la fuente, para el rio el Bañado y la laguna San Juan.).

Fecha	Río	Laguna
1978-08-03	KH-9 HEXAGON	
Mission 1214-4		
ID: D3C1214-401095A036		
1987-03-14	SPOT1	
ID: 1 678-389 87-03-14 14:34:36 2 X		
1991-08-06	SPOT 2	

ID: 2 679-390 90-08-06 14:20:36 1 P		
1996-06-14	SPOT 3	
ID: 3 678-389 96-06-14 14:42:07 2 P		
2000-08-01	SPOT 4	
ID: 4 679-390 00-08-01 14:39:57 1 I		
2002-08		Maxar Technologies
Google Earth Pro		
2007-04		Maxar Technologies
Google Earth Pro		
2008-11-28	SPOT 5	
ID: 5 679-390 08/11/28 14:18:58 2 J		
2011-09		Maxar Technologies
Google Earth Pro		
2013-10	SPOT 5	
ID: 5 678-389 13/05/29 14:12:31 2 S	Airbus: Google Earth Pro	
2016-12	Airbus: Google Earth Pro	
2020-01	Airbus: Google Earth Pro	
2022-11	Airbus: Google Earth Pro	
2023-05	Airbus: Google Earth Pro	

En noviembre del 2024 se obtuvo en campo las métricas de batimetría del lago (profundidad), longitud, ancho, perímetro y de área. Se calculó el volumen de agua almacenada usando el método del prisma trapezoidal, que integra las profundidades a lo largo del perfil. Por otra se obtuvieron métricas de variación de la morfología y el área usando imágenes satelitales de WorldView y GeoEye, proporcionadas por Maxar Technologies y disponibles en Google Earth Pro (Tabla 1), para el período 2002-2013 y también las imágenes disponibles de CNES y Airbus para los períodos 2016 al 2023 (Google, 2018)

Todos los geo-procesos de análisis de las imágenes satelitales, como la ortorectificación de las imágenes SPOT, georreferenciación de imágenes descargadas de Google Earth Pro, se realizaron en el programa QGIS 3.34.7. Esta es un programa o software libre y posee extensiones y complementos se realizan análisis de imágenes satelitales y aéreas, variables ambientales, clima, cobertura terrestre, conjuntos de datos topográficos y socioeconómicos (QGIS, 2020).

Resultados

Origen de la laguna San Juan a través de la dinámica de cambio del río el Bañado

En 1978, la fotografía satelital KH-9 HEXAGON muestra el curso natural del río El Bañado con un trazo serpenteante característico. En contraste, el mapa cartográfico de 1980 refleja una interpretación que incluye posibles modificaciones debido a procesos naturales, como erosión y sedimentación, o actividades humanas (Figura 2A). En ambas fuentes, el tramo del río que emerge del Cañón de Heredia, pasando por la comunidad de San Miguel, forma una horquilla cercana a la carretera RN6 (Figura 2B). Este detalle evidencia la interacción entre el río y su entorno, así como la influencia potencial de la infraestructura vial en su trayectoria.

A partir de las imágenes SPOT de 1987, se observa un cambio en la dirección del río, marcando una transición hacia un trazado más rectilíneo. Lo cual ratifica los resultados del análisis de sinuosidad que revelan una relación significativa entre el año y el índice de sinuosidad del río. El análisis de correlación de Pearson muestra una correlación negativa moderada a fuerte ($r = -0.73$, $p < 0.01$), indicando que la sinuosidad ha tendido a disminuir con el tiempo durante el período estudiado (1978-2025). El modelo de regresión polinomial de segundo grado explica aproximadamente un 79% de la variabilidad en los datos (R^2 ajustado = 0.74), demostrando un buen ajuste a la tendencia observada. Los coeficientes del modelo sugieren que la relación no es estrictamente lineal (ver figura 3), sino que presenta cierta curvatura, con una tasa de disminución que podría estar modificándose en los años más recientes.

La figura 4A destaca la dinámica de cambio del río El Bañado entre 1978 y 2023, con una reducción progresiva en su sinuosidad. Estos cambios parecen ser resultado de procesos naturales, como erosión y sedimentación, junto con intervenciones humanas relacionadas con infraestructura y uso del suelo. También, se refuerza este análisis al mostrar desplazamientos del cauce hacia áreas más rectas, influenciados por la expansión urbana y la construcción vial.

Además, entre 1978 y 2023, las curvas hipsométricas del río (Figura 4B) reflejan una evolución significativa en su morfología, caracterizada por una rectificación progresiva. En 1978, el río presentaba un curso sinuoso con marcados desniveles, señal de un sistema fluvial dinámico con intensos procesos de sedimentación y erosión lateral. Con el tiempo, se observa una estabilización en el gradiente altitudinal y una alineación más uniforme del cauce, especialmente evidente desde el año 2000.

Un elemento notable es la aparición de la laguna San Juan, visible desde 1991 próximo al río Yanguilo. Esta laguna probablemente surgió como resultado de inundaciones, acumulación de agua superficial o alteraciones en el cauce del río. Su dinámica hidrológica está estrechamente vinculada a los cambios en el sistema fluvial. Finalmente, la proximidad del río a la carretera y al desarrollo urbano sugiere una interacción constante entre el cauce y la expansión territorial. Los cambios en su trazado reflejan una transformación continua impulsada por factores naturales y antrópicos, subrayando la importancia de monitorear su dinámica para garantizar una gestión adecuada de los recursos y evitar impactos negativos en el entorno.

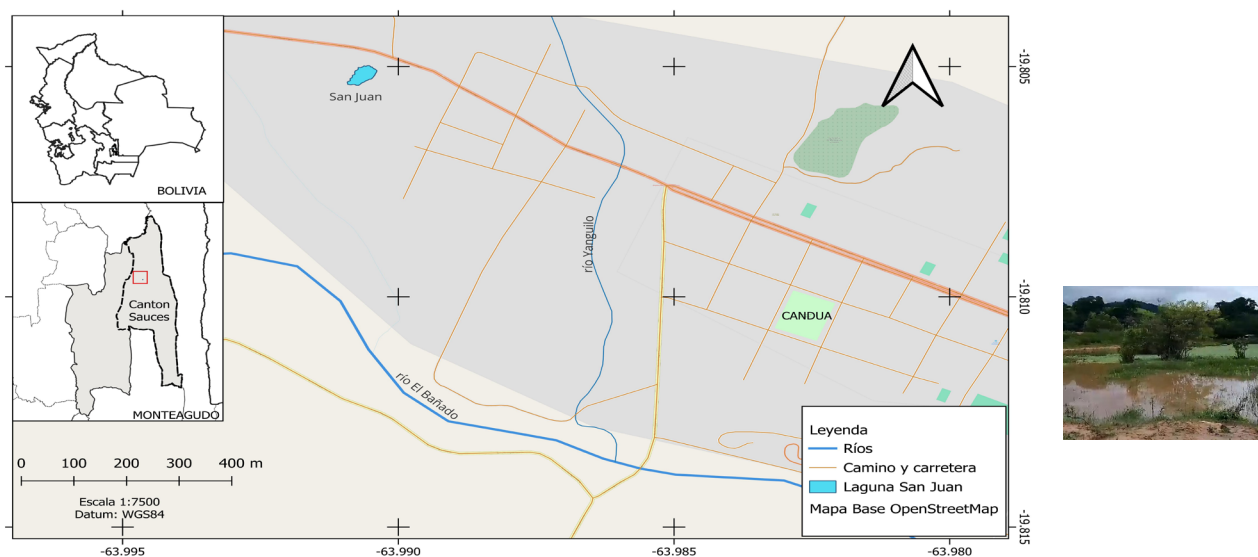


Figura 1. Ubicación de la laguna San Juan de Candua en el municipio de Monteagudo. Y fotografía del área de la laguna (Foto: Claribel Villarruel)

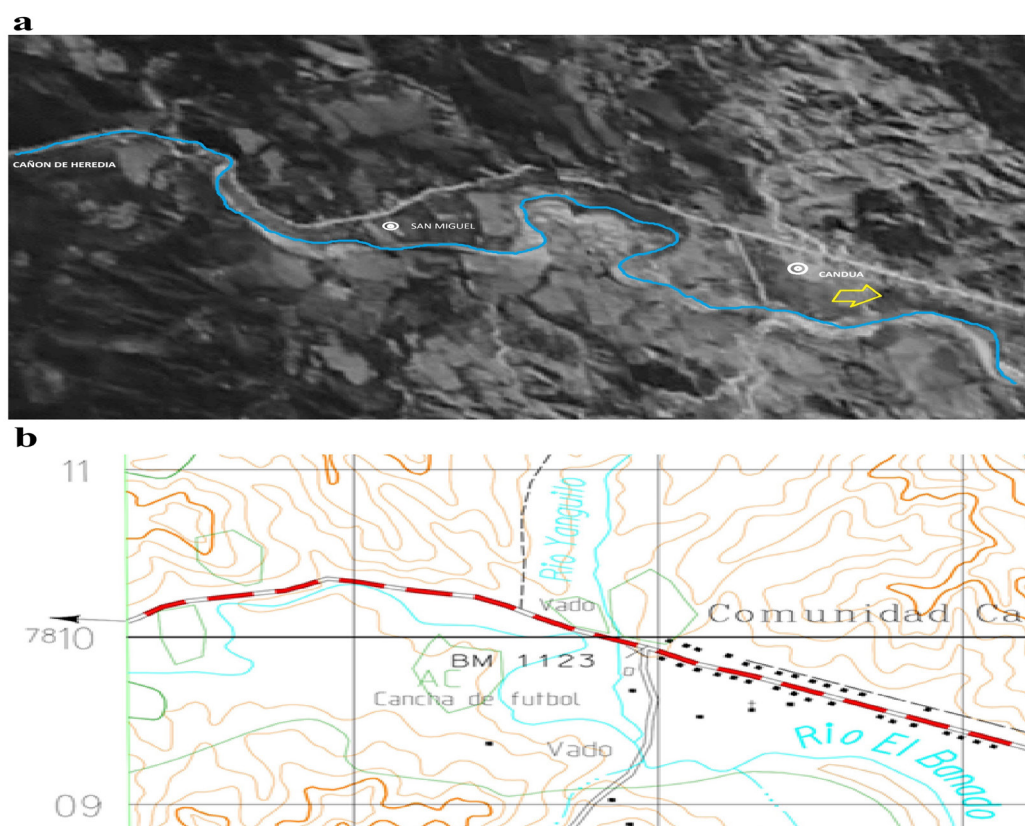


Figura 2. Recorrido del río El Bañado en 1978 (A), imagen obtenida de fotografías satelitales CORONA y en 1980 mapa cartográfico IGM de la hoja 6834-IV H731 (B) de que muestra el trazo del río. La flecha amarilla representa la dirección de flujo del río.

Regresión Polinomial (Grado 2) de Sinuosidad vs Años

Correlación Pearson: $r = -0.735$, $p = 0.01$

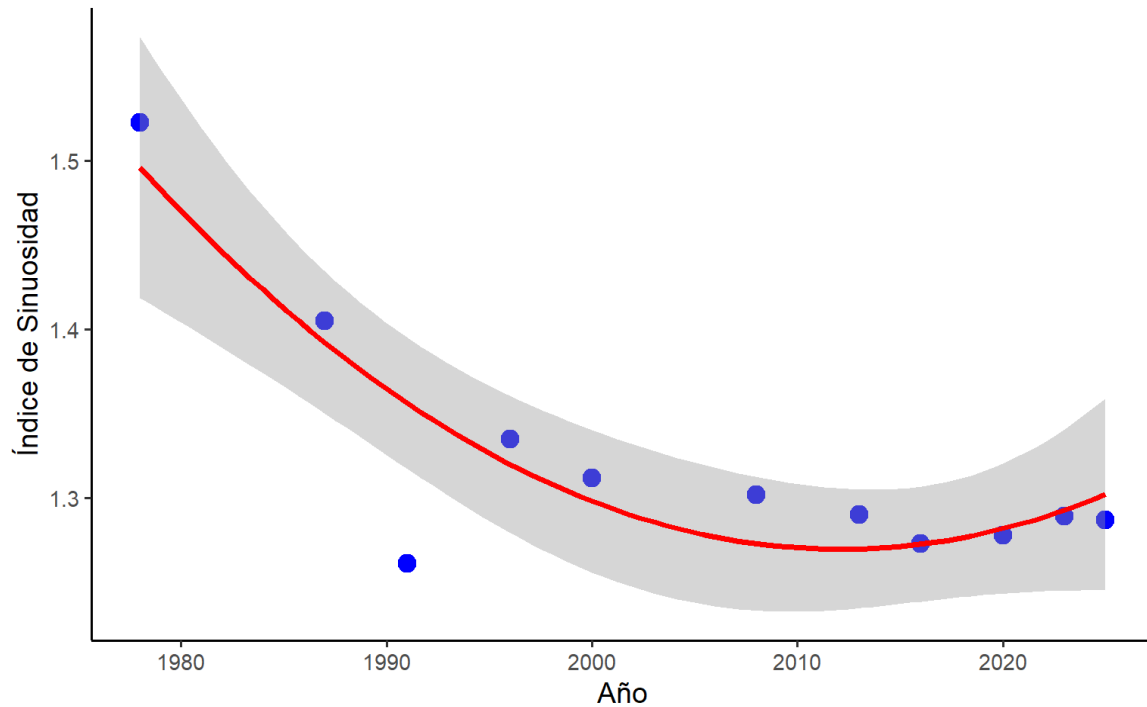


Figura 3. Tendencia temporal del índice de sinuosidad fluvial (1978-2025): modelo de regresión polinomial grado 2

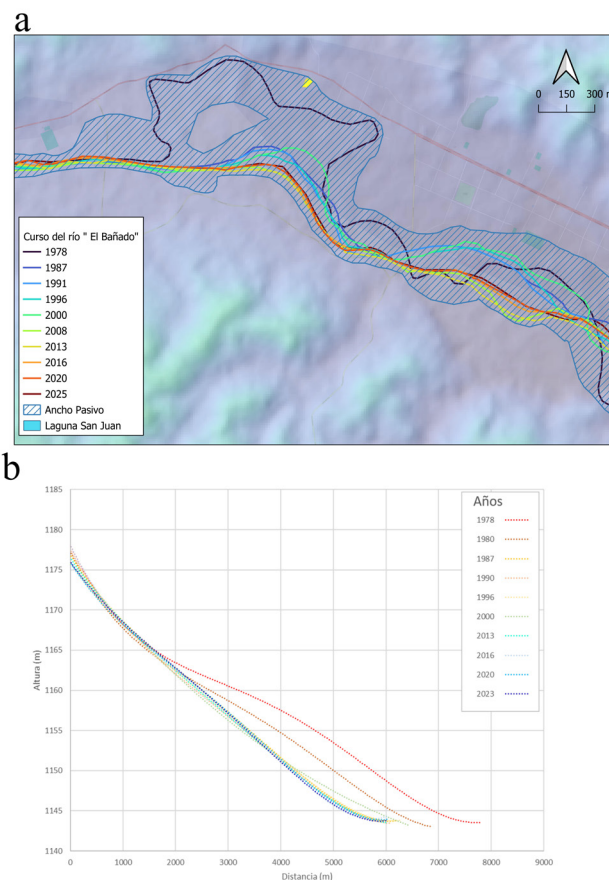


Figura 4. Dinámica de cambio del tramo del río el Bañado desde 1978 al 2023 y la aparición de la laguna San Juan (A). Variación de las curvas hipsométricas de los tramos del río el Bañado en base a los mismos años (B).

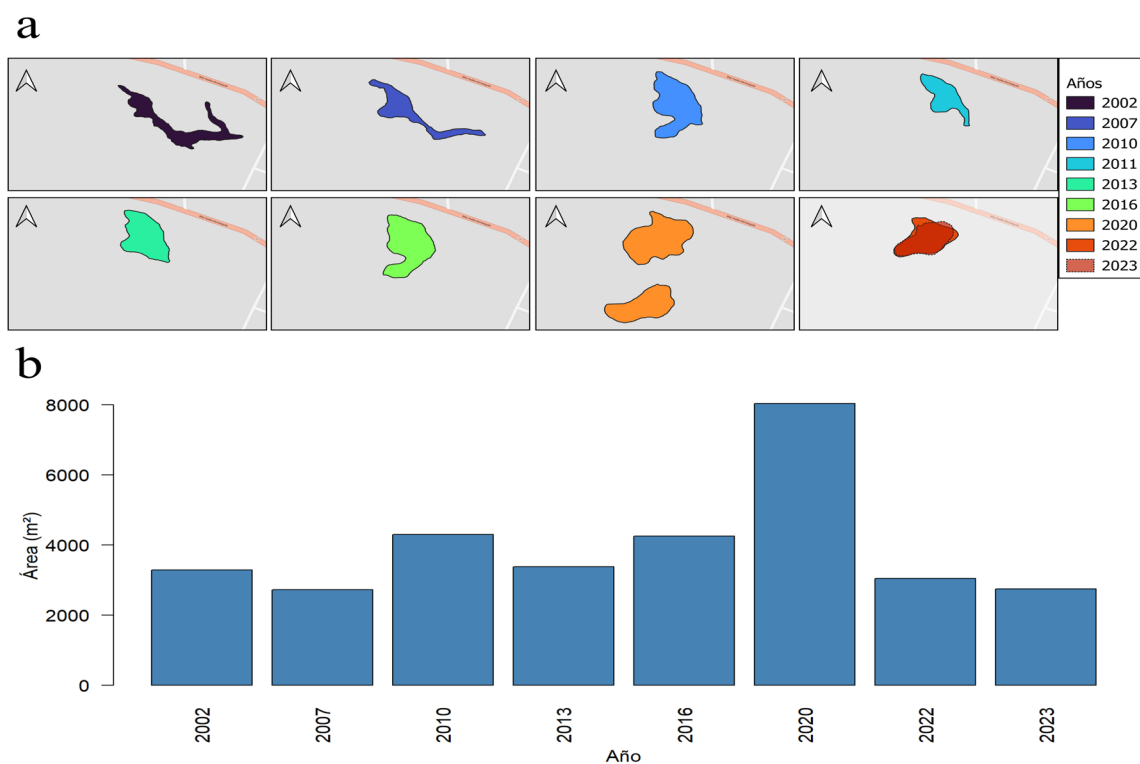


Figura 5. Dinámica de cambio superficie y forma del espejo de agua de la laguna San Juan (A) y un diagrama de barras que muestra como cambio el área entre el 2002 al 2023 (B).

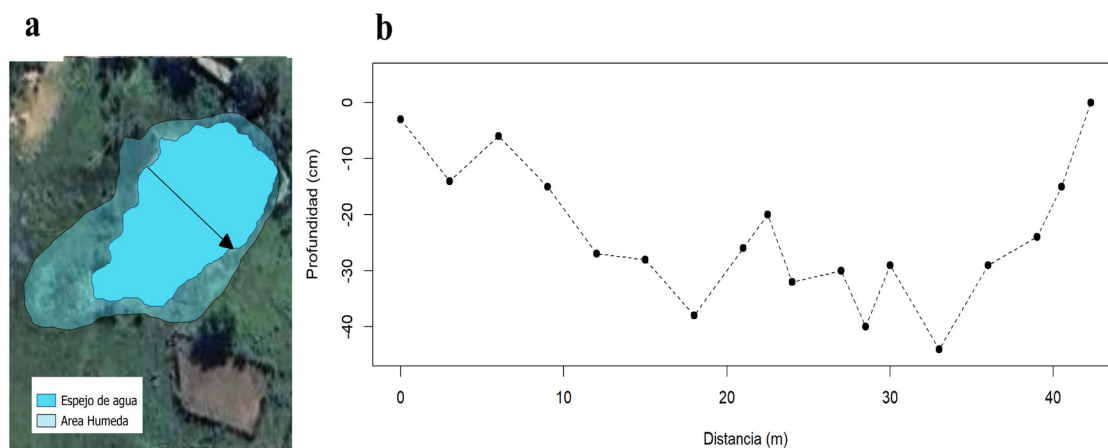


Figura 6. Área que ocupa el espejo de agua y húmeda la laguna San Juan actualmente (A) y variación batimétrica de la profundidad (B).

Se ha evidenciado fluctuaciones significativas a lo largo de 21 años. Durante el período analizado, el área de la laguna para el 2002 y 2007 tiene una forma más extendida a partir de un correspondiente meandro, que este tipo de lagos se forman debido a una alta erosionabilidad, donde se depositan en las barras puntuales que se forman cuando el río se aleja de su antigua orilla. Posiblemente el área del lago fue más extendida aproximadamente entre 1984 al 2002, ocupando la llanura de inundación del antiguo curso del río el Bañado. Posteriormente, presenta una tendencia variable con un incremento notable en 2010 y un pico máximo en 2020, cuando alcanza aproximadamente 8000 m², el cual se debe a que la laguna se expandió en dos espejos de agua (Figura 5B). Este aumento puede asociarse con factores como intensas lluvias, modificaciones hidrológicas en el río El Bañado o eventos puntuales de inundación.

Sin embargo, después de 2011, se observa una disminución del área, reflejada en los valores de 2022 y 2023 (Figura 5A), que podrían estar relacionadas con fenómenos de sequía, sedimentación o actividades antropogénicas. Este aspecto se puede evidenciar con las imágenes satelitales con actividades de relleno o terraplenes que se realizan a partir del 2013.

La reducción en años posteriores, como en 2022 y 2023, sugiere eventos similares de contracción en el espejo de agua, marcando patrones intermitentes de expansión y contracción. Sin embargo, esta contracción del lago San Juan no será posible, debido a que el lago llega a ser una zona de descarga de aguas subterráneas por el sistema de flujo de los ríos El Bañado y Yanguilo. Este análisis evidencia la dinámica del sistema palustre, probablemente influenciado por cambios hidrológicos, geomorfológicos y antropogénicos en la región

Características biofísicas actuales de la laguna San Juan

La laguna San Juan, durante la época seca, presenta un espejo de agua con un área de 1528.2 m² y un perímetro de 173.67 m. Considerando el área húmeda total, esta alcanza 2746.15 m², con un perímetro de 217.85 m (Figura 6A), lo que incluye las zonas parcialmente inundadas o afectadas por fluctuaciones estacionales. El análisis del perfil batimétrico, que representa las variaciones de profundidad a lo largo de una línea de medición, revela los cambios topográficos en el fondo del lago, identificando tanto áreas someras como zonas más profundas (Figura 6B).

Este perfil es clave para comprender la geomorfología subacuática y evaluar la capacidad del lago. Basándose en los datos de profundidad y batimetría, se estima que el lago almacena un volumen de agua aproximado de 1,588,564 m³. Este cálculo proporciona una visión más clara de su capacidad hídrica, lo cual resulta esencial para la gestión de recursos hídricos y para la planificación ambiental.

Por otra parte, presenta un grado de eutrofización, el cual es lago de tipo palustre debido a que poseen una masa hídrica de muy baja profundidad (< 50 cm). Además, están totalmente cubiertos por plantas acuáticas y anfibias

dominada principalmente por macrofitas flotantes del género *Eichhornia* Kunth (lirio acuático), donde el espejo de agua estaba cubierto en más de un 90% por esta especie.

Discusión

Los resultados del presente estudio se discuten en dos niveles: primero, desde el aspecto técnico-metodológico, y segundo, en relación con los procesos fluviales y las implicaciones ambientales relacionadas con la formación de lagunas. Las imágenes históricas de SPOT, gracias a su alta resolución espacial, ofrecen una ventaja significativa frente a misiones como Landsat y Sentinel, al permitir analizar con mayor detalle los cambios ocurridos en el pasado. Este nivel de precisión es clave para identificar variaciones específicas en la dinámica fluvial y su interacción con el entorno, proporcionando información valiosa sobre procesos como erosión, sedimentación y rectificación del cauce. Así, las imágenes SPOT se convierten en una herramienta fundamental para el análisis retrospectivo de sistemas fluviales.

La calidad de los resultados obtenidos con SPOT ha motivado la aplicación de este enfoque a sistemas fluviales completos. Si bien Sentinel ofrece imágenes de resolución similar, su registro comienza en 2015 (ESA, 2012), lo que limita su utilidad para estudios históricos. Por otro lado, aunque Landsat tiene un registro histórico más amplio y se ha utilizado para el monitoreo de aguas superficiales (Wang et al., 2022), su resolución no alcanza la de SPOT. La combinación de la frecuencia de adquisición de misiones recientes como Sentinel y Landsat, con la riqueza histórica de SPOT (Doxaran et al., 2006; Gernez et al., 2015; Boothroyd et al., 2021), proporciona una base sólida para implementar sistemas de monitoreo continuo, integrando análisis retrospectivos y prospectivos. Esto es particularmente relevante en Bolivia, un país en desarrollo donde los cambios ambientales actuales y futuros son impulsados por el desarrollo socioeconómico.

La variabilidad del ancho de los ríos, ha sido analizados tradicionalmente (Surian & Rinaldi, 2003). Pero recientemente con sensores remotos de alta resolución accesibles es posible monitorear la dinámica fluvial, apoyar la gestión de los riesgos de inundación y fundamentar los esfuerzos de restauración de los ríos (Boothroyd et al., 2021). En el caso del río El Bañado, los sensores remotos han permitido visualizar cambios en diferentes escalas temporales, lo que aporta información clave para una gestión ambiental efectiva. Como se observó una disminución significativa en la sinuosidad fluvial entre 1978 y 2025, revelando una tendencia no lineal que sugiere cambios en la dinámica del cauce. Esta reducción en la sinuosidad concuerda con estudios previos que atribuyen tales cambios tanto a factores naturales como antropogénicos. Por un lado, variaciones en el régimen hidrológico, como la disminución de caudales de crecida, pueden limitar la migración lateral de meandros (Hooke, 2007), mientras que la erosión diferencial en ríos con sedimentos finos puede generar mayor inestabilidad en la sinuosidad (Schumm, 1963). Por otro lado, intervenciones humanas como la construcción de diques y la extracción de áridos han demostrado alterar significativamente el equilibrio natural de los ríos, inhibiendo su capacidad para mantener patrones meándricos (Güne-

ralp and Rhoads, 2010; Constantine et al., 2014).

La geomorfología fluvial explica los cambios en los cauces como resultado de factores concurrentes, incluidos el cambio climático, el cambio de uso de suelo, la construcción de presas y la extracción de grava en los canales (Rădoane et al., 2013; Spada et al., 2018). Además, estudios recientes han destacado el impacto de la urbanización en las inundaciones fluviales en comparación con factores climáticos (Mertes et al., 1995; Paulino et al., 2023; Venegas-Cordero et al., 2024). Sin embargo, este estudio no intenta determinar la causalidad de los cambios observados en el río El Bañado, ya que sería necesario realizar investigaciones más detalladas.

En cuanto a los mecanismos fluviales que originan lagos en ríos meándricos, investigaciones en ríos amazónicos (Mertes et al., 1996; Gautier et al., 2006; Ahmed, 2024) coinciden en que la formación de lagos está asociada al corte de meandros. Este proceso genera desconexiones en el cauce para optimizar la transmisión de agua y sedimentos. En el caso de la laguna San Juan de Candua, este fenómeno posiblemente ocurrió entre 1978 y 1980, como lo indica el análisis hipsométrico y el modelo de elevación digital. Aunque no se dispuso de imágenes satelitales entre 1981 y 1986, para 1987 el cauce del río ya estaba cortado y la laguna había comenzado a reducir su extensión, siguiendo patrones descritos por Sun et al. (1996) donde la formación de lagos se asocia a alta erosionabilidad y depósitos en barras puntuales.

Por otra, La laguna de San Juan es un pequeño cuerpo de agua que puede ser considerado como un lago pequeño (small-lake) o estanque, por sus características hidrológicas particulares que este tipo de ecosistemas lacustres presentan según Manson et al. (1968) y Allred et al. (1971). Entre estos aspectos la conectividad hidrológica desempeña un papel crucial en la configuración de la dinámica ecológica e hidrológica de lagos pequeños, y afecta a la calidad del agua, ya que los lagos conectados presentan parámetros de calidad del agua más uniformes que los aislados (Li et al., 2019). Su conectividad hidrológica, alimentada por los ríos El Bañado y Yanguilo, juega un papel crucial en su dinámica ecológica e hidrológica. Coincidiendo con Winter (1999), quien señala las aguas superficiales influyen en los flujos subterráneos complejos y dinámicos. Sin embargo, no fue posible determinar la calidad del agua, pero en base a una observación in situ a alta densidad de macrófitas flotantes observada sugiere un contenido elevado de nitrógeno inorgánico disuelto, que aumenta en condiciones de aislamiento (Neiff et al., 2008). El aislamiento y los cambios en la calidad del agua pueden atribuirse a factores antropogénicos, como la expansión urbana de Candua desde 2013, que ha modificado la morfología de la laguna mediante rellenos y terraplenes.

Conclusiones

El estudio reveló que los cambios en la dinámica fluvial del río El Bañado, desde 1978 hasta 2023, fueron determinantes en la formación y evolución de la laguna San Juan de Candúa. En 1978, el río presentaba un curso serpenteante, pero desde 1987 se observó una rectificación progresiva influenciada por procesos naturales, como

erosión y sedimentación, y factores antrópicos, incluyendo infraestructura vial y expansión urbana. Estos cambios alteraron el sistema fluvial, favoreciendo la aparición de la laguna posiblemente antes de 1987, visible por en 1991 y con mayor nitidez desde el 2002. Su dinámica hidrológica está vinculada al flujo del río El Bañado y Yanguilo, destacando su rol como zona de descarga de aguas subterráneas.

Entre 2002 y 2023, el espejo de agua mostró fluctuaciones significativas, con un máximo en 2020 (8000 m²), seguido por una contracción asociada a sequías, sedimentación y actividades humanas como rellenos. Actualmente, la laguna, clasificada como un sistema palustre, presenta un alto grado de eutrofización, reflejado en su cobertura predominante por macrófitas flotantes, indicador de condiciones de aislamiento y alta concentración de nitrógeno inorgánico. Este fenómeno está relacionado con la expansión urbana desde 2013. La conectividad hidrológica de la laguna es esencial para su dinámica ecológica e hidrológica, influyendo en la calidad del agua y en la biodiversidad.

Finalmente, las imágenes satelitales de alta resolución, como SPOT y aquellas disponibles en el programa Google Earth Pro, demostraron ser herramientas clave para monitorear los cambios fluviales y de la laguna, aportando información crítica para la gestión de recursos hídricos y la planificación ambiental, especialmente en regiones donde los impactos del desarrollo socioeconómico son significativos.

Agradecimientos

Se agradece al Barrio San Juan y su representante el Sr Rodrigo Velázquez por la apertura para el estudio realizado en la Laguna San Juan. También a los estudiantes Ruth Valentina Campos Pérez, Diana Enríquez Loayza, Gabriel Espíndola y Cecilia Sandoval de la Carrera de Biología de la USFX por su colaboración en la fase de campo.

Bibliografía

- Ahmed, J. (2024), "Establishing the Hydrological Controls on Water Surface Area Variations in Oxbow Lakes", *Hydrological Processes*, Vol. 38 No. 12, doi: 10.1002/hyp.70013.
- Allred, E.R., Manson, P.W., Schwartz, G.M., Golany, P. and Reinke, J.W. (1971), *Continuation of Studies on the Hydrology of Ponds and Small Lakes*, Minnesota, USA.
- Bishop, M.P., James, L.A., Shroder, J.F. and Walsh, S.J. (2012), "Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research", *Geomorphology*, Elsevier B.V., Vol. 137 No. 1, pp. 5–26, doi: 10.1016/j.geomorph.2011.06.027.
- Boothroyd, R.J., Nones, M. and Guerrero, M. (2021), "Deriving Planform Morphology and Vegetation Coverage From Remote Sensing to Support River Management Applications", *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 9 No. May, pp. 1–18, doi: 10.3389/fenvs.2021.657354.
- Boothroyd, R.J., Williams, R.D., Hoey, T.B., Barrett, B. and Prasojo, O.A. (2021), "Applications of Google Earth Engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Vol. 8 No. 1, pp. 1–27, doi: 10.1002/wat2.1496.
- Chaoyong, W., Aslam, R.W., Quddoes, A., Naz, I., Tariq, A., Ullah, S., Sajjad, A., et al. (2024), "SAR image integration for multi-temporal

analysis of Lake Manchar Wetland dynamics using machine learning", *Scientific Reports*, Vol. 14 No. 1, p. 26669, doi: 10.1038/s41598-024-76730-1.

Chen, T., Song, C., Zhan, P., Yao, J., Li, Y. and Zhu, J. (2022), "Remote sensing estimation of the flood storage capacity of basin-scale lakes and reservoirs at high spatial and temporal resolutions", *Science of the Total Environment*, Elsevier B.V., Vol. 807, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150772.

CNES, C.N. d'Études S. (2023), "SPOT World Heritage Data Site", SPOT Images Acquired by CNES's Spot World Heritage Programme, available at: <https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/60> (accessed 13 February 2025).

Constantine, J.A., Dunne, T., Ahmed, J., Legleiter, C. and Lazarus, E.D. (2014), "Sediment supply as a driver of river meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin", *Nature Geoscience*, Vol. 7 No. 12, pp. 899–903, doi: 10.1038/ngeo2282.

Dewan, A., Corner, R., Saleem, A., Rahman, M.M., Haider, M.R., Rahman, M.M. and Sarker, M.H. (2017), "Assessing channel changes of the Ganges-Padma River system in Bangladesh using Landsat and hydrological data", *Geomorphology*, Vol. 276, pp. 257–279, doi: 10.1016/j.geomorph.2016.10.017.

Doxaran, D., Castaing, P. and Lavender, S.J. (2006), "Monitoring the maximum turbidity zone and detecting fine-scale turbidity features in the Gironde estuary using high spatial resolution satellite sensor (SPOT HRV, Landsat ETM+) data", *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, Vol. 27 No. 11, pp. 2303–2321, doi: 10.1080/01431160500396865.

ESA. (2012), *Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services*, edited by Fletcher, K., European Space Agency, AG Noordwijk, The Netherlands.

Gautier, E., Brunstein, D., Vauchel, P., Roulet, M., Fuertes, O., Guyot, J.L., Darozzes, J., et al. (2006), "Temporal relations between meander deformation, water discharge and sediment fluxes in the floodplain of the Rio Beni (Bolivian Amazonia)", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 32 No. 2, pp. 230–438, doi: 10.1002/esp.

Gernez, P., Lafon, V., Lerouxel, A., Curti, C., Lubac, B., Cerisier, S. and Barillé, L. (2015), "Toward sentinel-2 high resolution remote sensing of suspended particulate matter in very turbid waters: SPOT4 (take5) experiment in the Loire and Gironde estuaries", *Remote Sensing*, Vol. 7 No. 8, pp. 9507–9528, doi: 10.3390/rs70809507.

Google. (2018), "Google Earth Pro", Google Maps/Google Earth, Santa Clara County, California, U.S.A.

Güneralp, I. and Rhoads, B.L. (2010), "Spatial autoregressive structure of meander evolution revisited", *Geomorphology*, Vol. 120 No. 3–4, pp. 91–106, doi: 10.1016/j.geomorph.2010.02.010.

Heino, J., Alahuhta, J., Bini, L.M., Cai, Y., Heiskanen, A.S., Hellsten, S., Kortelainen, P., et al. (2021), "Lakes in the era of global change: moving beyond single-lake thinking in maintaining biodiversity and ecosystem services", *Biological Reviews*, John Wiley & Sons, Ltd, Vol. 96 No. 1, pp. 89–106, doi: 10.1111/BRV.12647.

Hooke, J.M. (2007), "Spatial variability, mechanisms and propagation of change in an active meandering river", *Geomorphology*, Elsevier, Vol. 84 No. 3–4, pp. 277–296, doi: 10.1016/J.GEOMORPH.2006.06.005.

Hou, J., Van Dijk, A.I.J.M.V. and Beck, H.E. (2019), "A global, near real-time system measuring river, lake, and reservoir dynamics", 23rd International Congress on Modelling and Simulation - Supporting Evidence-Based Decision Making: The Role of Modelling and Simulation, MODSIM 2019, No. December, pp. 712–718, doi: 10.36334/modsim.2019.h5.houj.

IGM, I.G.M. (2021), "Bolivia Topographic Maps 1:50,000", Perry-Castañeda Library (PCL) Map Collection, available at: <https://maps.lib.utexas.edu/maps/topo/bolivia/index-50k.html>.

Kong, D., Latrubesse, E.M., Miao, C. and Zhou, R. (2020), "Morphological response of the Lower Yellow River to the operation of Xiaolangdi Dam,

China", *Geomorphology*, Elsevier, Vol. 350, p. 106931, doi: 10.1016/J.GEOMORPH.2019.106931.

Latrubesse, E.M., Amsler, M.L., de Morais, R.P. and Aquino, S. (2009), "The geomorphologic response of a large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: The case of the Araguaia River", *Geomorphology*, Elsevier B.V., Vol. 113 No. 3–4, pp. 239–252, doi: 10.1016/j.geomorph.2009.03.014.

Li, Y., Zhang, Q., Cai, Y., Tan, Z., Wu, H., Liu, X. and Yao, J. (2019), "Hydrodynamic investigation of surface hydrological connectivity and its effects on the water quality of seasonal lakes: Insights from a complex floodplain setting (Poyang Lake, China)", *Science of The Total Environment*, Elsevier, Vol. 660, pp. 245–259, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.01.015.

Ling, F., Li, X., Foody, G.M., Boyd, D., Ge, Y., Li, X. and Du, Y. (2020), "Monitoring surface water area variations of reservoirs using daily MODIS images by exploring sub-pixel information", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Elsevier, Vol. 168, pp. 141–152, doi: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2020.08.008.

Manson, P.W., Schwartz, G.M. and Allred, E.R. (1968), *Some Aspects of the Hydrology of Ponds and Small Lakes*, Minnesota, USA.

Mertes, L.A.K., Daniel, D.L., Melack, J.M., Nelson, B., Martinelli, A. and Forsberg, B.R. (1995), "Spatial patterns of hydrology, geomorphology, and vegetation on the floodplain of the Amazon River in Brazil from a remote sensing perspective", *Geomorphology*, Vol. 13, pp. 215–232.

Mertes, L.A.K., Dunne, T. and Martinelli, L.A. (1996), "Channel-floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon River, Brazil", *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 108 No. 9, pp. 1089–1107, doi: 10.1130/0016-7606(1996)108<1089:CFGATS>2.3.CO;2.

Moss, B. (2012), "Cogs in the endless machine: Lakes, climate change and nutrient cycles: A review", *Science of The Total Environment*, Elsevier, Vol. 434, pp. 130–142, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2011.07.069.

Neiff, J.J., Casco, S.L. and De Neiff, A.P. (2008), "Response of *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) to water level fluctuations in two lakes with different connectivity in the Paraná River floodplain", *Revista de Biologia Tropical*, Vol. 56 No. 2, pp. 613–623, doi: 10.15517/rbt.v56i2.5612.

Paulino, R.S., Martins, V.S., Novo, E.M.L.M., Maciel, D.A., Correia-Lima, D.L., Barbosa, C.C.F., Bonnet, M.P., et al. (2023), "A framework based on spectral similarity to estimate hydrological connectivity in Juruá River floodplain lakes using 3-m PlanetScope data", *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V., Vol. 625 No. PB, p. 130156, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130156.

Puhakka, M., Kalliola, R., Rajasilta, M. and Salo, J. (1992), "River Types, Site Evolution and Successional Vegetation Patterns in Peruvian Amazonia", *Journal of Biogeography*, JSTOR, Vol. 19 No. 6, p. 651, doi: 10.2307/2845707.

QGIS, D.T. (2020), "QGIS Geographic Information System", Geospatial Foundation.

Rădoane, M., Perşoiu, I., Cristea, I. and F., C. (2013), "River channel planform changes based on successive cartographic data. A methodological approach", *Journal of Geomorphology*, Vol. 15, pp. 69–88.

Salo, J., Kalliola, R., Häkkinen, I., Mäkinen, Y., Niemelä, P., Puhakka, M. and Coley, P.D. (1986), "River dynamics and the diversity of Amazon lowland forest.", *Nature*, Vol. 322 No. 6076, pp. 254–258.

Schallenberg, M., De Winton, M.D., Verburg, P., Kelly, D.J., Hamill, K.D. and Hamilton, D.P. (2013), "Ecosystem Services of Lakes", *Ecosystem Services in New Zealand - Conditions and Trends*, pp. 203–225.

Schumm, S.A. (1963), "Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains", *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 74 No. 9, pp. 1089–1099, doi: 10.1130/0016-7606(1963)74.

Shen, G., Fu, W., Guo, H. and Liao, J. (2022), "Water Body Mapping