

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Integración de índices espectrales y precipitación para la evaluación de parámetros
morfométricos en ríos tropicales

Proyecto de Titulación

Previo la obtención del Título de:

Magíster en Ciencias de la Tierra

Presentado por:

Kenny Jairo Dueñas Tovar

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi mamá Cecilia, que ni la distancia puede minimizar todo el amor y cariño recibido que me motiva a mejorar día a día.

De igual forma, a mi papá Jairo, a mi hermano Zamir, a mi abuelita María, tías Jessica y Dexi por estar ahí en cada momento en el que necesito.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias de la Tierra (FICT-ESPOL), y toda su plantel docente y administrativo, por la apertura en el desarrollo de este trabajo.

Al Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT-ESPOL). En especial al Dr. Paúl Carrión, a mi tutor Dr. Fernando Morante, co-tutora María Fernanda Jaya MSc, y todos los miembros del equipo, por su constante retroalimentación.

Al Laboratorio de Geomorfología de la Universidade Federal de Viçosa (UFV). Al Prof. André Faria por brindarme la confianza y apoyo. A Matheus y Marco, por su cálida acogida y amistad. Sin olvidar a todo el pueblo de Brasil y Minas Gerais, quienes hicieron de mi paso por UFV una experiencia inolvidable. De igual manera, el presente trabajo fue realizado con apoyo de la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiación 001

Declaración Expresa

Yo, Kenny Jairo Dueñas Tovar acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 17 de septiembre de 2025

Kenny Jairo Dueñas Tovar

Evaluadores

Lady Katherine Bravo Montero, MSc

Evaluador

Fernando Enrique Morante Carballo, PhD

Tutor de proyecto

Resumen

Los cambios de las trayectorias del eje principal de un río es uno de los tópicos más estudiados dentro de la geomorfología fluvial por la rapidez de los cambios físicos que presentan los canales fluviales bajo influencias de elementos del entorno (ej. precipitación). Debido a que dichos cambios presentan una aleatoriedad considerable esto repercute en el diseño de los planes de gestión locales. De tal manera, el objetivo es analizar el evento de migración de meandros en un río dentro de la costa ecuatoriana (R. Pedro Carbo) mediante la integración de datos de teledetección, precipitación y algoritmos de clasificación para la identificación de tendencias y sugerencias de estrategias de manejo del paisaje fluvial. Para conseguirlo, se realizó un flujo de trabajo de cuatro etapas: (i) obtención y procesamiento de datos, (ii) cálculo de parámetros morfométricos, (iii) análisis de influencias climáticas y (iv) generación de directrices de gestión. Los resultados evidenciaron que el modelo de clasificación consigue resultados satisfactorios en la discriminación agua/suelo, con una precisión que supera el 80% de aciertos para la obtención de cuerpos de agua. Mientras, el cálculo de los parámetros morfométricos como sinuosidad y migración lateral, permitió contemplar al menos seis zonas donde el río alcanza valores mayores a 1.5 (muy sinuosos), y desplazamientos absolutos mayores a 300 metros, respectivamente. Adicionalmente, un análisis de retraso evidenció que para el área de estudio la relación de la precipitación con los desplazamientos horizontales pueden explicarse con al menos un período inmediatamente anterior al cambio. Finalmente, un análisis de gestión jerarquizado (AMRO), planteó que existen respuestas hidrológicas diferentes en el área, sugiriendo propuestas como revegetación y barreras naturales. En síntesis, este estudio constituye un recurso esencial para la consideración del comportamiento de la dinámica de los ríos en la zona subtropical de la costa ecuatoriana y mostrando cómo los datos morfométricos e hidroclimáticos pueden ser integrados para el desarrollo de una gestión preventiva de los efectos de los cambios del paisaje fluvial.

Palabras Clave: fluvial, migración lateral, sinuosidad, teledetección

Abstract

The changes in the trajectories of the main axis of a river is one of the most studied topics within fluvial geomorphology due to the rapidity of the physical changes that the fluvial channels present under the influences of environmental elements (e.g. precipitation). Because these changes present a considerable randomness, this has an impact on the design of local management plans. In this way, the objective is to analyze the meander migration event in a river within the Ecuadorian coast (Pedro Carbo River) by integrating remote sensing data, precipitation and classification algorithms for the identification of trends and suggestions for river landscape management strategies. To achieve this, a four-stage workflow was carried out: (i) data collection and processing, (ii) calculation of morphometric parameters, (iii) analysis of climatic influences and (iv) generation of management guidelines. The results showed that the classification model achieves satisfactory results in water/soil discrimination, with an accuracy that exceeds 80% of correct answers for obtaining water bodies. Meanwhile, the calculation of morphometric parameters such as sinuosity and lateral migration, allowed contemplating at least six areas where the river reaches values greater than 1.5 (very sinuous), and absolute displacements greater than 300 meters, respectively. Additionally, a delay analysis showed that for the study area the relationship of precipitation with horizontal displacements can be explained with at least one period immediately prior to the change. Finally, a hierarchical management analysis (AMRO) suggested that there are different hydrological responses in the area, suggesting proposals such as revegetation and natural barriers. In summary, this study constitutes an essential resource for the consideration of the behavior of river dynamics in the subtropical zone of the Ecuadorian coast and showing how morphometric and hydroclimatic data can be integrated for the development of preventive management of the effects of changes in the river landscape.

Keywords: fluvial, lateral shift, remote sensing, sinuosity

Índice general

Evaluadores.....	5
Resumen.....	6
<i>Abstract</i>	7
Abreviaturas.....	10
Índice de figuras.....	11
Índice de tablas	11
Capítulo 1.....	12
1. Introducción	13
1.1 Descripción del Problema	14
1.2 Justificación del Problema	15
1.3 Área de estudio.....	17
1.4 Objetivos.....	18
<i>1.4.1 Objetivo general</i>	18
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i>	19
1.5 Marco teórico.....	19
Capítulo 2.....	24
2. Materiales y métodos	25
2.1 Etapa I: Obtención y preprocesamiento de los datos	26
2.2 Etapa II: Cuantificación de parámetros morfométricos	30
2.3 Etapa III: Análisis de influencias climáticas	31
2.4 Etapa IV: Orientaciones para la gestión sostenible del corredor fluvial	32
Capítulo 3.....	35
3. Resultados y análisis	36
3.1 Identificación de zonas de alta sensibilidad a cambios	36
3.2 Evaluación del modelo de clasificación binaria	38
3.2.1 Análisis de precisión	38

3.2.2	Importancia de índices espectrales en la clasificación.....	40
3.3	Análisis histórico de parámetros morfométricos.....	42
3.3.1	Migración lateral.....	42
3.3.2	Sinuosidad.....	44
3.4	Análisis de desfase temporal.....	48
3.5	Sugerencia de gestión de paisajes fluviales.....	49
Capítulo 4.....		52
4.	Conclusiones y recomendaciones	53
4.1	Conclusiones	53
4.2	Recomendaciones.....	56
Referencias.....		58
Apéndice A: Obtención y preprocesamiento de datos iniciales usando la librería “geemap” en Python		68
Apéndice B: Desarrollo de algoritmo de clasificación binaria usando la librería “scikit-learn” en Python		78
Apéndice C: Tabla resumen de la evaluación de los elementos que condicionan la movilidad lateral en base a los parámetros morfométricos e hidroclimáticos, y recomendaciones de gestión en base al marco de referencia AMRO.....		85
Apéndice D: Prueba de envío a Journal y estado de revisión		89

Abreviaturas

AMRO	Avoid, Mitigate, Restore, and Offset (Evitar, Mitigar, Restaurar, y Rxxxx, en inglés)
SIG	Sistemas de Información Geográfica
NIR	Near infrared (Infrarrojo cercano, en inglés)
SWIR	Shortwave infrared (Infrarrojo de onda corta, en inglés)
SWIR1	Subrango 1 de SWIR ($\sim 1.55 - 1.75 \mu\text{m}$)
SWIR2	Subrango 2 de SWIR ($\sim 2.08 - 2.35 \mu\text{m}$)
F1-Score	(Medida de evaluación para balance de precisión y sensibilidad)
ROC	Curva Operativa del Receptor
CCP	Coefficiente de correlación de Pearson

Índice de figuras

Ilustración 1.1 Zona de estudio / marco regional y local	18
Ilustración 2.1 Flujograma de trabajo para el análisis de migración de meandros en el área de estudio	25
Ilustración 2.2 Ejemplo de la manipulación de ráster a vector realizada por este estudio	29
Ilustración 2.3 Histórico de precipitación mensual acumulada para el área de estudio	32
Ilustración 3.1 Evolución de la trayectoria de los meandros en el área de estudio durante los años 1985-2024. De forma específica: (a) trayectorias sobrepuestas en el área de estudio e identificación de zonas críticas de cambios, (b) cambios por intervalos (4-5 años), y (c) cambios anuales en los últimos seis años	37
Ilustración 3.2 Matriz de confusión de la clasificación binaria	39
Ilustración 3.3 Curva ROC	40
Ilustración 3.4 Resultado de la ponderación de la importancia de los ocho índices espectrales calculados.....	42
Ilustración 3.5 Mapa de calor del desplazamiento horizontal absoluto en intervalos de 4-5 años	43
Ilustración 3.6 Mapa de calor para el desplazamiento horizontal absoluto anual del río durante los años 2019-2024.....	44
Ilustración 3.7 Valores de sinuosidad en intervalos de 4-5 años durante el período 1985-2024..	45
Ilustración 3.8 Valores de sinuosidad anuales registrados durante los años 2019-2024	47
Ilustración 3.9 Gráfico de análisis de retraso mediante Correlación de Pearson para un período de cinco años.....	49
Ilustración 3.10 Trayectorias de ríos por año y zonas críticas de migración sobre mapa base. En (a) se presenta la ubicación de los sectores identificados con relación al área de estudio y (b-j) en detalle los sitios con las zonas sugeridas de acuerdo con el marco AMRO [Google Earth Collection, 2022].....	50

Índice de tablas

Tabla 2.1 Detalle de las imágenes de las misiones Landsat y Sentinel utilizadas en este estudio	26
Tabla 2.2 Índices de agua, vegetación y suelo empleados en el desarrollo del modelo de clasificación binaria	27
Tabla 3.1 Reporte de métricas de la clasificación binaria realizada	39

Capítulo 1

*Ningún hombre puede cruzar el mismo río dos veces,
porque ni el hombre ni el agua serán los mismos*

Heráclito,
sobre la transitoriedad (c. 540–480 a. C.)

1. Introducción

El estudio de los ríos meándricos es de esencial importancia para la identificación de patrones de cambios del curso fluvial que influyan en detrimento del desenvolvimiento de actividades socioeconómicas de interés (Kiss & Blanka, 2012). Entre las afectaciones más comunes se pueden citar la pérdida de tierras agrícolas, erosión lateral del cauce, desbordamientos y sus posibles afectaciones a núcleos urbanos (Bertalan et al., 2018; Micheli et al., 2004). El reconocimiento de las modificaciones del canal principal de cualquier río ayuda a comprender las afectaciones más frecuentes, sin embargo, la aleatoriedad del desplazamiento del río, condiciona los mecanismos que rigen su evolución (Güneralp et al., 2012). Es por ello, que debido a la incertidumbre generada por la dinámica fluvial, la investigación derivada de riesgos asociados a eventos naturales de este origen, mantiene su vigencia como tema pertinente para la creación de planes de manejo y gestión de cursos fluviales a distintos niveles de acción administrativo (Noh et al., 2024).

A pesar del contexto mencionado en el párrafo anterior, los avances tecnológicos de los últimos años ponen a disposición nuevos recursos para el análisis del medio geográfico evidenciados en una predominancia de herramientas digitales que juntan la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos, y algoritmos avanzados de programación (Ali et al., 2019; Amini et al., 2024). Dentro de los estudios fluviales, las mencionadas técnicas y herramientas permiten el desarrollo de estudios en enfoques espaciales más flexibles en términos de escala, visibilizando propiedades de forma y dimensión de los cauces (Donovan et al., 2021; Monegaglia et al., 2018). De igual manera, recientemente la inclusión de enfoques algorítmicos avanzados de clasificación y predicción (ej. machine learning) han facilitado realizar múltiples tareas en el análisis de la evolución de cursos fluviales, tanto en la generación de datos para la detección automática del cauce, relaciones complejas en la comprensión de patrones complejos de

evolución de cursos fluviales y predicciones de tendencias a futuro (Debnath et al., 2022; Nagel et al., 2023; Yousefi et al., 2016).

Así, este trabajo se centra en la cuantificación de rasgos geométricos fluviales (desplazamiento lateral y sinuosidad), y su integración con una variable hidroclimática (precipitación), para la explicación de la dinámica histórica de los componentes espaciales de la morfología de un río en un ambiente tropical. En este contexto, la integración de ambos tipos de datos (morfométricos e hidroclimáticos), son de valiosa utilidad para obtener una relación entre la dinámica histórica de la precipitación y los cambios observados en el río, debido a la importancia del factor hidrometeorológico para impulsar la evolución fluvial. En consecuencia, a pesar de que la complejidad del cambio de las características morfométricas mantiene elevados niveles de procesos aleatorios y no lineales, este enfoque facilita la reducción de la incertidumbre asociada a la naturaleza imprevisible de la migración al integrar tipologías de datos fuertemente relacionados con factores esenciales dentro de cualquier estudio fluvial.

Esencialmente, esta investigación permite la comprensión de procesos de cambios críticos de cualquier canal fluvial, necesarios para la sugerencia de estrategias de gestión sostenible mediante enfoques jerarquizados de gestión ambiental, aplicados en contextos diferentes al de procesos fluviales, para la facilitación de los procesos de ordenamiento territorial. De tal manera, se perseguirá realizar una adaptación que posibilite la transición de una comprensión geomorfológica a marcos de gestión sostenibles de cursos con altas tasas de migración. Así, el presente trabajo constituye un primer recurso para la consideración de los elementos fluviales en los factores de riesgo de sectores con alta susceptibilidad.

1.1 Descripción del Problema

En la geomorfología fluvial, el evento de migración de meandros sigue siendo un tema de interés debido a la aleatoriedad con la que el canal fluvial se desplaza en términos de dirección, frecuencia, y amplitud de los tramos más inestables de un río (Limaye et al., 2021).

Tradicionalmente, los estudios de migración de meandros han sido abordados mediante el análisis de los rasgos geométricos del canal principal del cauce, esto ha ayudado a realizar una cuantificación histórica de la migración, sin embargo, estos enfoques eran fuertemente dependientes de la disponibilidad de imágenes óptimas sin ningún tipo de obstáculos que dificulten la capacidad de interpretación y digitalización de los investigadores, mediante el empleo de técnicas como fotogrametría. En los últimos años, con la popularización de las herramientas de teledetección y la emergente aplicación de nuevas tecnologías de aprendizaje automático, se han intentado diseñar metodologías para simplificar la obtención de la morfología del trazo principal del cauce dominante.

Esto se evidencia en la comprensión de este tipo de eventos en regiones tropicales como Ecuador, donde existe un limitado acceso a imágenes debido a interferencias atmosféricas, que incluyen la persistencia de un alto porcentaje de nubosidad, lo cual genera una escasa disponibilidad de imágenes para el registro de los cambios en períodos de tiempo prolongados. De tal manera, este trabajo busca reducir las brechas en el proceso metodológico que existe al realizar cualquier análisis de migración de meandros en zonas tropicales para la comprensión del evento y sus relaciones con variables hidroclimáticas de interés, bajo la propuesta de un marco metodológico reproducible para el estudio de los cambios históricos de cursos fluviales aplicados a una zona de influencia de un río tropical, para la obtención de un modelo entrenado con versatilidad en la aplicación independientemente de los elementos específicos del entorno, y su correspondiente respuesta espectral en las distintas fuentes de imágenes seleccionadas, otorgando un producto que sea extrapolable a otros contextos geográficos diferentes al ejemplo presentado en este trabajo, incluyendo por ejemplo influencias de la cobertura terrestre o época climática.

1.2 Justificación del Problema

En Ecuador, la Cuenca del Río Guayas, una de las más grandes del país (aproximadamente 55000 Km²), al ser el hogar de cerca de seis millones de habitantes (el 40% de la población total

del país), presentan múltiples ocurrencias de paleocauces, evidenciado en estudios como los de Dumont et al. (2010), donde se identifican los principales meandros abandonados en las cercanías del Río Daule, siendo relacionados con eventos climáticos del Holoceno y factores antropogénicos. Actualmente, la investigación científica en el estudio de los paleocanales y eventos de migración de meandros de la cuenca del Río Guayas es limitada, únicamente inicialmente propuesto por Guaranda & Muñoz (2008) dentro de proyectos como RIPAR (Dumont et al. 2010), y últimamente dentro de cursos fluviales de la cuenca alta como Clavijo-Rivera et al., (2023) en el Río Quevedo. A la fecha de este trabajo, los estudios mencionados se centran en la parte este del Río Daule, y existe una limitada producción científica que aborde directamente la morfometría de los ríos, mientras que para la parte occidental donde se ubican ríos como el Pedro Carbo, se observa que la mayoría de los estudios se han orientado hacia enfoques históricos de riesgos y variabilidades climáticas (Arteaga et al., 2006; Flores Abad & Álvarez Gutiérrez, 2022; Frappart et al., 2017; Pelckmans et al., 2024). De tal manera, la importancia del estudio del movimiento histórico de los meandros constituye una herramienta valiosa para la planificación territorial en la zona oeste de la cuenca del Río Daule, en la prevención de riesgos asociados a eventos naturales exógenos (inundaciones) (Ponce et al., 2022), alineando con los marcos globales de sostenibilidad como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (United Nations, 2023), en particular, los ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ODS 13 (Acción por el clima) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), debido a que la caracterización geomorfológica multitemporal realizada aporta criterios para perseguir la resiliencia urbana y rural en la gestión de corredores fluviales y su adaptación frente a sensibilidades hidroclimáticas (Bignoli et al., 2024; Lyu et al., 2022).

Por lo tanto, es necesario que los nuevos estudios de riesgos presenten información relativa al comportamiento histórico de los paleocanales para complementar los datos actuales en los planes de desarrollo territorial locales. Así, la brecha de investigación identificada constituye una oportunidad para el estudio de los paleocanales y su importancia como elemento del ecosistema

en la región. Es así como, el estudio de la integración de la observación es esencial para la comprensión integral del cambio, y de tal manera, entender como fortalece las capacidades de las herramientas de simulación a la vanguardia del estudio del evento de migración. En ese contexto, la pregunta de investigación de esta tesis es: ¿Cómo contribuye el uso de una clasificación binaria utilizando un algoritmo de aprendizaje automático al desarrollo de un marco jerarquizado de identificación de zonas de riesgo basado en un estudio de migración de meandros utilizando índices espectrales y datos de precipitación en un tramo del Río Pedro Carbo (Guayas) durante los años 1985-2024?

1.3 Área de estudio

El río Pedro Carbo (575000, 604000 E; 9794000, 9802000 N; UTM WGS 1984, Zona 17 Sur) se encuentra en la región costera de Ecuador, ubicada en las partes bajas de la provincia del Guayas (Ecuador) y se extiende por casi 60 kilómetros en dirección oeste-este. Fluye desde la Cordillera Costera Chongón-Colonche y drena en confluencia con el río Daule (Ilustración 1.1a). Este último es un afluente de la cuenca del río Guayas, que es uno de los sistemas de drenaje de agua más grandes de Ecuador. Además, la zona se caracteriza por dos zonas climáticas: una zona de clima húmedo megatérmico y una zona semihúmeda megatérmica tropical con una precipitación mensual promedio que varía de 500 a 1300 mm, y una temperatura anual promedio de 27 ° C (GADM Pedro Carbo, 2023).

El área de interés para el presente estudio se caracteriza por tres coberturas terrestres principales. Como se detalla en la Ilustración 1.1b, el curso superior se distingue por intercalaciones de tierras agrícolas, pastizales, pocos bosques y parches arbustivos. Además, los alrededores de curso medio se caracterizan por la presencia de la mayoría de los asentamientos y la evidencia de eventos erosivos y de deposición de migración de meandros dentro de la cuenca del río, como lagos en forma de herradura, costas erosionadas, barras puntuales y patrones de flujo de ríos de curvas geométricas cerradas. Finalmente, los alrededores de la llanura aluvial de curso

más bajo están dominados por una extensa actividad agrícola con escasez de caminos sinuosos y características erosivas de los ríos.

En la actualidad, las empresas agroindustriales dentro del área de estudio representan la principal actividad económica para la mayoría de las áreas rurales del entorno (Ilustración 1.1b). Sin embargo, los asentamientos en las áreas cercanas a menudo se ven afectados por eventos de inundación cuando las precipitaciones han alcanzado su punto máximo, específicamente durante las estaciones lluviosas intensas del año (diciembre a abril).

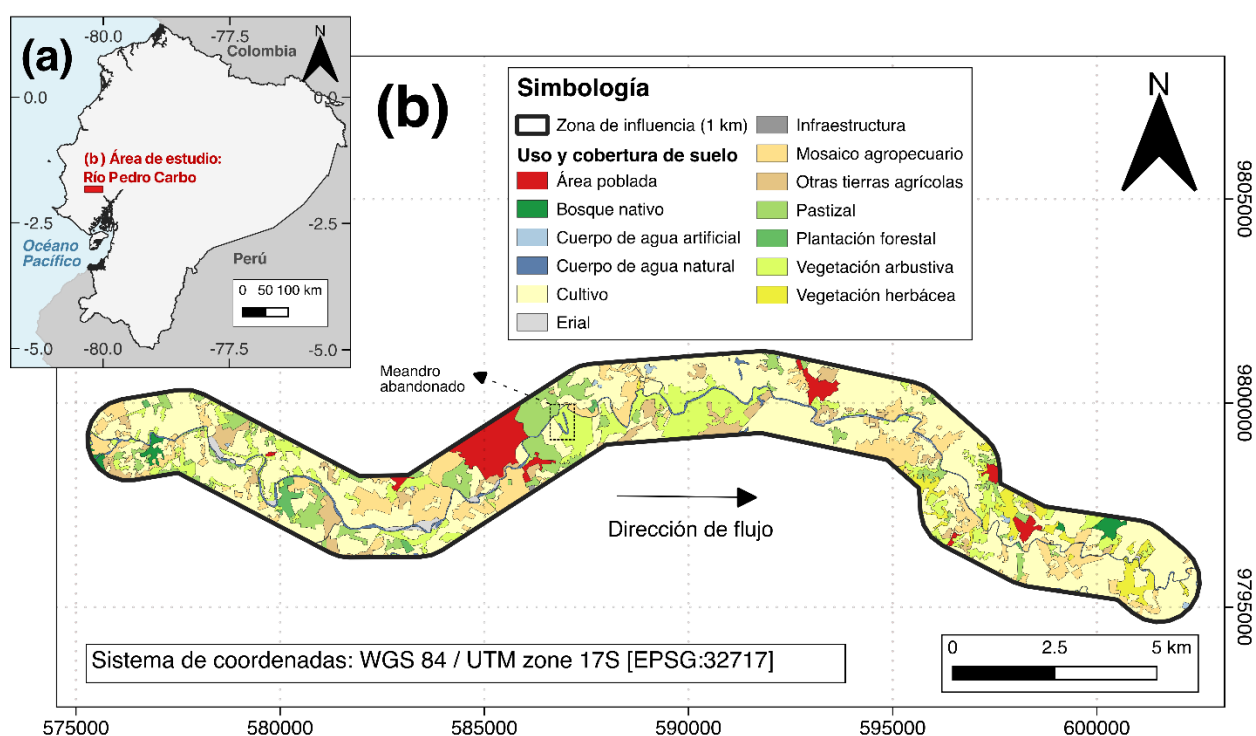


Ilustración 1.1 Zona de estudio / marco regional y local

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la dinámica del evento de migración de meandros en un contexto geográfico húmedo tropical en el interior de la costa ecuatoriana mediante el uso de índices espectrales de agua, suelo y vegetación, datos históricos de precipitación y algoritmos avanzados de

clasificación binaria para la identificación de tendencias históricas en la evolución del paisaje fluvial.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Seleccionar un conjunto de índices espectrales que faciliten la obtención de la forma del río mediante el entrenamiento de un modelo de clasificación binaria y la evaluación de su desempeño con el cálculo de métricas de exactitud y robustez del modelo.
2. Calcular parámetros morfométricos fluviales para la cuantificación del cambio de la geometría de un curso fluvial costero en periodos de 4-5 años y en transiciones por año en periodo reciente.
3. Estimar la sensibilidad por variables hidroclimáticas, mediante el uso de series históricas de precipitación y migración lateral de cursos fluviales para identificar el tiempo de respuesta sobre posibles cambios a lo largo del trazado fluvial.
4. Aportar evidencia científica que integre los resultados del análisis morfométrico y de retardo histórico de precipitación para la gestión sostenible del corredor fluvial basado en marcos de clasificación jerarquizados.

1.5 Marco teórico

Los ríos meándricos son un elemento característico que produce corredores para el intercambio comercial, la navegación y el uso de agua en agricultura. Sin embargo, estas geoformas son susceptibles a eventos de inundación frecuentes y no previstos por stakeholders a nivel local (Z. Li et al., 2023). Es así como el análisis espacial de la geometría de ríos es esencial para entender la evolución a lo largo del tiempo y las implicaciones ecológicas que conlleva el cambio de condiciones iniciales en la preservación de hábitats y el desarrollo de estrategias de mitigación de riesgos por inundaciones (Brookes, 1990). De tal manera, entender el comportamiento de características geométricas a lo largo del tiempo, como la sinuosidad son

cruciales para la interpretación de procesos hidrodinámicos que promuevan estabilidad en los sistemas fluviales (Yu et al., 2023).

Por ello, en Geomorfología Fluvial existen marcadas diferencias entre la geometría de los sistemas de canales fluviales, al clasificarse en varias categorías de acuerdo con el grado de sinuosidad en cursos rectos, meandriiformes y trenzados (Gutiérrez Elorza, 2008). Estos canales presentan una dinámica espacial y temporal continua, sin embargo, dejan a su paso geoformas singulares llamadas cursos meándricos abandonados o paleocanales (J. Hooke, 2004).

El estudio del comportamiento de los cursos meándricos ha sido de interés en diversas aplicaciones que incluyen el manejo de riesgos naturales, agricultura, y análisis de evolución de paisaje y ecosistemas (Bertalan et al., 2018; Cox et al., 2014). La integración de Sistemas de Información Geográfica, ayuda significativamente al análisis de parámetros geométricos como sinuosidad (Dente et al., 2021), estrangulamiento de meandros (Ghosh et al., 2023), y a otros factores hidrográficos que influyen en el desarrollo de la migración como el mapeo de la erosión y sedimentación provocada por la corriente del río e influencias antropogénicas como la construcción de viviendas y la agricultura (Donovan et al., 2021; J. M. Hooke, 2022; Mohanta et al., 2018).

Los efectos mencionados en el párrafo anterior han sido analizados en los últimos años mediante enfoques que emplean sensores remotos usando índices espectrales dedicados a la extracción de cuerpos de agua o de resaltar detalles de cualquier medio acuático. Por ejemplo, el uso del Índice de Agua Normalizado (NDWI, en inglés), que relaciona longitudes de onda con alta sensibilidad a medios acuáticos (ej. infrarrojo e infrarrojo cercano) (McFeeters, 1996). Sin embargo, existen mejoras en los índices para la identificación de cuerpos de agua como el NDWI modificado (mNDWI) (Xu, 2006), especialmente usados en zonas inundables con influencia de la vegetación, como por ejemplo en humedales (Basnayaka et al., 2022). En conjunto, otros índices como el índice de vegetación normalizado (NDVI), también ha sido utilizado para la

discriminación de interfases agua-suelo-vegetación, para la reducción de la presencia de sesgos en la interpretación de cuerpos de agua (Marchetti et al., 2016; Zhou & Tang, 2022), ya que factores como la sensibilidad al ruido pueden hacer que los índices detecten erróneamente los bordes, especialmente en canales estrechos (Ning & Lee, 2021).

Análogamente, los índices mencionados anteriormente se complementan con el uso de algoritmos avanzados de clasificación (machine learning), para la detección automática de los píxeles de agua. Por ejemplo, existen estudios que presentan aplicaciones en las que algoritmos como eXtreme Gradient Boost son útiles para alcanzar predicciones de nuevas trayectorias en la planicie de inundación (Amini et al., 2024). Adicionalmente, el uso de otros algoritmos que convencionalmente son usados en sensores remotos como Random Forest, también ha sido aceptado debido al mejoramiento de la precisión cuando se utilizan varias variables de distinto tipo, evidenciando una robustez considerable ante grandes conjuntos de datos complejos (Tyrallis et al., 2019).

Existen casos relevantes de altas tasas de migración de meandros a nivel mundial, como el Río Ucayali (Perú) (Schwenk & Foufoula-Georgiou, 2016), Río Mamoré (Bolivia-Brasil) (Ahmed et al., 2019), y el Río Mississippi (Estados Unidos) (McElroy & Nittrouer, 2021). En ellos, la configuración espacial en términos de características geométricas sigue siendo objeto de estudio para la identificación de patrones de desarrollo a lo largo del tiempo (Nardini & Brierley, 2021), ya que debido a la complejidad del evento, últimamente se ha discutido sobre la influencia de otros factores como la cobertura de suelo o vegetación, por las evidencias como indicador de stress antropogénico y cambio climático en riberas de cursos fluviales (Ielpi et al., 2022).

Por ello, a pesar de que dos tercios de los cursos fluviales a nivel mundial se encuentran intervenidos por la acción humana debido a la necesidad de los núcleos urbanos en mitigar impactos relacionados con erosión e inundaciones (Clavijo-Rivera et al., 2023; Grill et al., 2019), las medidas implementadas para controlar la migración lateral de canales de ríos pueden crear

nuevas condiciones en los que el fenómeno presenta otras características similares a las evidenciadas en cursos no intervenidos (Guo et al., 2021; Guzelj et al., 2020).

Esencialmente, la restauración de cuerpos fluviales por migración de meandros, tiene cuatro ejes de importancia (*hidrológico, geomorfológico, ecológico y biogeoquímico*), que se interrelacionan de acuerdo con la escala y las condiciones ambientales de cada sector (Polvi et al., 2020). No obstante, que la evidencia sugiere que muchos ríos mantienen un nivel de biodiversidad significativo al proveer de servicios relacionados con la parte hídrica, fundamental para el sostenimiento de la biota local (Fuß et al., 2024). Muchos de ellos, experimentan presiones antropogénicas debido a construcciones de canales artificiales, represas, extracción de agua y crecimiento de zonas urbanas, siendo un factor contraproducente para el sostenimiento de la biodiversidad, la calidad ambiental y rasgos geomorfológicos singulares derivados de los procesos de erosión-depositación de los ríos (Nagel et al., 2023; Nath & Ghosh, 2022; Velastegui-Montoya et al., 2024).

La gestión tradicional de los cursos fluviales tiene como ejemplo la canalización y rectificación de ríos con el objetivo de reducir la longitud de los meandros, aumentando la cantidad de tierras disponibles en las riberas de los ríos y mitigar los efectos de las inundaciones (Holbrook & Allen, 2021). Sin embargo, este tipo de intervenciones impactan significativamente en la reducción de los ecosistemas debido a la limitación para el intercambio de nutrientes y organismos biológicos (D. Wang et al., 2020; Y. Wang et al., 2021). Por ello, los nuevos enfoques de restauración incluyen el control de la migración, mediante la mejora de la conectividad lateral, eliminando las construcciones artificiales, de tal manera que se vuelvan a generar los procesos naturales de una forma sostenible que promuevan beneficios ecológicos a largo plazo, similar a los evidenciados en Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) (Dueñas-Tovar et al., 2024; Mazur, 2021).

Entre los ejemplos de estrategias de restauración de ríos, se encuentran aquellas donde existe una disposición de vegetación ripariana para influenciar la disminución de la velocidad del flujo en las partes más externas del canal fluvial (Azarisamani et al., 2020; Zhu et al., 2022). De igual manera, la retirada de presas o diques que obstaculicen el paso natural del río y fomenten la generación de espacios vitales para especies acuáticas (Leisher et al., 2022). Diversos casos de estudio a nivel mundial, evidencian una necesidad para restaurar las condiciones naturales de estos ecosistemas, incluyendo aquellas que empíricamente pueden parecer contraproducentes para espacios naturales cercanos a otros con intervención humana (Giergiczny et al., 2022), un ejemplo de ello ocurre en la Cordillera de los Cárpatos (Polonia), donde además de la ejecución de las actividades de restauración fluvial al establecer un corredor de erosión de ríos, se hace un monitoreo con proyecciones a futuro y evaluaciones en periodos definidos (Wyżga et al., 2021).

Es por ello que, debido a la importancia del tema para la resiliencia y el cuidado de los ecosistemas fluviales debido a las presiones antropogénicas del entorno, es necesario de un análisis exhaustivo de las experiencias en la literatura relacionada a la restauración ecológica de los cambios de cursos fluviales para la sugerencia de inclusión de elementos que lleven a metodologías más robustas y replicables (Sheng et al., 2019).

Capítulo 2

*El mundo es un puente, crúzalo,
mas no construyas una morada en él*

Proverbio Hindú

2. Materiales y métodos

Este trabajo empleó un método que persiguió la sistematización del análisis de migración de meandros aplicado a un caso de estudio en un río tropical de la costa interior ecuatoriana, mediante el uso de imágenes satelitales para el cálculo de índices espectrales de agua, vegetación y suelo; programas de sistemas de información geográfica, algoritmos avanzados de clasificación usando lenguajes de programación (Python v.3.13.1), datos históricos de precipitación, que contribuyan la gestión del paisaje fluvial basado en una referencia de cambios históricos del canal principal. Para conseguir lo mencionado, esta investigación se dividió en tres fases que incluyen: (i) obtención y preprocesamiento de datos, (ii) cuantificación de parámetros morfométricos, (iii) análisis de influencias climáticas, y (iv) orientaciones para la gestión del corredor fluvial (Ver en Ilustración 2.1).

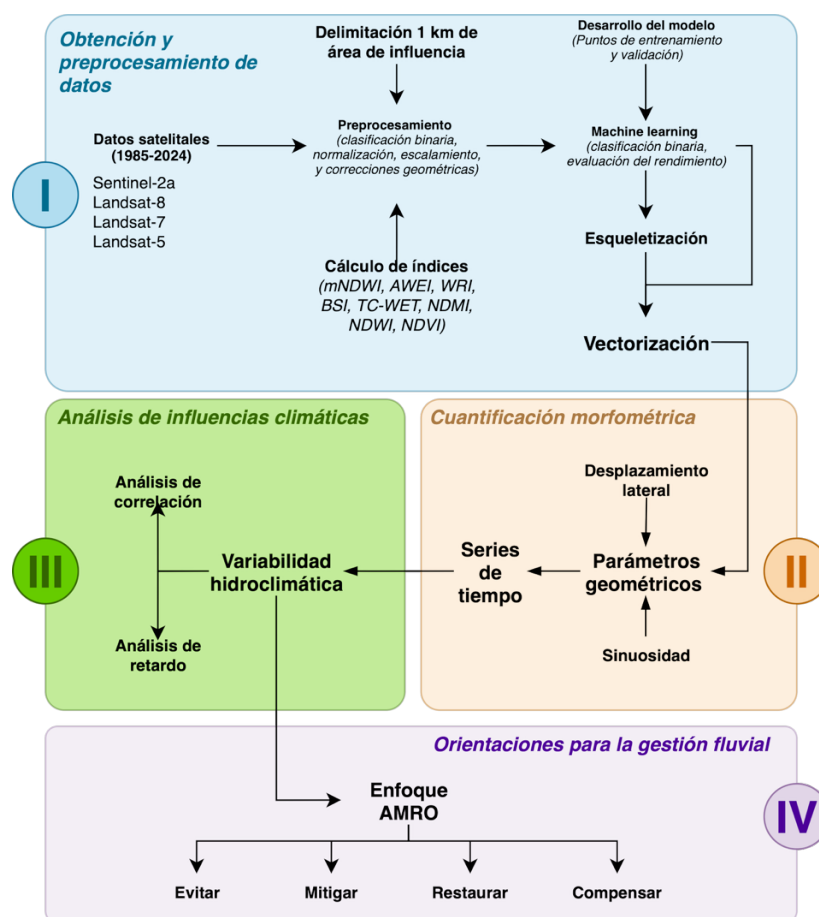


Ilustración 2.1 Flujograma de trabajo para el análisis de migración de meandros en el área de estudio

2.1 Etapa I: Obtención y preprocesamiento de los datos

La investigación inició con la obtención de las imágenes satelitales necesarias para la extracción de los cambios históricos del río, en el mayor intervalo de tiempo posible, considerando elementos que aseguren la clara identificación del curso fluvial, como la disponibilidad de imágenes sin perturbaciones meteorológicas, esencialmente basado en términos de cobertura de nubes. De tal manera, se realizó la obtención de diversas fuentes de datos de cuatro misiones satelitales de observación terrestre (e.g. Landsat-5, Landsat-7, Landsat-8, y Sentinel-2a), mediante el uso de la API de Google Earth Engine “*geemap*”, en el lenguaje de programación Python (versión 3.13.1), las mismas que son detalladas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Detalle de las imágenes de las misiones Landsat y Sentinel utilizadas en este estudio

Satélite/Sensor	Fecha (dd/mm/yyyy)	Resolución (m)	Nivel de colección
Sentinel-2a/MSI	20/10/2024	10	Level-2A
Sentinel-2a/MSI	01/09/2023		
Sentinel-2a/MSI	14/04/2022		
Sentinel-2a/MSI	25/12/2021		
Sentinel-2a/MSI	23/07/2020		
Landsat 8/OLI-TIRS	10/04/2019	30	Tier 1, Collection 2, Level 2
Landsat 8/OLI-TIRS	21/08/2015		
Landsat 7/ETM+	02/10/2010		
Landsat 7/ETM+	29/05/2005		
Landsat 5/TM	11/08/2000		
Landsat 5/TM	25/03/1996		
Landsat 5/TM	21/02/1990		
Landsat 5/TM	27/03/1985		

Debido a que en gran parte del conjunto inicial de imágenes, presentan un nivel de preprocesamiento provisto de correcciones atmosféricas, radiométricas y geométricas estandarizadas, como en nivel 2 para el caso de las correspondientes a las misiones Landsat y nivel 2A a las de la misión Sentinel, este trabajo consideró que las imágenes obtenidas estaban listas para el procesamiento posterior. No obstante, un caso especial fue el de la imagen del sensor Landsat-5, correspondiente al año 1996, donde a pesar de presentar correcciones radiométricas,

debido a un desplazamiento no previsto, necesitó de una corrección geométrica, la cual fue realizada mediante georreferenciación usando el software de sistema de información geográfica QGIS (versión 3.10.12 Prizren). Adicionalmente, en el caso de las imágenes Landsat-7 (año 2005 y 2010, ver Tabla 2.1), se presentó la falla de conector de línea de exploración (SLC-off, en inglés), manifestandose como líneas de píxeles vacíos a lo largo del área de estudio, lo cual hizo necesario que las imágenes tengan un procesamiento para “rellenar” dichos espacios con falta de información. De tal manera, se aplicó una de las técnicas recomendadas para este tipo de eventualidades, que consistió en el “relleno” con información de fechas cercanas, al igual que lo recomendado por la literatura existente (Q. Wang et al., 2021). Así, la imagen correspondiente al año 2005 fue completada con los píxeles del año 2000, y para el año 2010 se realizó el mismo procedimiento usando la imagen del 2015.

Análogamente, las imágenes obtenidas y corregidas en todos los años disponibles sirvieron para el cálculo de ocho índices espectrales con enfoque en agua, juntos a otros de suelo y vegetación. Los índices escogidos se pueden ver detallados en la Tabla 2.2. Estos índices fueron calculados mediante sus respectivas expresiones usando el paquete *geemap*, en Python. Posteriormente, estos índices fueron exportados a una resolución de 12m por pixel, y agrupados en un ráster multibanda (Ver Apéndice A).

Tabla 2.2 Índices de agua, vegetación y suelo empleados en el desarrollo del modelo de clasificación binaria

Nombre de índice	Banda/Longitud de onda	Expresión	Referencia
<i>Agua</i>			
NDWI (Normalized Difference Index)	NIR (700 – 1300 nm) SWIR (1300 – 2500 nm)	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	(Gao, 1996)
mNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)	Verde (520 – 600 nm) SWIR (1300 – 2500 nm)	$\frac{Verde - SWIR}{Verde + SWIR}$	(Xu, 2006)
AWEI (Automated Water Extraction Index)	Azul (450 – 520 nm) Verde (520 – 600 nm) NIR (700 – 1300 nm) SWIR1 (1500 – 1800 nm)	$Azul + (2.5 \cdot Verde) - 1.5 \cdot (NIR + SWIR1) - (0.25 \cdot SWIR2)$	(Feyisa et al., 2014)

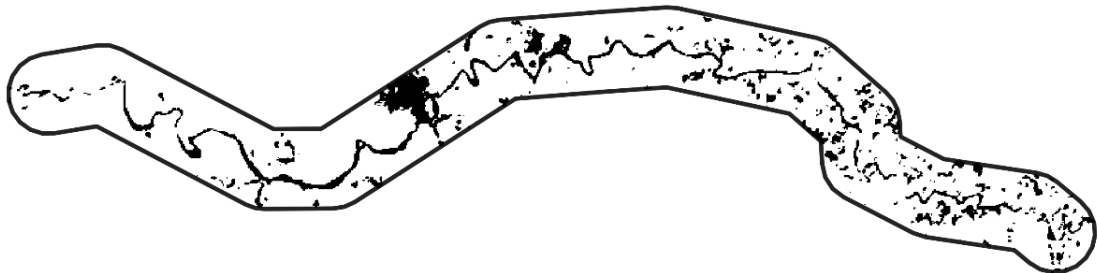
	SWIR2 (2000 – 2500 nm)		
WRI (Water Ratio Index)	Verde (520 – 600 nm) Rojo (630 – 690 nm) NIR (700 – 1300 nm) SWIR (1300 – 2500 nm)	$\frac{Verde - Rojo}{NIR + SWIR}$	(Shen & Li, 2010)
<i>Vegetación</i>			
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	NIR (700 – 1300 nm) Rojo (630 – 690 nm)	$\frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$	(Tucker, 1979)
<i>Suelo</i>			
TC-WET (Tasseled Cap Wetness Index)	Azul (450 – 520 nm) Verde (520 – 600 nm) NIR (700 – 1300 nm) SWIR1 (1500 – 1800 nm) SWIR2 (2000 – 2500 nm)	$0.0315 \cdot Azul + 0.2021 \cdot Verde + 0.3102 \cdot NIR - 0.6806 \cdot SWIR1 - 0.6109 \cdot SWIR2$	(Crist, 1985)
BSI (Bare Soil Index)	Azul (450 – 520 nm) Rojo (630 – 690 nm) SWIR2 (2000 – 2500 nm) NIR (700 – 1300 nm)	$\frac{(SWIR2 + Rojo) - (NIR + Azul)}{(SWIR2 + Rojo) + (NIR + Azul)}$	(Salas & Kumaran, 2023)
NMDI (Normalized Moisture Difference Index)	NIR (700 – 1300 nm) SWIR1 (1500 – 1800 nm) SWIR2 (2000 – 2500 nm)	$\frac{NIR - (SWIR1 - SWIR2)}{NIR + (SWIR1 - SWIR2)}$	(L. Wang & Qu, 2007)

A continuación, para el desarrollo de la identificación binaria (agua/suelo) que obtenga la forma del río, se realizó el entrenamiento de un modelo de clasificación supervisada, que inició con el muestreo de 286 puntos de entrenamiento, y 135 puntos de validación del mismo. Ambos conjuntos fueron guardados en formato shapefile (.shp) en el software QGIS. Adicionalmente, los dos conjuntos fueron el insumo de un algoritmo de Random Forest, realizado mediante código en Python usando la librería *scikit-learn*, para el entrenamiento y validación del modelo de clasificación propuesto, junto a la manipulación ráster usando la librería *rasterio* (Ver Apéndice B).

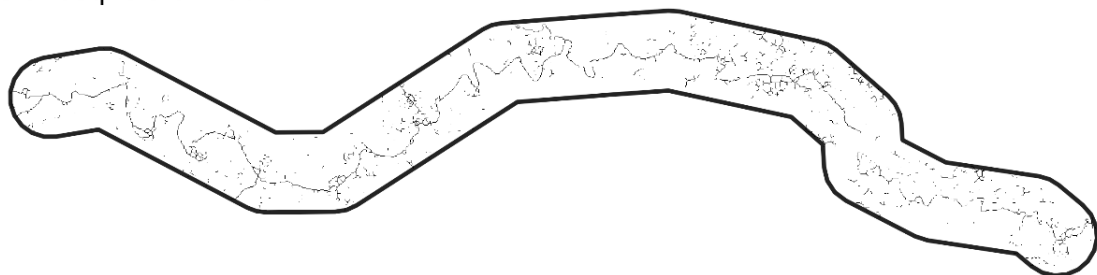
Después, para la simplificación del estudio de los parámetros morfométricos se realizó la identificación del canal principal del curso fluvial en el área de estudio y la finalización de la limpieza de los datos transformados de ráster a vector. Para el efecto, los distintos raster

multibanda por año pasaron por un proceso de esqueletización usando la herramienta *r.thin* contenida en el conjunto de herramientas *GRASS GIS* (v.7.8.6), y finalmente vectorizadas mediante el uso de la función *r.to.vect* del conjunto referido anteriormente. Esto permitió la manipulación para la eliminación de píxeles de poco interés para el estudio (ej. lagunas artificiales, lagunas naturales, y zonas inundables), como también por errores heredados de la clasificación errónea de píxeles (Ver Ilustración 2.2).

(a) Clasificación binaria



(b) Ráster esqueletonizado



(c) Eje central vectorizado

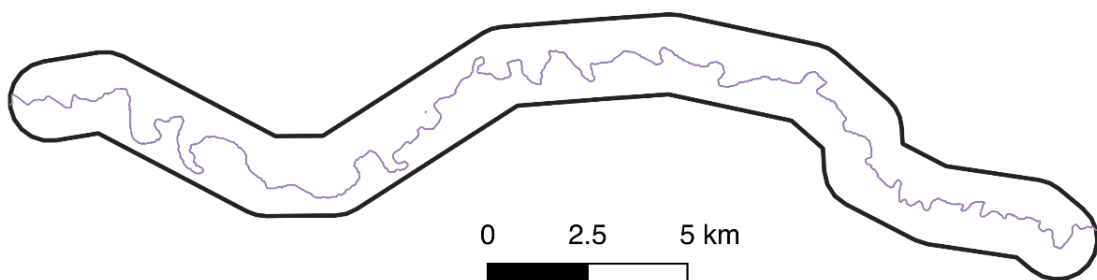


Ilustración 2.2 Ejemplo de la manipulación de ráster a vector realizada por este estudio

Como último paso dentro de esta etapa, se realizó la validación del modelo de clasificación binaria, de acuerdo con lo convencionalmente realizado por la bibliografía en este tipo de enfoques. De tal manera, esta etapa del estudio incluyó el cálculo de una matriz de confusión, que permite la visualización del rendimiento del modelo, mostrando los aciertos y errores en las dos clases objetivo (“agua” y “otras coberturas”). Análogamente, la herramienta permite el cálculo de diversas métricas de desempeño que incluyen precisión (confiabilidad de la predicción),

sensibilidad/recall (capacidad de detección), F1-score (rendimiento global del clasificador). Adicionalmente, se realizó una Curva Característica Operativa del Receptor (ROC, en inglés), la misma que sirve para la evaluación del rendimiento del modelo realizado. Esta curva, hace una relación entre las tasas de los falsos positivos y los positivos reales, para la cuantificación de la potencia estadística del modelo entrenado. Y, el área bajo dicha curva es una medida de la calidad predictiva del modelo, para saber la medida en el que la clasificación reconoce ambas clases. Finalmente, esta etapa también incluyó la cuantificación de la importancia de cada uno de los índices calculados para el entrenamiento del modelo resultante, con el objetivo de identificar los índices que distinguen mejor el cuerpo de agua, de tal manera que, se optimice el modelo en futuras aplicaciones reduciendo el número de índices a considerar, sin comprometer al rendimiento general del algoritmo de clasificación.

2.2 Etapa II: Cuantificación de parámetros morfométricos

Una vez se obtiene el producto de la etapa anterior, correspondiente a la clasificación binaria enfocada en la extracción de los cursos fluviales en cada año de estudio. Esta parte del trabajo continuó con la evaluación de los parámetros morfométricos de mayor relevancia para la explicación de la intensidad del evento de migración de meandros. Para el efecto, se seleccionó analizar sinuosidad y migración lateral (distancia euclidiana absoluta en metros), debido a su influencia en la visibilización de elementos de la evolución de la dinámica fluvial. Por ejemplo, la migración lateral, es determinante en la identificación de la madurez de los eventos de migración de meandros y su estabilidad desde una perspectiva histórica (Yang et al., 2015). Mientras, la sinuosidad es capaz de mostrar la evolución morfológica y su relación con parámetros de energía hidráulica, para la influencia de la dinámica de meandros y la generación de elementos erosivos a lo largo del río (ej. procesos de erosión y deposición) (Lalramchulloo et al., 2021; Qin et al., 2024).

Para el primer parámetro morfométrico (sinuosidad), el análisis incluyó el muestreo de los valores de sinuosidad, tomando en cuenta un segmento real del eje central del río (ventana) de 2500 metros, cada 3 metros de separación, estos valores fueron considerados debido a que

garantizan una cuantificación a detalle del valor de la sinuosidad en todo el tramo del río. Este valor es dividido por la distancia en línea recta del punto inicial y final del muestreo. El resultado es una medida adimensional de la tortuosidad del río en la separación detallada, donde dicha característica está dada por valores superiores a 1.5 de acuerdo a la literatura existente (Islam et al., 2021).

Análogamente, el análisis de la migración lateral consideró un análisis focalizado en las áreas con mayor desplazamiento lateral, de acuerdo con una inspección visual inicial, que eligió un número específico de puntos a lo largo de la extensión del canal principal del río, en las cuales se trazó una línea con una perpendicularidad relativa al sentido del desplazamiento. Una vez seleccionadas y definidas aquellas secciones, se procedió a calcular la distancia de los interceptos por año de acuerdo con esa línea, de tal manera que, se obtenga una cuantificación absoluta del movimiento del canal fluvial relativo a ese punto, para cada transición reportada por este trabajo.

Ambos parámetros fueron analizados en períodos largos (4-6 años) conforme la disponibilidad de imágenes en el análisis histórico; y en períodos cortos (cada año), debido a la mayor accesibilidad de las mismas. Esto sirvió para la comprensión del comportamiento tanto de la migración lateral como de la sinuosidad del curso fluvial en períodos largos con limitada disponibilidad de datos, al igual que en los últimos años donde el número de imágenes disponibles es mayor debido a la diversidad de productos derivados de las distintas misiones satelitales vigentes (ej. Landsat-8,-9, Sentinel 2a).

2.3 Etapa III: Análisis de influencias climáticas

Para una comprensión de la influencia de los factores climáticos históricos en el área de estudio, se propuso un análisis que incluyó una estimación de la influencia de la precipitación sobre uno de los parámetros morfométricos analizados (migración lateral). Para ello, se recolectó la precipitación acumulada mensual, durante el período analizado (1984-2024), usando los datos históricos del portal POWER NASA (NASA, 2025). En la Ilustración 2.3, se puede observar el comportamiento histórico del parámetro mencionado y resaltado en rojo las fechas de las imágenes

seleccionadas, donde se evidencia la diversidad de condiciones climáticas en cada una de las fechas para el muestreo necesario en etapas anteriores en el entrenamiento del modelo de clasificación binaria.

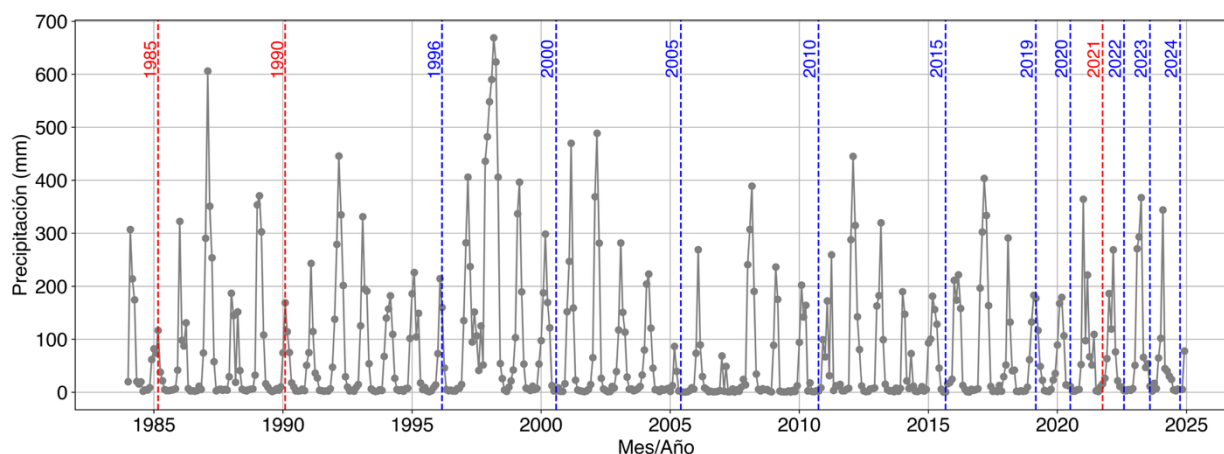


Ilustración 2.3 Histórico de precipitación mensual acumulada para el área de estudio

Estos datos sirvieron para realizar un análisis de desfase temporal (*time-lag analysis*, en inglés), para la determinación de la cantidad de períodos de tiempo que se encuentran explicando el evento de migración lateral en el área de interés. Para ello, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (CCP) (Pearson & Galton, 1895; Wilks, 2011), el cuál cuantifica la medida y sentido en que un par de variables cuantitativas se relacionan entre sí. El valor del CCP fluctúa entre -1 y 1, donde los valores cercanos al límite representan la fuerza de la correlación, pudiendo ser esta negativa o positiva, y convencionalmente el cero como ausencia de la misma. Dentro de esta fase, el análisis realizado sirvió para la comprensión de la existencia de la relación causal entre ambas variables, y la determinación si la precipitación actúa como un factor detonante e inmediato respecto a los cambios laterales del río en los años de estudio de este trabajo.

2.4 Etapa IV: Orientaciones para la gestión sostenible del corredor fluvial

Finalmente, en esta etapa se realizó un análisis que persiguió la administración sostenible del trazo fluvial de estudio, considerando enfoques que incluyan aspectos espaciales para la dimensionalidad de las posibles influencias del desplazamiento del canal fluvial en el área de estudio. Bajo este mismo objetivo, esta etapa usó una adaptación del enfoque AMRO (avoid-evitar,

mitigate-mitigar, restore-restaurar, y offset-compensar, en inglés respectivamente), definido por la literatura como un marco de intervención ambiental cuyo objetivo es el mantenimiento del equilibrio de biodiversidad, funcionalidad de los servicios ecosistémicos, y abióticos para la promoción de la resiliencia en base a dinámicas ambientales naturales y antropogénicas (Saenz et al., 2013). Este marco es ampliamente utilizado en conservación de biodiversidad, compensación ecológica de operaciones mineras, restauración de humedales que maneja un criterio jerárquico bajo un orden de prioridad de atención, promoviendo la reparación de efectos adversos y la generación de impactos a largo plazo (Ten Kate et al., 2004). Dicha secuencia se respaldará bajo las siguientes premisas en este trabajo, para cada uno de los cuatro ejes del enfoque:

- ***Evitar:*** En este eje se identificaron zonas de alta migración de meandros, donde nuevos asentamientos e infraestructura no son seguros de construir.
- ***Mitigar:*** Este eje ayudó a la identificación de zonas donde existen altas tasas de movilidad del canal principal. En dichas áreas, las estructuras de protección fueron recomendadas para la reducción de los efectos erosivos y la estabilización de los márgenes, para la minimización de los efectos de la migración en las orillas fluviales.
- ***Restaurar:*** A través de este eje, se recomendó la restauración de paisajes con impacto del evento de migración. Como ejemplo, se tienen la reconexión y/o restauración de los meandros abandonados, con el objetivo de reducir la energía y consecuentemente reducir el riesgo de erosión dado por perturbaciones naturales y antropogénicas.
- ***Compensar:*** Este eje se centró en la recomendación de sectores para la implementación de acciones de compensación, como por ejemplo, la delimitación de nuevos ambientes acuáticos riverinos dentro del área de estudio.

Para ello, se usó los datos obtenidos previamente sobre las trayectorias de los ríos y los datos históricos de precipitación, para la identificación de los valores extremos de desplazamiento

horizontal y sinuosidad, junto a la precipitación acumulada anual. Estos valores sirvieron para el establecimiento de una zona de amortiguamiento (buffer) recomendada de acuerdo con la categoría de la movilidad del canal fluvial (1.5x, 2x, o 2.5x el desplazamiento). Análogamente, se realizó el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson para cada uno de las secciones transversales empleadas en el análisis para la obtención del desfase temporal más significativo, con su correspondiente p-valor (robustez estadística), para la cuantificación de la medida en que el parámetro de precipitación influencia el desplazamiento horizontal del canal principal del río. Este valor fue empleado en la determinación de la ventana de prevención, que corresponde al período de tiempo en el que se recomienda la intervención antes del inicio de la generación de un nuevo trayecto fluvial, y permitió la determinación de prioridad de acuerdo con el marco AMRO, bajo medidas específicas de intervención (ej. delimitación de sectores de protección, revegetación). En síntesis, todos estos cálculos permitieron la unión de parámetros geomorfológicos, para la articulación de la respuestas de gestión respecto de la memoria hidrológica de las secciones con mayor movilidad en el área de estudio.

Capítulo 3

*Gleich mit jedem Regengusse
Ändert sich dein holdes Tal,
Ach, und in demselben Flusse,
Schwimmst du nicht zum zweitenmal.*

*[Con cada Lluvia,
tu hermoso valle cambia,
Ah, y en el mismo río,
no se nada dos veces]*

Johann Wolfgang von Goethe,
Dauer im Wechsel (1806)

3. Resultados y análisis

Los resultados de este trabajo se encuentran divididos en cinco secciones que en primer lugar explican de forma preliminar donde se encuentran las principales ocurrencias de migración, para la facilitación del cálculo de parámetros morfométricos asociados a la dinámica fluvial. No obstante, persiguen la identificación de las principales características geométricas del área de estudio, y la explicación de la importancia desde una perspectiva histórica para la puesta en valor de los datos relacionados a los cambios del canal principal del río para la gestión de paisajes fluviales en zonas tropicales y sentar la base para la generación de sugerencias de manejo.

3.1 Identificación de zonas de alta sensibilidad a cambios

La primera parte de esta sección comienza con la identificación de las partes más propensas a los cambios laterales en la zona de estudio (Ver Ilustración 3.1). La superposición de los cursos fluviales visto en la Ilustración 3.1a, permite observar como dichos cambios no se limitan en una zona en específico, ni están en un mismo patrón de magnitud, infiriendo una ausencia de periodicidad en el patrón histórico.

Adicionalmente, la visualización de forma empírica permitió la selección de 14 secciones transversales (Ver Ilustración 3.1.a), persiguiendo la forma del movimiento lateral del río, y considerando su emplazamiento las zonas de máxima amplitud, de acuerdo que las mismas que posteriormente serán de esencial utilidad para la cuantificación de la migración lateral. Anticipadamente, se puede observar como existen más de tres zonas de alta tasa de migración a lo largo del curso seleccionado, con mayor ocurrencia en el curso medio. No obstante, que las mayores evidencias se encuentran en las partes medias y bajas, se puede observar una mayor tasa de cambios en las partes altas, como en las secciones 1 y 2, en todos los años extraídos.

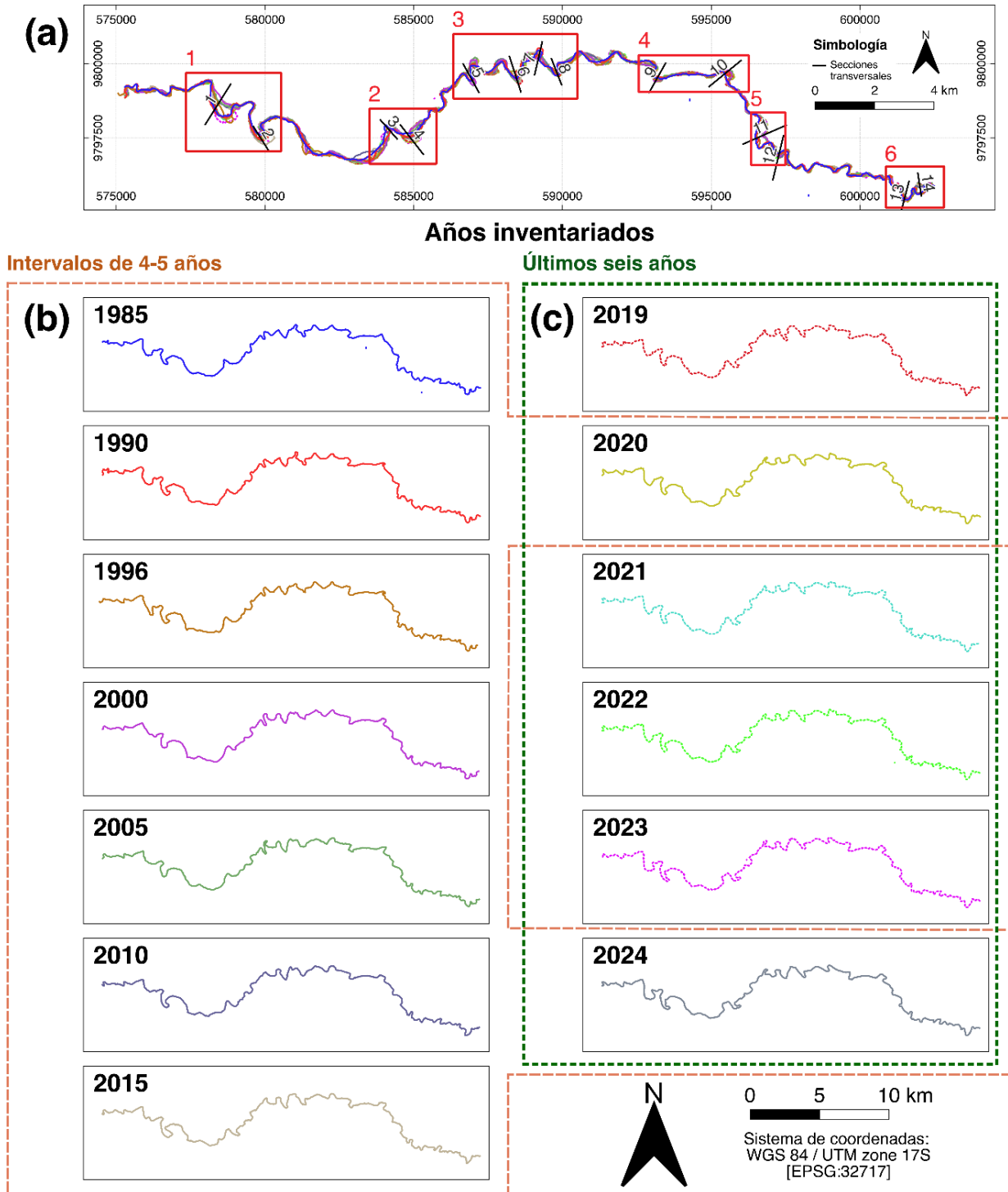


Ilustración 3.1 Evolución de la trayectoria de los meandros en el área de estudio durante los años 1985-2024. De forma específica: (a) trayectorias sobrepuestas en el área de estudio e identificación

de zonas críticas de cambios, (b) cambios por intervalos (4-5 años), y (c) cambios anuales en los últimos seis años

3.2 Evaluación del modelo de clasificación binaria

Conforme a lo detallado en la sección 1.6 de la sección de materiales y métodos de este documento, en esta subsección se detallan los resultados del desempeño del modelo de clasificación binaria realizado. En este apartado se detalló un análisis de precisión donde se incluyeron recursos como matrices de confusión, curva ROC, y diversas métricas de desempeño que incluyen exactitud, recall, F1-score, a partir del uso de los datos de validación.

3.2.1 Análisis de precisión

Para la evaluación de este apartado, la matriz de confusión obtenida (Ilustración 3.2), evidencia que el modelo alcanzó resultados prometedores donde se tienen valores considerables para los aciertos correctamente clasificados dentro de cada clase, presentes en los valores de la diagonal principal. De forma específica, la Tabla 3.1 muestra que a pesar de los resultados favorables mostrados por la matriz para ambas categorías, donde superan el 80% de precisión, los valores del recall mostraron un valor de 91% para la clasificación bajo la etiqueta “agua” mientras que un valor aproximadamente 10% menor para la etiqueta de “otras coberturas”. Esto es indicativo de una posible tendencia a la clasificación errónea de píxeles de la última etiqueta como píxeles correspondientes a agua.

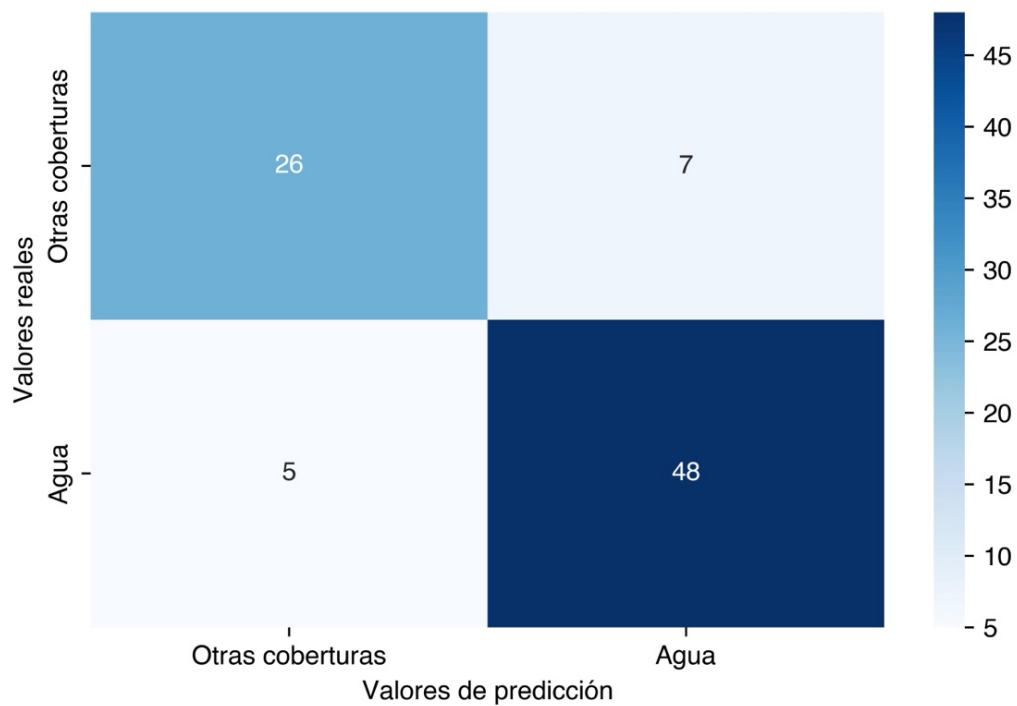


Ilustración 3.2 Matriz de confusión de la clasificación binaria

Tabla 3.1 Reporte de métricas de la clasificación binaria realizada

Clase	Precisión	Recall (Sensibilidad)	F1-Score	Soporte
Otras coberturas	0.84	0.79	0.81	33
Agua	0.87	0.91	0.89	53
Promedio macro	0.86	0.85	0.85	
Promedio ponderado	0.86	0.86	0.86	
Exactitud	0.86			

Generalmente, el modelo clasificó correctamente el 86% de los píxeles de acuerdo al valor de exactitud obtenido en la Tabla 3.1. Sin embargo, debido a la selección deliberada de puntos en el desarrollo del muestreo, lo que genera que las clases no presenten cantidades homogéneas de puntos representados, se sugiere que este valor debe ser analizado con reserva, debido a que igual que lo expresado por la literatura relacionada, cuando existen este tipo de particularidades en la proporción de los puntos de muestreo, se tienen resultados con alto sesgo en tendencia a la clase

“objetivo” de la clasificación. Con todo, la premisa anterior puede ser contrastada con los resultados ponderados del F1-score (0.86) y del recall/sensibilidad (0.86), muestran que a pesar de cualquier desbalance de clases que se encuentre influenciando el rendimiento del modelo, su cercanía con sus contrapartes del promedio macro muestra que el modelo tiene una estabilidad en el rendimiento de la predicción para ambas clases.

En adición, el empleo de una curva ROC mostro que el modelo presentó una afinidad considerable para la asignación de valores a la categoría de interés (“agua”) que a su contraparte (“otras coberturas”). El valor obtenido de área bajo la curva observado en la Ilustración 3.3 de 0.841 puede ser considerado positivo de acuerdo con los umbrales de aceptación de la literatura relacionada a modelos de clasificación. Sin embargo, a pesar de los resultados satisfactorios el modelo puede generar confusiones en la clasificación, siendo necesario explorar otras posibilidades para la mejora del mismo, como por ejemplo el ajuste de hiperparámetros y la prueba con otros algoritmos.

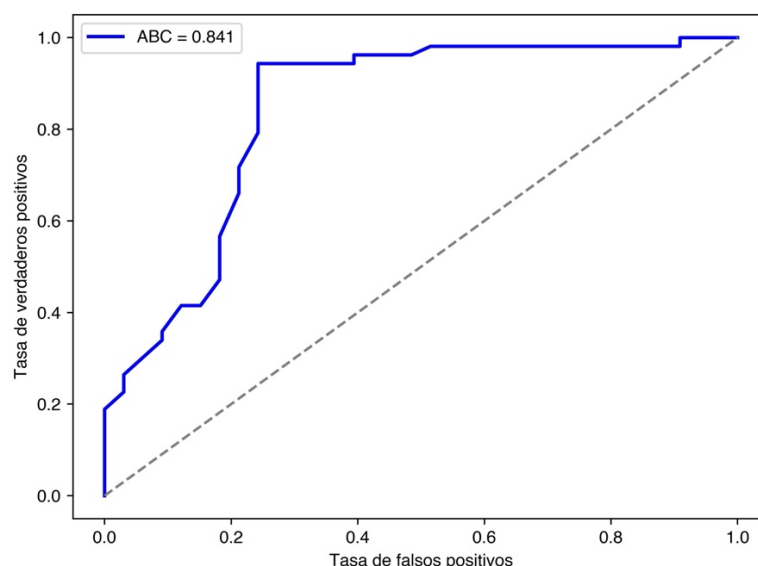


Ilustración 3.3 Curva ROC

3.2.2 Importancia de índices espectrales en la clasificación

Análogamente, la Ilustración 3.4 presenta la cuantificación de la importancia de cada uno de los ocho índices espectrales que ayudaron en la clasificación binaria realizada por este estudio.

Los resultados mostraron una predominancia excepcional de índices relacionados con estudios de cuerpos hídricos como el caso de los índices mNDWI, AWEI o TC-WET. De igual manera, puede observarse en la misma Ilustración como otros índices relacionados con estudios de vegetación (ej. NDVI) y suelos (ej. NDMI y BSI) tienen puntuaciones de importancia rezagadas respecto al conjunto anterior mencionado.

La predominancia del índice mNDWI (>0.20) puede deberse a los altos niveles de absorbancia que el índice puede ofrecer debido al uso de bandas SWIR ($1.3 - 2.5 \mu\text{m}$), como lo evidenciado por el autor del índice en el estudio original (Xu, 2006). De igual manera, se puede contemplar como tiene una ventaja para detectar píxeles con baja reflectancia de ondas NIR ($0.7 - 1.3 \mu\text{m}$), que pueden ser detectados erróneamente como “agua”, que incluyen elementos físicos como zonas urbanas, espacios sin cobertura vegetal y suelos húmedos (Acharya et al., 2018; Adhikari, 2019; J. Li et al., 2021). Adicionalmente, se identificó como existen índices como NDMI y NDWI que a pesar de ser usados con objetivos diferentes, pueden ser considerados análogos debido a que algebraicamente presentan una comparación entre bandas NIR y SWIR, promoviendo que “hereden” las mismas capacidades para la clasificación, siendo una limitante en este estudio, sin embargo, puede ser empleado en cuerpos hídricos de mayor amplitud (Gao, 1996; Singh et al., 2015).

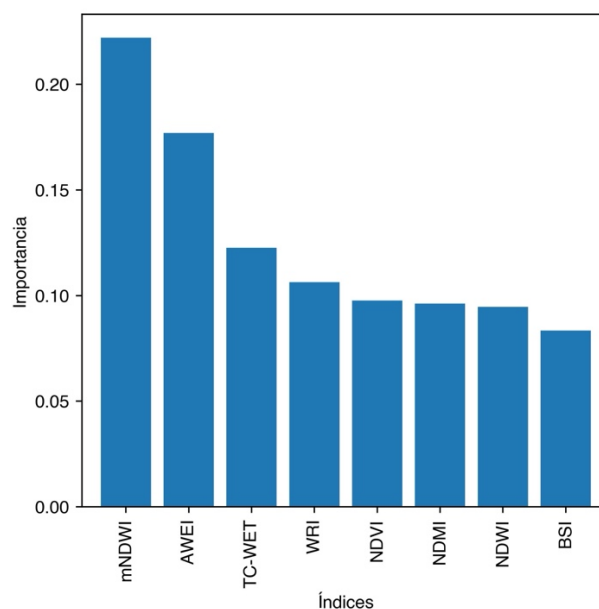


Ilustración 3.4 Resultado de la ponderación de la importancia de los ocho índices espectrales calculados

3.3 Análisis histórico de parámetros morfométricos

En este apartado se presenta el análisis de los dos parámetros morfométricos (migración lateral y sinuosidad). Ambos indicadores permiten la evaluación del estado de la dinámica fluvial y la determinación de tendencias de inestabilidad e identificación de zonas con mayor fragilidad a cambios espaciales.

3.3.1 Migración lateral

En primer lugar, el análisis de migración lateral incluyó el cálculo del desplazamiento en valores absolutos en metros para las 14 secciones transversales sugeridas en el apartado 3.1 de este capítulo. Este apartado fue calculado para los dos tipos de intervalos, y un acercamiento para los cuatro años.

Específicamente, para el análisis realizado en intervalos de 4-5 años mostrado en la Ilustración 3.5, se puede ver como existen tendencias marcadas en el comportamiento de los valores absolutos de migración en metros, llegando a alcanzar valores máximos superiores a los 500 metros de desplazamiento. Sin embargo, lo anterior se dispone como una tendencia focalizada

en las primeras seis secciones transversales (XS 1 a XS 6), correspondientes a las partes iniciales de la sección fluvial analizada. No obstante, pueden verse varios máximos localizados en el resto de las secciones transversales analizadas, superando los 100 metros de variación transversal del eje principal del cauce.

El párrafo anterior, puede dar explicaciones sobre la estabilidad del canal principal, ya que es una característica particular, que gran parte de los mayores desplazamientos están siendo efectuados en las partes iniciales del área de estudio, donde picos de migración se están efectuando cada diez años. Estudios previos mencionan que las tasas altas de cambio pueden ocurrir en las partes más altas de un trayecto fluvial, e incluso influenciadas por material sedimentario de las riberas, siendo importante el análisis del aporte de sedimentos y sus respuestas a inundaciones para el estudio de los cambios (Greenberg & Ganti, 2024; J. Hooke, 2023; Kodama et al., 2023).

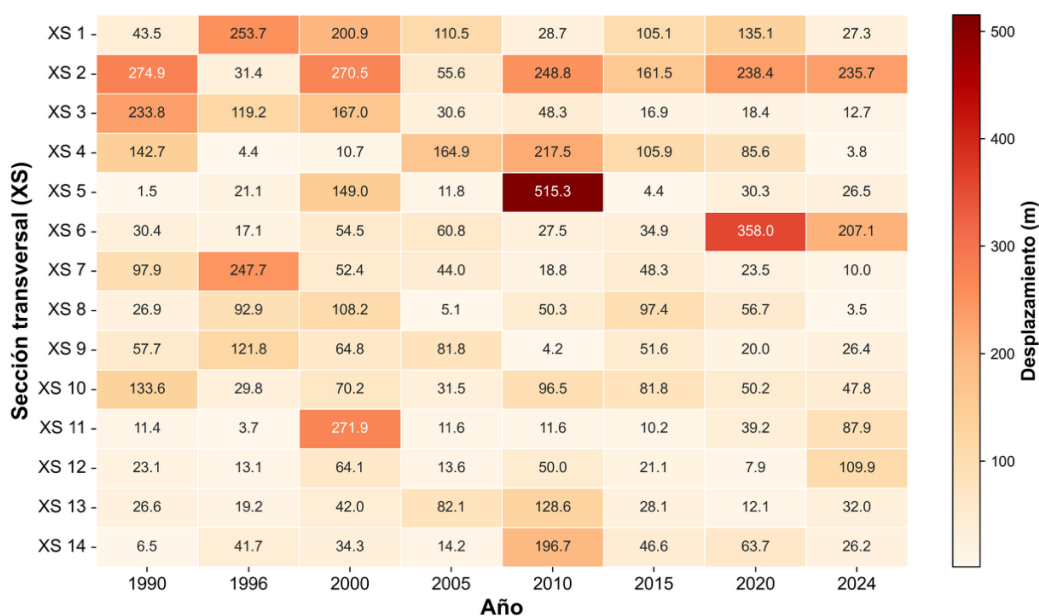


Ilustración 3.5 Mapa de calor del desplazamiento horizontal absoluto en intervalos de 4-5 años

Análogamente, el mismo análisis realizado en el acercamiento a los últimos seis años disponibles (2019 a 2024) (Ilustración 3.6), puede verse una mayor distribución del comportamiento de los desplazamientos horizontales. De igual manera, una observación relevante para este estudio es como la sección transversal (XS 6) sufrió gran parte del desplazamiento

acumulado durante los últimos seis años. Lo último es congruente con lo mencionado en la literatura donde se enfatiza que los meandros con alta curvatura tienden a presentar tasas altas de migración respecto a las partes menos curvas o sinuosas de una trayectoria fluvial (Donovan et al., 2021; Limaye et al., 2021). Adicionalmente, se pueden evidenciar en secciones transversales como XS 1, XS 2 y XS 6, varios aumentos críticos de migración lateral que superan en un orden de magnitud los valores comunes en años cercanos, sugiriendo que los eventos de migración son en su mayoría dirigidos por condiciones críticas en el corredor fluvial (ej. altas precipitaciones), en lugar de un comportamiento lineal (Leenman et al., 2025; Martin et al., 2024).

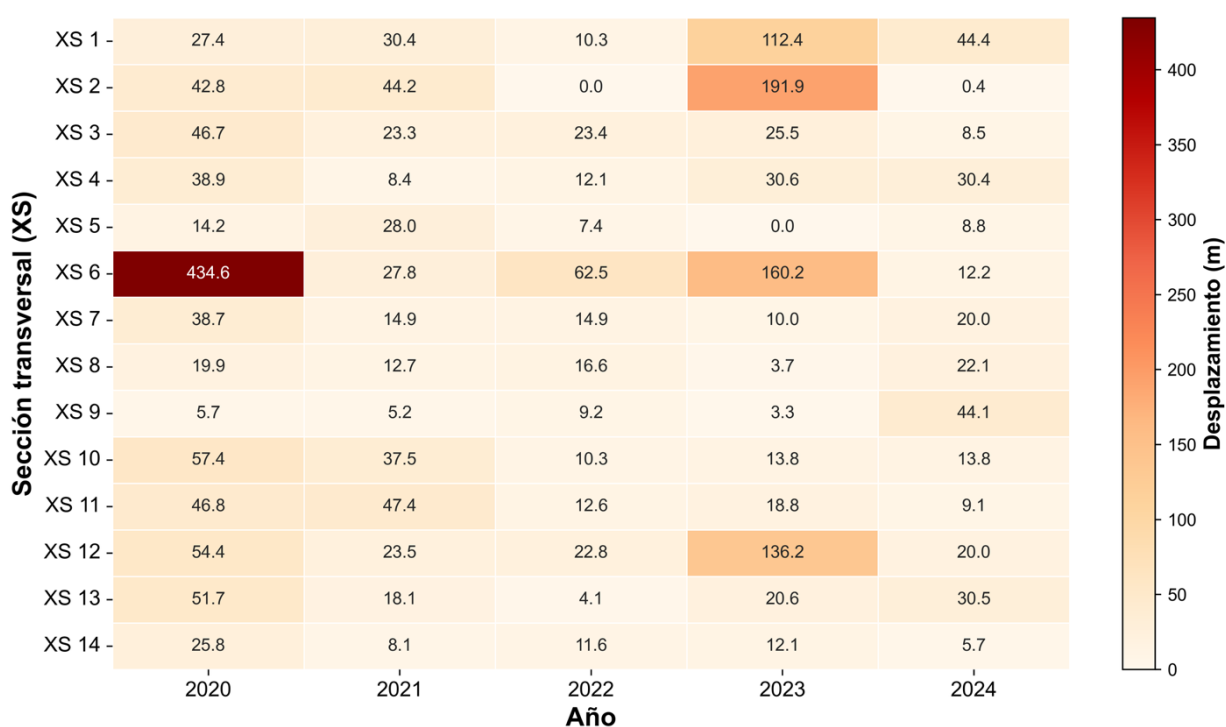


Ilustración 3.6 Mapa de calor para el desplazamiento horizontal absoluto anual del río durante los años 2019-2024

3.3.2 Sinuosidad

De igual forma que el parámetro anterior, el análisis de la sinuosidad incluyó una vista histórica del cambio de los valores a lo largo de 40 años de estudio, con un acercamiento anual para los últimos seis años de imágenes disponibles. A diferencia de los cálculos de la migración

lateral, este parámetro se enfocó en toda la extensión del río, y no en áreas localizadas donde se presentaban los mayores valores.

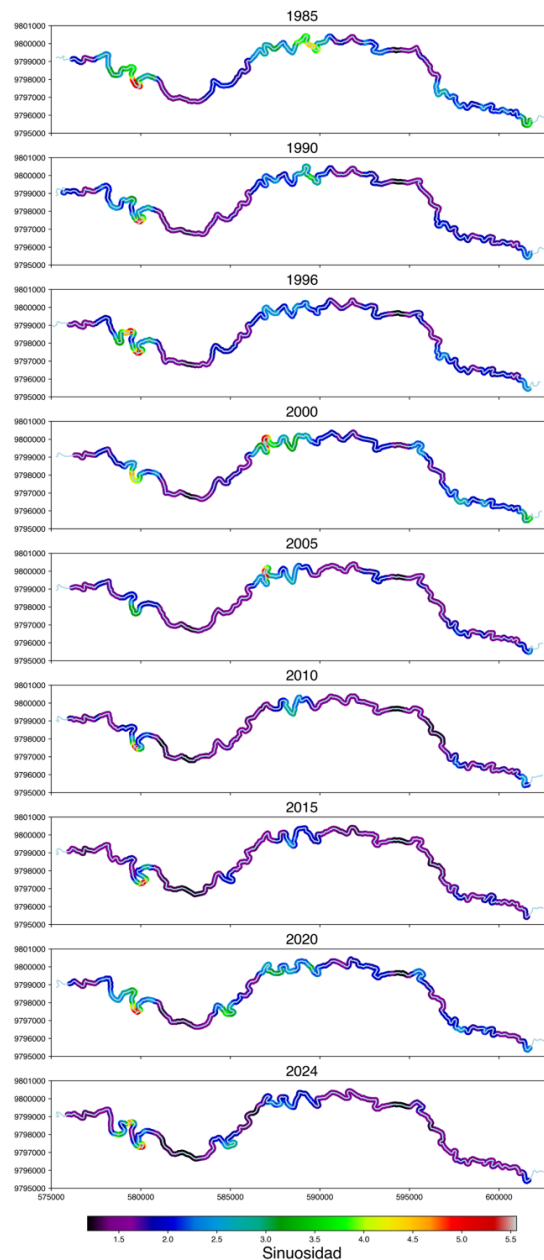


Ilustración 3.7 Valores de sinuosidad en intervalos de 4-5 años durante el período 1985-2024

Al empezar con los valores cada 4-5 años presentados en la Ilustración 3.7, los resultados de la sinuosidad muestran focalizaciones de valores superiores a dos unidades en algunas partes del río. Similarmente a lo obtenido por la migración lateral en esta misma frecuencia, los valores más altos de este parámetro se encuentran en la parte más inicial del curso fluvial, y análogamente,

se observa un crecimiento de los valores de sinuosidad hacia partes más centrales del área de estudio, en años posteriores a la identificación de un valor extremo del parámetro en esta frecuencia de tiempo (>4 unidades).

A pesar de que la literatura clasifica a los ríos como “meándricos” a partir de 1.5 unidades en la evaluación de la sinuosidad, esto demuestra que para el tramo de estudio de este trabajo, se tienen elementos propios de un desplazamiento lateral y no de un patrón trenzado (Islam et al., 2021). En detalle, los valores de sinuosidad relativamente altos pueden sugerir la persistencia de gran poder hidráulico, materiales blandos, junto a geometrías que favorecen la formación de depósitos aluviales, que explican porque los meandros más desarrollados tienden a ser los que presencian mayor migración lateral (Limaye et al., 2021; Wu et al., 2023).

De igual manera, los valores de sinuosidad en los últimos seis años (Ver Ilustración 3.8) muestran que el río refleja una tendencia decreciente desde el año 2019. No obstante, el comportamiento del río, es ligeramente similar a su contraparte de intervalos en 4-5 años (Ilustración 3.8), donde en general, predominan los valores menores a 2 unidades de sinuosidad. Adicionalmente, existen algunas diferencias entre años de estudio y periodicidad del análisis, donde se puede apreciar un ligero incremento del valor de la sinuosidad en puntos localizados en las partes medias del curso. Sin embargo, se tienen valores reducidos en el detalle anual en los últimos seis años (Z. Li et al., 2019; Schwenk & Foufoula-Georgiou, 2016).

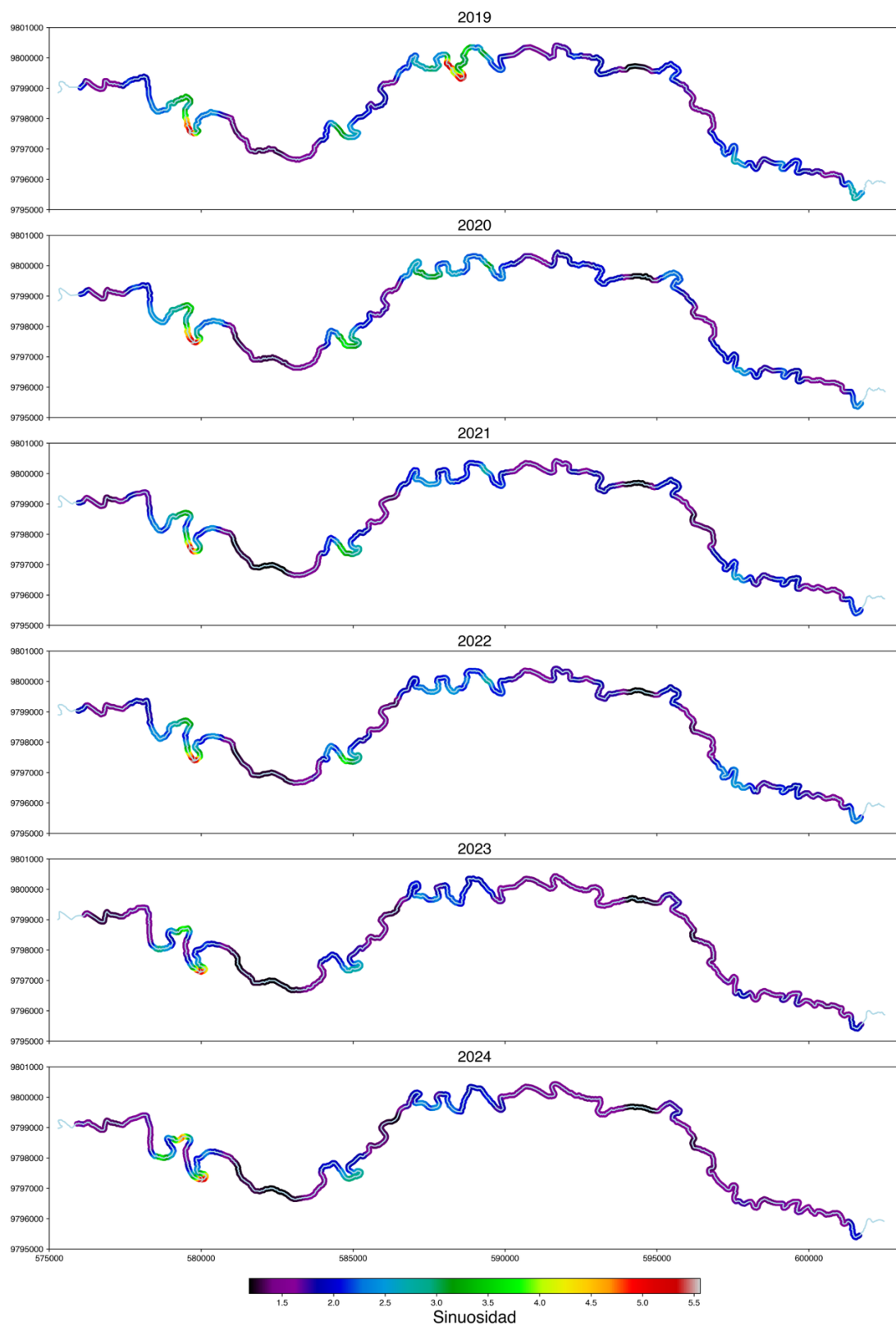


Ilustración 3.8 Valores de sinuosidad anuales registrados durante los años 2019-2024

3.4 Análisis de desfase temporal

Adicionalmente, en este trabajo se realizó un análisis de desfase temporal donde se analizó como la precipitación acumulada anual tiene relación con los cambios laterales en las 14 secciones transversales de este estudio. Los resultados de la Ilustración 3.9 presentan que gran parte de los retrasos en años no tienen una significancia estadística relevante al superar $p > 0.05$. No obstante, se identificó que la correlación que tiene la mayor significancia estadística correspondió al retraso en 1 año, con un valor de coeficiente de $r = -0.804$ y un p-valor de 0.029, siendo un valor con correlación negativa más aceptado estadísticamente. Lo anterior puede interpretarse como una reducción de las tasas de migración anuales después de un año de lluvias intensas, y el apareamiento de los cambios como respuesta de factores hidroclimáticos críticos en ese mismo período. Al igual que los resultados de estudios relevantes sobre respuestas de la geomorfología fluvial bajo altas tasas de precipitación, este tipo de análisis son más robustos al contar con al menos un período de condiciones hidroclimáticas para el estudio de su relación con factores de cambio de parámetros geométricos en ríos (Schook et al., 2017).

De igual manera, lo mencionado anteriormente se fortalece con lo obtenido para un retraso cero (mismo año en el que “ocurren” los eventos), el cual obtuvo una baja significancia estadística respecto al retraso del año uno. Esto es consistente con la teoría de flujo-curvatura (Leopold & Wolman, 1960; Parker, 1984), la cual manifiesta que los desplazamientos horizontales no ocurren inmediatamente a un “estímulo” provocado por la fuerza del caudal del canal principal, evidenciando que el efecto de la precipitación tiene una influencia retardada sobre los cambios.

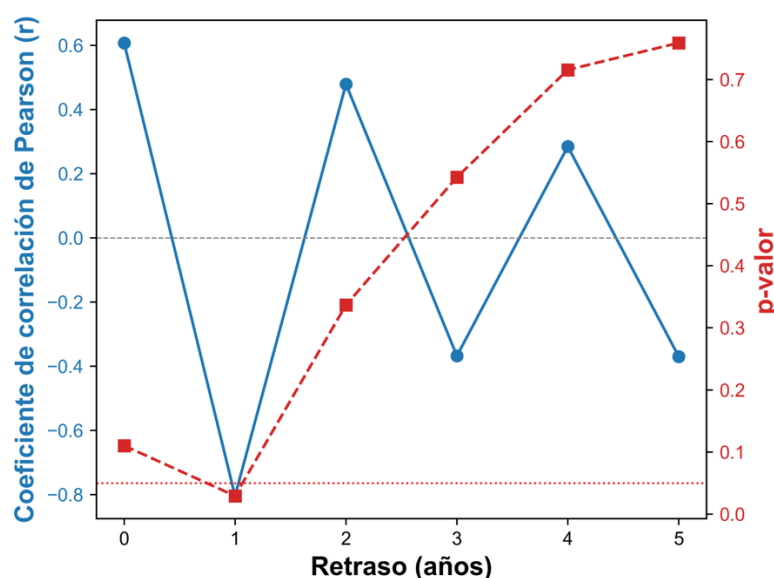


Ilustración 3.9 Gráfico de análisis de retraso mediante Correlación de Pearson para un período de cinco años

3.5 Sugerencia de gestión de paisajes fluviales

Finalmente, esta parte del trabajo realizó una integración de los datos geomorfológicos e hidroclimáticos de acuerdo con la jerarquización planteada por el enfoque AMRO (evitar, mitigar, restaurar, y compensar), detallado en el Apéndice C con su correspondiente en la Ilustración 3.10. La información recopilada pudo detallar las principales recomendaciones para cada una de las secciones de cambios, así como también el tiempo recomendado de acción basado en la relación del cambio de trayectoria con los valores de precipitación.

Estos resultados muestran una diversidad de comportamientos de la memoria hidrológica del cauce al analizar las diferentes secciones transversales (XS 1 a XS 14). Por ejemplo, los resultados muestran como existen desplazamientos que, a pesar de superar los 100 metros, presentan estadísticamente correlaciones con baja significancia estadística (XS 5, XS 6, XS 7, y XS 10). Así, gran parte de estas áreas y se clasificaron con prioridades medias de atención, sin embargo, su cercanía a las posibles áreas de crecimiento del sector urbano (XS 5, Ilustración 3.10 a), hizo necesario su clasificación dentro de la categoría más alta del marco de evaluación (Evitar). A pesar de que generalmente, se tengan estrategias de recuperación de espacios fluviales.

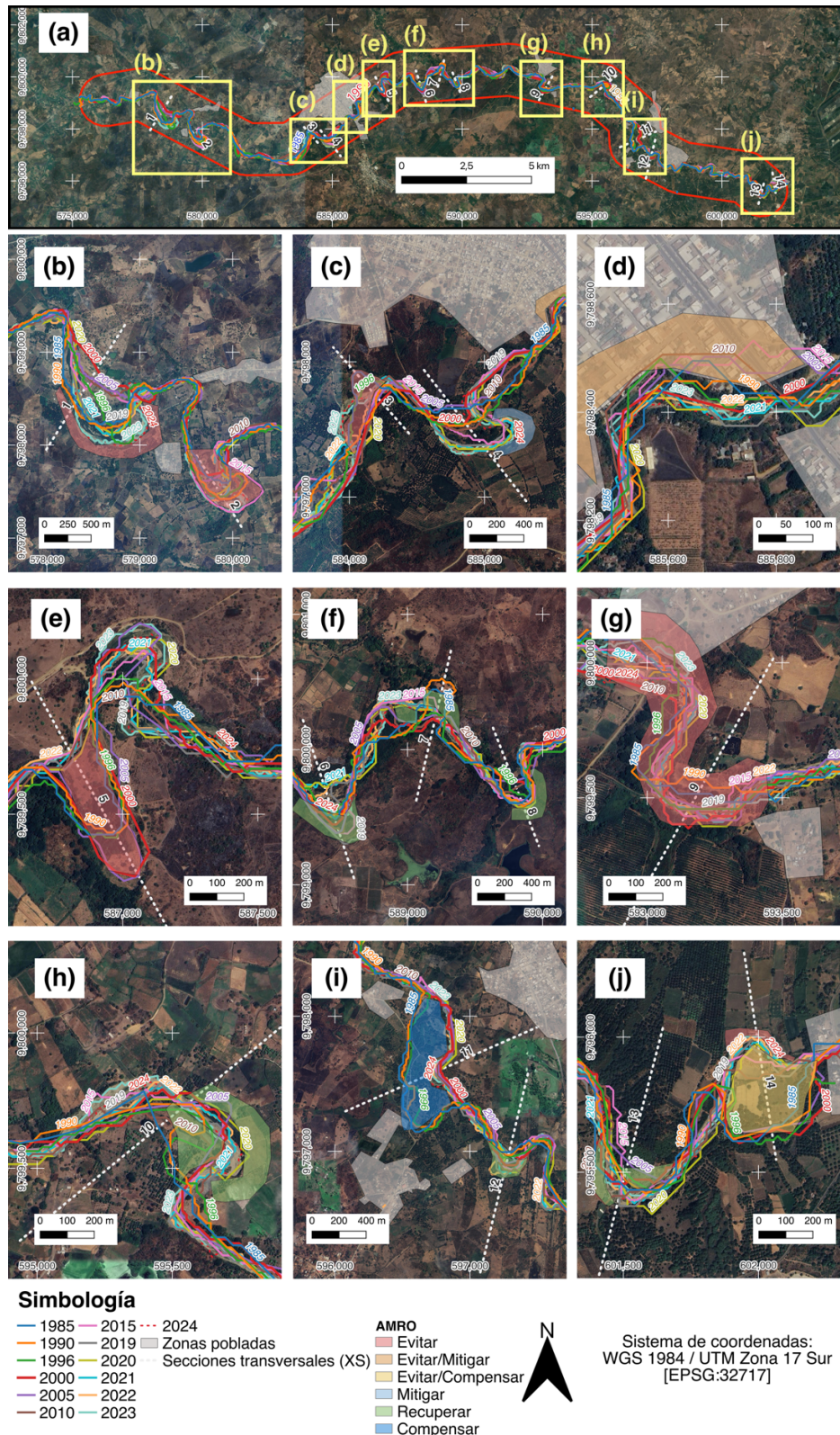


Ilustración 3.10 Trayectorias de ríos por año y zonas críticas de migración sobre mapa base. En (a) se presenta la ubicación de los sectores identificados con relación al área de estudio y (b-j) en detalle los sitios con las zonas sugeridas de acuerdo con el marco AMRO [Google Earth Collection, 2022]

En contraste, sectores con movilidad alta como por ejemplo XS 1, XS 2, XS 9, XS 11, y XS 12) (Ilustraciones 3.10.b-g-i), presentan valores moderados a fuertes, siendo clasificados como sectores de alta prioridad. Asimismo, se pudo contemplar como el histórico de los desplazamientos (Ilustración 310.d) cerca al área urbana más grande dentro del estudio, presenta asentamientos dentro del área erosiva del río, motivo por lo cual similarmente al conjunto anterior, fue clasificado como un sector de alta prioridad y con la segunda categoría de clasificación por importancia para este estudio (Mitigar). En este tipo de sectores se recomienda realizar medidas que lleven a restringir en lo posible nuevas intervenciones (urbanas y cultivos), de tal manera que exista un área amplia de amortiguación en la que se minimizen los impactos generados por las nuevas trayectorias fluviales.

Análogamente, se puede observar en la Tabla del Apéndice C, como los resultados del análisis del retardo, pone en evidencia que la relación del desplazamiento horizontal con los máximos de precipitación no sigue una tendencia uniforme, como lo visto en las secciones XS 12 y XS 9. Lo mencionado previamente infiere que el evento de migración en el área de estudio puede estar relacionado por factores geométricos, o el material presente en los alrededores de la sección del curso analizado. De tal manera, que en el área de estudio no existe un comportamiento específico, haciendo necesario la implementación de técnicas orientadas de acuerdo con las características del desplazamiento histórico.

Capítulo 4

A vida acontece através do movimento das águas

-Dayse de Fátima Rodrigues de Lima,
O Serpenteamento do Rio Doce (2013)

4. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo persiguió la explicación del análisis de un evento de migración de meandros en un río de la costa ecuatoriana (R. Pedro Carbo), mediante el uso de técnicas avanzadas de clasificación de imágenes satelitales y manipulación en sistemas de información geográfica, para el desarrollo de un marco de aplicación reproducible en la gestión de corredores fluviales. Las interpretaciones derivadas de los resultados mostrados en el Capítulo 3, muestran la aplicabilidad en el sector de estudio y patrones localizados de actividad de ambos parámetros morfométricos.

4.1 Conclusiones

Específicamente, el análisis realizado permitió establecer las siguientes conclusiones, cuyo resumen por cada uno de los objetivos planteados en el Capítulo 1 de este documento se detalla a continuación:

- La selección de los índices espectrales de agua, vegetación y suelo, permitió vislumbrar un resultado anticipado, relacionado con la predominancia de los índices de agua en la cuantificación de la importancia para la clasificación respecto a sus similares de vegetación y suelo. Lo anterior es determinante para la explicación de que existieron pocas diferencias entre los tipos de cobertura terrestre dentro del área de estudio propuesta. No obstante, esta última afirmación no fue del todo concluyente en este trabajo.
- En el caso de los puntos seleccionados de entrenamiento y validación del modelo de clasificación binaria, se consiguió un resultado aceptable con un número relativamente bajo de puntos. De tal manera, se puede decir que al igual que en muchas aplicaciones de teledetección, la cantidad considerable de puntos no necesariamente está acompañada de una mejora en la calidad del producto final del algoritmo de aprendizaje automático. En consecuencia, a pesar de que los puntos

tienen una mejor distribución con criterios más definidos, pueden contribuir significativamente al mejoramiento del proceso de entrenamiento y clasificación.

- En el contexto del desempeño del modelo de clasificación binaria, se evidenció como los resultados tienen una robustez apreciable, evidenciando la versatilidad para la aplicación en contextos variables de cobertura terrestre y de características meteorológicas diferentes. A pesar de ello, muchos falsos positivos persistieron al final de la clasificación, donde fue necesario la aplicación de una corrección manual de la trayectoria principal del cuerpo de agua en el área de estudio. Lo último, pone en manifiesto la necesidad de ajuste del modelo y la ampliación del análisis con otros índices existentes en la literatura.
- La cuantificación morfométrica presentó resultados de cambios que sobrepasaban los 40 metros en promedio para el caso de la migración lateral, que llegaron a registrar valores superiores a 200 metros en casos puntuales, localizados en las partes iniciales del curso fluvial. En contraste, la sinuosidad presentó valores dominantes en el rango de 1.5-2.5, con picos de valores alrededor de los 4.5-6 unidades, concentradas en las partes iniciales y medias de la trayectoria del río. Ambos resultados evidencian una dinámica activa fluvial, con procesos de meandrificación temprana, junto a la presencia de condiciones típicas de cualquier evento de migración de meandros, como la pérdida de tierras ribereñas. No obstante, la presencia de valores de alta sinuosidad en las partes iniciales del río sugiere al menos tres causas: la presencia de un relieve bajo, material litológico blando o el cambio de cobertura de los alrededores.
- El análisis de desfase temporal, permitió observar cómo la sensibilidad de los desplazamientos laterales del canal bajo influencia de la precipitación, en el área de estudio pueden ser explicados por al menos un período completo. Esto tiene fuertes

implicaciones para entender como los eventos de precipitación no tienen una asociación inmediata con los cambios del curso fluvial.

- Adicionalmente, el enfoque de un marco de gestión del corredor fluvial dado por la evaluación de la metodología AMRO, evidenció que existen al menos seis zonas críticas donde el evento de migración de meandros puede influenciar afectaciones a núcleos de población ubicados en los alrededores del área de estudio. Para el efecto, también se calculó el tiempo de respuesta necesario para la realización de las estrategias de mitigación recomendadas que incluyeron revegetación y sugerencia de reubicación de asentamientos. Sin embargo, el cálculo del valor anterior sentó una diferencia con el análisis hecho donde se tuvo una variedad de ventanas de prevención destacándose los períodos de 1 y 2 años, mostrando que cada sub-sección del río tiene una respuesta geomorfológica distinta a pesar de que la tendencia general del río sea similar.
- De igual forma, a pesar de los resultados potencialmente significativos las principales limitaciones de este estudio se relacionaron con la simplificación de los patrones de migración a solo dos parámetros morfométricos, siendo importante analizar otros como la amplitud, radio de curvatura, relación ancho/profundidad y la influencia de las pendientes, limitando la explicación hidrológica de los cambios en el área de estudio. En ese mismo sentido, la evaluación solo usando 13 imágenes satelitales para un periodo de 40 años, puede invisibilizar pequeñas influencias en la evolución del paisaje fluvial (ej. patrones de erosión). Similarmente, la falta de una proyección de cambios futuros hace que la anticipación de eventos con impacto en la toma de decisiones se limite a ser retrospectivo ya que la migración no conlleva necesariamente una repetición de las características del corredor fluvial en un tiempo pasado.

4.2 Recomendaciones

Análogamente, este estudio recopiló diversas observaciones que futuros estudios pueden incluir para la mejora del estudio de la migración de meandros en zonas tropicales:

- La selección de un conjunto de índices espectrales dedicados a agua para la obtención de la delimitación del corredor fluvial es esencial para la obtención de mejores productos de clasificación, sin embargo, se puede recomendar que la clasificación se complemente con cálculos analizados de forma independiente, dependiendo de los índices específicos disponibles y óptimos para el muestreo de acuerdo con las particularidades de la cobertura terrestre local. Adicionalmente, se pueden probar la segmentación del muestreo y clasificación con el objetivo de restringir el aprendizaje, y de tal manera, obtener un producto final que tenga menor cantidad de perturbaciones y falsos positivos en la clasificación agua/suelo.
- Siguiendo el enfoque de la premisa anterior, es importante que el muestreo necesario para la clasificación supervisada sea acompañado de criterios de representatividad en términos de las distintas coberturas y usos de suelo existentes en el área de estudio. Por ello, es recomendable que adicionalmente a las consideraciones convencionales de proporción de puntos realizados (ej. Pareto), los dos grandes conjuntos (agua y suelo), tomen en cuenta, las diferencias para la eliminación de puntos redundantes que no presenten un aporte significativo al rendimiento de la clasificación.
- Respecto al desempeño de la clasificación binaria, a pesar que los resultados son prometedores bajo el objetivo planteado, se necesitan de otras técnicas que permitan robustecer la validación del modelo final. De igual manera, se deben de identificar cuáles son los puntos donde se concentran los falsos positivos y falsos negativos para el refinamiento y optimización del conjunto de puntos de entrenamiento

destinados a la clasificación. Y, restringir su uso al uso de los índices espectrales con mayor relevancia en la distinción de los cuerpos de agua.

- En relación con la cuantificación de los parámetros morfométricos en ventanas de cinco años y en los últimos años, se recomienda realizar la discriminación empleando umbrales de alerta para la dirección de medidas de mitigación en sectores que presenten vulnerabilidad a cambios. Asimismo, estos parámetros podrían ser validados en campo mediante el uso de puntos de control para tener una medida micro de las ocurrencias de desplazamiento del eje del canal principal del río.
- De igual manera, una mejora que se puede realizar para la estimación por variables hidrológicas puede ser la inclusión de relaciones no lineales y de memoria larga (ej. Spearman Rank o cross-wavelet analysis, ARIMA) entre dicho tipo y los cambios morfométricos (sinuosidad y migración lateral). Adicionalmente, se puede considerar la inclusión de otros enfoques como análisis de caudales, estudios de humedad del suelo, y respuesta de la vegetación circundante para realizar una recopilación a detalle de la memoria hidrológica del cambio.
- En relación con las sugerencias de gestión integrando los datos de cambios laterales y precipitación, el marco de evaluación usando el enfoque AMRO puede ser mejorado considerando más imágenes y su respectiva trayectoria, para que favorezca la robustez del análisis de retardo entre las variables de desplazamiento y precipitación. De igual forma, el análisis de retardo podría incluir un análisis por meses para la determinación de períodos con mejor detalle, necesarios para el desarrollo de la ventana de prevención frente a una nueva ocurrencia de migración en las zonas de más alto impacto.

Referencias

- Acharya, T. D., Subedi, A., & Lee, D. H. (2018). Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal. *Sensors*, 18(8), 2580. <https://doi.org/10.3390/s18082580>
- Adhikari, S. (2019). A Comparison of Water Indices and Binary Thresholding Techniques for Water Surface Delineation for St. Croix Watershed Area. *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers*, 81, 182–204. <https://www.jstor.org/stable/26952886>
- Ahmed, J., Constantine, J. A., & Dunne, T. (2019). The role of sediment supply in the adjustment of channel sinuosity across the Amazon Basin. *Geology*, 47(9), 807–810. <https://doi.org/10.1130/G46319.1>
- Ali, P. Y., Jie, D., Khan, A., Sravanthi, N., Rao, L. A. K., & Hao, C. (2019). Channel migration characteristics of the Yamuna River from 1954 to 2015 in the vicinity of Agra, India: A case study using remote sensing and GIS. *International Journal of River Basin Management*, 17(3), 367–375. <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1566238>
- Amini, H., Monegaglia, F., Shakeri, R., Tubino, M., & Zolezzi, G. (2024). Meanders on the Move: Can AI-Based Solutions Predict Where They Will Be Located? *Water*, 16(17), 2460. <https://doi.org/10.3390/w16172460>
- Arteaga, K., Tutasi, P., & Jiménez, R. (2006). Climatic variability related to El Niño in Ecuador – a historical background. *Advances in Geosciences*, 6, 237–241. <https://doi.org/10.5194/adgeo-6-237-2006>
- Azarisamani, A., Keshavarzi, A., Hamidifar, H., & Javan, M. (2020). Effect of Rigid Vegetation on Velocity Distribution and Bed Topography in a Meandering River with a Sloping Bank. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10), 8633–8653. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04818-7>
- Basnayaka, V., Samarasinghe, J. T., Gunathilake, M. B., Muttill, N., Hettiarachchi, D. C., Abeynayaka, A., & Rathnayake, U. (2022). Analysis of Meandering River Morphodynamics Using Satellite Remote Sensing Data—An Application in the Lower Deduru Oya (River), Sri Lanka. *Land*, 11(7), 1091. <https://doi.org/10.3390/land11071091>
- Bertalan, L., Novák, T. J., Németh, Z., Rodrigo-Comino, J., Kertész, Á., & Szabó, S. (2018). Issues of Meander Development: Land Degradation or Ecological Value? The Example of the Sajó River, Hungary. *Water*, 10(11), 1613. <https://doi.org/10.3390/w10111613>
- Bignoli, D. J., Burgess, N., Wijesinghe, A., Thorn, J. P. R., Brown, M., Gannon, K. E., Sang, C.

- C., Lesutis, G., Lyimo, P., Chilagane, N., Tam, C., Munishi, P., Kashaigili, J. J., Sandbrook, C., Olago, D., Marchant, R., Waruingi, L., Meng, H., Conway, D., ... Runsten, L. (2024). Towards more sustainable and inclusive development corridors in Africa. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(3), 035012. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad7887>
- Brookes, A. (1990). Restoration and enhancement of engineered river channels: Some european experiences. *Regulated Rivers: Research & Management*, 5(1), 45–56. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450050105>
- Clavijo-Rivera, A., Sanclemente, E., Altamirano-Moran, D., & Muñoz-Ramirez, M. (2023). Temporal analysis of the planform morphology of the Quevedo River, Ecuador, using remote sensing. *Journal of South American Earth Sciences*, 128, 104467. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104467>
- Cox, R. T., Lumsden, D. N., & Van Arsdale, R. B. (2014). Possible Relict Meanders of the Pliocene Mississippi River and Their Implications. *The Journal of Geology*, 122(5), 609–622. <https://doi.org/10.1086/676974>
- Crist, E. P. (1985). A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 301–306. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6)
- Debnath, J., Meraj, G., Das Pan, N., Chand, K., Debbarma, S., Sahariah, D., Gualtieri, C., Kanga, S., Singh, S. K., Farooq, M., Sahu, N., & Kumar, P. (2022). Integrated remote sensing and field-based approach to assess the temporal evolution and future projection of meanders: A case study on River Manu in North-Eastern India. *PLOS ONE*, 17(7), e0271190. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271190>
- Dente, E., Lensky, N. G., Morin, E., & Enzel, Y. (2021). From straight to deeply incised meandering channels: Slope impact on sinuosity of confined streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(5), 1041–1054. <https://doi.org/10.1002/esp.5085>
- Donovan, M., Belmont, P., & Sylvester, Z. (2021). Evaluating the Relationship Between Meander-Bend Curvature, Sediment Supply, and Migration Rates. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(3), e2020JF006058. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020JF006058>
- Dueñas-Tovar, J., Carrión-Mero, P., Loor-Salazar, J., Quiguango-Araús, A., & Morante-Carballo, F. (2024). Conceptual Design of Green Filters: A Case Study of Libertador Bolívar. In *Sustainable Development with Renewable Energy. ICEER 2023. Environmental Science and Engineering* (pp. 329–343). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54394-4_26

- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Flores Abad, E. R., & Álvarez Gutiérrez, Y. de las M. (2022). Estimación de los niveles de vulnerabilidad en los asentamientos humanos frente a inundaciones en la cuenca hidrográfica del Río Daule. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 6(43), 322–332. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol6iss43.2022pp322-332>
- Frappart, F., Bourrel, L., Brodu, N., Riofrío Salazar, X., Baup, F., Darrozes, J., & Pombosa, R. (2017). Monitoring of the Spatio-Temporal Dynamics of the Floods in the Guayas Watershed (Ecuadorian Pacific Coast) Using Global Monitoring ENVISAT ASAR Images and Rainfall Data. *Water*, 9(1), 12. <https://doi.org/10.3390/w9010012>
- Fuß, T., Thuile Bistarelli, L., Walther, F., Vitecek, S., Talluto, L., & Singer, G. (2024). Geodiversity of a European river network controls algal biodiversity and function. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 315. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01478-5>
- GADM Pedro Carbo. (2023). *Plan de Desarrollo Territorial Pedro Carbo Actualización del Plan 2023-2027*.
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Ghosh, S., Mandal, P., & Bera, B. (2023). Dynamics of Meander Geometry and Formation of Neck Cutoff of River Raidak-I within Himalayan Foreland Basin, India. *Journal of the Geological Society of India*, 99(2), 247–258. <https://doi.org/10.1007/s12594-023-2292-2>
- Giergiczny, M., Valasiuk, S., Kotowski, W., Galera, H., Jacobsen, J. B., Sagebiel, J., Wichtmann, W., & Jabłońska, E. (2022). Re-meander, rewet, rewild! Overwhelming public support for restoration of small rivers in the three Baltic Sea basin countries. *Restoration Ecology*, 30(5). <https://doi.org/10.1111/rec.13575>
- Greenberg, E., & Ganti, V. (2024). The pace of global river meandering influenced by fluvial sediment supply. *Earth and Planetary Science Letters*, 634, 118674. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118674>
- Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., Geenen, B., Tickner, D., Antonelli, F., Babu, S., Borrelli, P., Cheng, L., Crochetiere, H., Ehalt Macedo, H., Filgueiras, R., Goichot, M., Higgins, J., Hogan, Z., Lip, B., McClain, M. E., Meng, J., Mulligan, M., ... Zarfl, C. (2019). Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 569(7755), 215–221. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111->

- Güneralp, İ., Abad, J. D., Zolezzi, G., & Hooke, J. (2012). Advances and challenges in meandering channels research. *Geomorphology*, 163–164, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.011>
- Guo, X., Gao, P., & Li, Z. (2021). Morphological characteristics and changes of two meandering rivers in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Geomorphology*, 379, 107626. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107626>
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson Educación S.A.
- Guzelj, M., Hauer, C., & Egger, G. (2020). The third dimension in river restoration: how anthropogenic disturbance changes boundary conditions for ecological mitigation. *Scientific Reports*, 10(1), 13106. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69796-0>
- Holbrook, J. M., & Allen, S. D. (2021). The case of the braided river that meandered: Bar assemblages as a mechanism for meandering along the pervasively braided Missouri River, USA. *GSA Bulletin*, 133(7–8), 1505–1530. <https://doi.org/10.1130/B35762.1>
- Hooke, J. (2004). Cutoffs galore!: occurrence and causes of multiple cutoffs on a meandering river. *Geomorphology*, 61(3–4), 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.12.006>
- Hooke, J. (2023). Morphodynamics of active meandering rivers reviewed in a hierarchy of spatial and temporal scales. *Geomorphology*, 439, 108825. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108825>
- Hooke, J. M. (2022). Morphodynamics of a meandering channel over decadal timescales in response to hydrological variations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(8), 1902–1920. <https://doi.org/10.1002/esp.5354>
- Ielpi, A., Lapôtre, M. G. A., Gibling, M. R., & Boyce, C. K. (2022). The impact of vegetation on meandering rivers. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(3), 165–178. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00249-6>
- Islam, A., Chandra Das, B., Mahammad, S., Ghosh, P., Deb Barman, S., & Sarkar, B. (2021). Deforestation and its impact on sediment flux and channel morphodynamics of the Brahmani River Basin, India. In *Forest Resources Resilience and Conflicts* (pp. 377–415). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822931-6.00029-0>
- Kiss, T., & Blanka, V. (2012). River channel response to climate- and human-induced hydrological changes: Case study on the meandering Hernád River, Hungary. *Geomorphology*, 175–176, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.003>
- Kodama, S. T., Pico, T., Finnegan, N. J., Lapôtre, M. G. A., & Willenbring, J. K. (2023). Glacial Isostatic Adjustment Modulates Lateral Migration Rate and Morphology of the Red River

- (North Dakota, USA and Manitoba, Canada). *Geophysical Research Letters*, 50(15). <https://doi.org/10.1029/2023GL103995>
- Lalramchulloa, D., Bhaskra Rao, C. U., & Rinawma, P. (2021). Morphometric and Sinuosity Analysis of Tlawng River Basin: A Geographic Information System Approach. *Journal of Geographical Studies*, 5(1), 22–32. <https://doi.org/10.21523/gcj5.21050103>
- Leenman, A., Greenberg, E., Moulds, S., Wortmann, M., Slater, L., & Ganti, V. (2025). Accelerated River Mobility Linked to Water Discharge Variability. *Geophysical Research Letters*, 52(2). <https://doi.org/10.1029/2024GL112899>
- Leisher, C., Hess, S., Dempsey, K., Payne Wynne, M. L., & Royte, J. (2022). Measuring the social changes from river restoration and dam removal. *Restoration Ecology*, 30(1). <https://doi.org/10.1111/rec.13500>
- Leopold, L. B., & Wolman, M. G. (1960). River meanders. *Geological Society of America Bulletin*, 71(6), 769–793.
- Li, J., Peng, B., Wei, Y., & Ye, H. (2021). Accurate extraction of surface water in complex environment based on Google Earth Engine and Sentinel-2. *PLOS ONE*, 16(6), e0253209. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253209>
- Li, Z., Gao, P., You, Y., Finotello, A., & Ielpi, A. (2023). Delayed neck cutoff in the meandering Black River of the Qinghai–Tibet plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(5), 1052–1063. <https://doi.org/10.1002/esp.5534>
- Li, Z., Wu, X., & Gao, P. (2019). Experimental study on the process of neck cutoff and channel adjustment in a highly sinuous meander under constant discharges. *Geomorphology*, 327, 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.002>
- Limaye, A. B., Lazarus, E. D., Li, Y., & Schwenk, J. (2021). River sinuosity describes a continuum between randomness and ordered growth. *Geology*, 49(12), 1506–1510. <https://doi.org/10.1130/G49153.1>
- Lyu, X., Li, X., Wang, K., Cao, W., Gong, J., Wang, H., & Lou, A. (2022). Linking regional sustainable development goals with ecosystem services to identify ecological security patterns. *Land Degradation & Development*, 33(18), 3841–3854. <https://doi.org/10.1002/ldr.4427>
- Marchetti, Z. Y., Minotti, P. G., Ramonell, C. G., Schivo, F., & Kandus, P. (2016). NDVI patterns as indicator of morphodynamic activity in the middle Paraná River floodplain. *Geomorphology*, 253, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.003>
- Martin, H. K., Edmonds, D. A., & Lewis, Q. W. (2024). Four Years of Meander-Bend Evolution Captured by Drone-Based Lidar Reveals Lack of Width Maintenance on the White River,

- Indiana, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129(6).
<https://doi.org/10.1029/2023JF007574>
- Mazur, K. (2021). River Re-naturalization - a Nature-based Solution for Climate Change in Urban Areas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1203(2), 022044.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1203/2/022044>
- McElroy, B., & Nitttrouer, J. (2021). Evaluating potential sediment transport changes in lower Mississippi River due to engineered meander cutoffs in the 20th century: no case for large-scale flux increases. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2021*, EP55E-1154.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Micheli, E. R., Kirchner, J. W., & Larsen, E. W. (2004). Quantifying the effect of riparian forest versus agricultural vegetation on river meander migration rates, central Sacramento River, California, USA. *River Research and Applications*, 20(5), 537–548.
<https://doi.org/10.1002/rra.756>
- Mohanta, A., Patra, K. C., & Sahoo, B. B. (2018). Anticipate Manning's Coefficient in Meandering Compound Channels. *Hydrology*, 5(3), 47.
<https://doi.org/10.3390/hydrology5030047>
- Monegaglia, F., Zolezzi, G., Güneralp, I., Henshaw, A. J., & Tubino, M. (2018). Automated extraction of meandering river morphodynamics from multitemporal remotely sensed data. *Environmental Modelling & Software*, 105, 171–186.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.028>
- Nagel, G. W., Darby, S. E., & Leyland, J. (2023). The use of satellite remote sensing for exploring river meander migration. *Earth-Science Reviews*, 247, 104607.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104607>
- Nardini, A., & Brierley, G. (2021). Automatic river planform identification by a logical-heuristic algorithm. *Geomorphology*, 375, 107558. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107558>
- NASA. (2025). *NASA POWER | DAV*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nath, A., & Ghosh, S. (2022). The influence of urbanization on the morphology of the Barak River floodplain in Cachar District, Assam. *Water Policy*, 24(12), 1876–1894.
<https://doi.org/10.2166/wp.2022.133>
- Ning, F.-S., & Lee, Y.-C. (2021). Combining Spectral Water Indices and Mathematical Morphology to Evaluate Surface Water Extraction in Taiwan. *Water*, 13(19), 2774.
<https://doi.org/10.3390/w13192774>

- Noh, B., Wani, O., Dunne, K. B. J., & Lamb, M. P. (2024). Geomorphic risk maps for river migration using probabilistic modeling – a framework. *Earth Surface Dynamics*, 12(3), 691–708. <https://doi.org/10.5194/esurf-12-691-2024>
- Parker, G. (1984). Discussion of “ Lateral Bed Load Transport on Side Slopes ” by Syunsuke Ikeda (November, 1982). *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(2), 197–199. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:2(197))
- Pearson, K., & Galton, F. (1895). VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58(347–352), 240–242. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
- Pelckmans, I., Belliard, J.-P., Gourgue, O., Dominguez-Granda, L. E., & Temmerman, S. (2024). Mangroves as nature-based mitigation for ENSO-driven compound flood risks in a large river delta. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(6), 1463–1476. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1463-2024>
- Polvi, L. E., Lind, L., Persson, H., Miranda-Melo, A., Pilotto, F., Su, X., & Nilsson, C. (2020). Facets and scales in river restoration: Nestedness and interdependence of hydrological, geomorphic, ecological, and biogeochemical processes. *Journal of Environmental Management*, 265, 110288. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110288>
- Qin, Y., Jin, X., Du, K., & Jin, Y. (2024). Changes in river morphology and influencing factors in the upper Yellow River over the past 25 years. *Geomorphology*, 465, 109397. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109397>
- Saenz, S., Walschburger, T., González, J. C., León, J., McKenney, B., & Kiesecker, J. (2013). Development by Design in Colombia: Making Mitigation Decisions Consistent with Conservation Outcomes. *PLoS ONE*, 8(12), e81831. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081831>
- Salas, E. A. L., & Kumaran, S. S. (2023). Hyperspectral Bare Soil Index (HBSI): Mapping Soil Using an Ensemble of Spectral Indices in Machine Learning Environment. *Land*, 12(7), 1375. <https://doi.org/10.3390/land12071375>
- Schook, D. M., Rathburn, S. L., Friedman, J. M., & Wolf, J. M. (2017). A 184-year record of river meander migration from tree rings, aerial imagery, and cross sections. *Geomorphology*, 293, 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.06.001>
- Schwenk, J., & Fofoula-Georgiou, E. (2016). Meander cutoffs nonlocally accelerate upstream and downstream migration and channel widening. *Geophysical Research Letters*, 43(24). <https://doi.org/10.1002/2016GL071670>
- Shen, L., & Li, C. (2010). Water body extraction from Landsat ETM+ imagery using adaboost

- algorithm. 2010 18th International Conference on Geoinformatics, 1–4. <https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567762>
- Sheng, W., Zhen, L., Xiao, Y., & Hu, Y. (2019). Ecological and socioeconomic effects of ecological restoration in China's Three Rivers Source Region. *Science of The Total Environment*, 650, 2307–2313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.265>
- Singh, K. V., Setia, R., Sahoo, S., Prasad, A., & Pateriya, B. (2015). Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. *Geocarto International*, 30(6), 650–661. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.965757>
- Ten Kate, K., Bishop, J., & Bayon, R. (2004). *Biodiversity offsets: Views, experience, and the business case*. IUCN--The World Conservation Union.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Tyralis, H., Papacharalampous, G., & Langousis, A. (2019). A Brief Review of Random Forests for Water Scientists and Practitioners and Their Recent History in Water Resources. *Water*, 11(5), 910. <https://doi.org/10.3390/w11050910>
- United Nations. (2023). *THE 17 GOALS*. <https://sdgs.un.org/goals>
- Velastegui-Montoya, A., García-Romero, J. A., Chuizaca-Espinoza, I. A., Quevedo, R. P., Santana-Cunha, C., Ochoa-Brito, J. I., & Arias-Hidalgo, M. (2024). Assessing regressive erosion effects: Unveiling riverside land use land cover changes post hydroelectric project construction. *Environmental Challenges*, 15, 100882. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100882>
- Wang, D., Li, Z., Li, Z., Pan, B., Tian, S., & Nie, X. (2020). Environmental gradient relative to oxbow lake-meandering river connectivity in Zoige Basin of the Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 156, 105983. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105983>
- Wang, L., & Qu, J. J. (2007). NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, 34(20). <https://doi.org/10.1029/2007GL031021>
- Wang, Q., Wang, L., Wei, C., Jin, Y., Li, Z., Tong, X., & Atkinson, P. M. (2021). Filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images with Sentinel-2 MSI images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101, 102365. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102365>
- Wang, Y., Wai, O. W. H., & Chen, Q. (2021). Laboratory study on fish behavioral response to

- meandering flow and riffle-pool sequence driven by deflectors in straight concrete flood channels. *Journal of Hydrology*, 598, 125736. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125736>
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.
- Wu, C., Kim, W., Herring, R., Cardenas, B. T., Dong, T. Y., Ma, H., Moodie, A., Nittrouer, J. A., Tsai, F., & Li, A. (2023). Lowland river sinuosity on Earth and Mars set by the pace of meandering and avulsion. *Nature Geoscience*, 16(8), 747–753. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01231-1>
- Wyżga, B., Amirowicz, A., Bednarska, A., Bylak, A., Hajdukiewicz, H., Kędzior, R., Kukuła, K., Liro, M., Mikuś, P., Oglęcki, P., Radecki-Pawlik, A., & Zawiejska, J. (2021). Scientific monitoring of immediate and long-term effects of river restoration projects in the Polish Carpathians. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(2), 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.11.005>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yang, C., Cai, X., Wang, X., Yan, R., Zhang, T., Zhang, Q., & Lu, X. (2015). Remotely Sensed Trajectory Analysis of Channel Migration in Lower Jingjiang Reach during the Period of 1983–2013. *Remote Sensing*, 7(12), 16241–16256. <https://doi.org/10.3390/rs71215828>
- Yousefi, S., Pourghasemi, H. R., Hooke, J., Navratil, O., & Kidová, A. (2016). Changes in morphometric meander parameters identified on the Karoon River, Iran, using remote sensing data. *Geomorphology*, 271, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.034>
- Yu, Z., Fu, Y., Zhang, Y., Liu, Z., & Liu, Y. (2023). Quantifying the Impact of Changes in Sinuosity on River Ecosystems. *Water*, 15(15), 2751. <https://doi.org/10.3390/w15152751>
- Zhou, Y., & Tang, Q. (2022). Meandering Characteristics of the Yimin River in Hulun Buir Grassland, Inner Mongolia, China. *Remote Sensing*, 14(11), 2696. <https://doi.org/10.3390/rs14112696>
- Zhu, L., Chen, D., Hassan, M. A., & Venditti, J. G. (2022). The Influence of Riparian Vegetation on the Sinuosity and Lateral Stability of Meandering Channels. *Geophysical Research Letters*, 49(2). <https://doi.org/10.1029/2021GL096346>

Apéndice A: Obtención y preprocesamiento de datos iniciales usando la librería “*geemap*” en Python

#Importación de las librerías

```
import ee
import geemap
import numpy as np
import geopandas as gpd
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
import ee
```

#Inicialización de Google Earth Engine

```
ee.Authenticate(scopes=['https://www.googleapis.com/auth/earthengine',
                        'https://www.googleapis.com/auth/devstorage.full_control',
                        'https://www.googleapis.com/auth/drive'])
ee.Initialize()
```

#Carga de información base

```
bf_river = "<ruta del área de estudio>.shp"
br_river_gpd = gpd.read_file(bf_river)
bf = geemap.geopandas_to_ee(br_river_gpd)
```

```
tr_points_path = "<ruta del shape de entrenamiento>.shp"
tr_points_gpd = gpd.read_file(tr_points_path)
```

#Adecuación de información a Google Earth Engine y selección de imágenes

```
tr_p=geemap.shp_to_ee(tr_points_path)
```

```
image1985=ee.Image('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_011061_19850327').clip(bf)
```

```

image1990=ee.Image('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_011061_19900221').clip(bf)
image1996=ee.Image('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_011061_19960325').clip(bf)
image2000=ee.Image('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_011061_20000811').clip(bf)
image2005=ee.Image('LANDSAT/LE07/C02/T1/LE07_011061_20050529').clip(bf)
image2010=ee.Image('LANDSAT/LE07/C02/T1/LE07_011061_20101002').clip(bf)
image2015=ee.Image('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_011061_20150821').clip(bf)
image2019=ee.Image('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_011061_20190410').clip(bf)
image2022=ee.Image('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_011061_20220909').clip(bf)

```

#Correcciones de imágenes

```

def apply_sc_l5(image):
    optical_bands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2)
    thermal_bands = image.select('ST_B6').multiply(0.00341802).add(149.0)
    return image.addBands(optical_bands, None, True).addBands(
        thermal_bands, None, True
    )

```

```

image1985=apply_sc_l5(image1985)
image1990=apply_sc_l5(image1990)
image1996=apply_sc_l5(image1996)
image2000=apply_sc_l5(image2000)

```

```

image2005=apply_sc_l5(image2005)
image2010=apply_sc_l5(image2010)

```

```

def apply_sc_l8(image):
    optical_bands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2)
    thermal_bands = image.select('ST_B.*').multiply(0.00341802).add(149.0)
    return image.addBands(optical_bands, None, True).addBands(
        thermal_bands, None, True
    )

```

```

image2015 = apply_sc_l8(image2015)

```

```
image2019 = apply_sc_l8(image2019)
```

```
image2022 = apply_sc_l8(image2022)
```

```
vis_params_true_color = {  
    'bands': ['SR_B3', 'SR_B2', 'SR_B1'],  
    'min': 0,  
    'max': 0.3,  
}
```

```
viz_tc_l7={  
    "bands": ['B3', 'B2', 'B1']  
}
```

```
viz_tc_l8={  
    "bands": ['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2'],  
    "min": 0,  
    "max": 0.3,  
}
```

#Función – Cálculo de índices espectrales (8) – Landsat-5 , Landsat-7 & Landsat-8

```
def composite_bands(image,year):
```

```
    NDWI = image.expression(  
        "(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)", {  
            "NIR": image.select('SR_B4'),  
            "SWIR": image.select('SR_B5')  
        }).rename('NDWI')
```

```
    mNDWI = image.expression("(Green-SWIR)/(Green+SWIR)", {  
        "Green":image.select('SR_B2'),  
        "SWIR":image.select('SR_B5')  
    }).rename('mNDWI')
```

```
    NDMI = image.expression(  
        "(NIR - (SWIR1 - SWIR2)) / (NIR + (SWIR1 - SWIR2))", {
```

```

"SWIR1": image.select('SR_B5'),
"SWIR2": image.select('SR_B7'),
"NIR": image.select('SR_B4')
}).rename('NDMI')

```

```

WRI = image.expression(
"(GREEN + RED)/(NIR + SWIR1)", {
  "GREEN": image.select('SR_B2'),
  "RED": image.select('SR_B3'),
  "NIR": image.select('SR_B4'),
  "SWIR1": image.select('SR_B5')
}).rename('WRI')

```

```

NDVI = image.expression(
"(NIR - RED) / (NIR + RED)", {
  "RED": image.select('SR_B3'),
  "NIR": image.select('SR_B4'),
}).rename('NDVI')

```

```

AWEI = image.expression(
"BLUE + (2.5 * GREEN) - 1.5 * (NIR + SWIR1) - (0.25 * SWIR2)", {
  "BLUE": image.select('SR_B1'),
  "GREEN": image.select('SR_B2'),
  "NIR": image.select('SR_B4'),
  "SWIR1": image.select('SR_B5'),
  "SWIR2": image.select('SR_B7')
}).rename('AWEI')

```

```

TWI = image.expression(
"BLUE * 0.0315 + GREEN * 0.2021 + RED * 0.3102 + NIR * 0.1594 - SWIR1 * 0.6806 -
SWIR2 * 0.6109", {
  "BLUE": image.select('SR_B1'),
  "GREEN": image.select('SR_B2'),
  "RED": image.select('SR_B3'),

```

```

"NIR": image.select('SR_B4'),
"SWIR1": image.select('SR_B5'),
"SWIR2": image.select('SR_B7')
}).rename('TWI')

BSI = image.expression(
    "(SWIR2 + RED) - (NIR + BLUE) / (SWIR2 + RED) + (NIR + BLUE)", {
        "BLUE": image.select('SR_B1'),
        "RED": image.select('SR_B3'),
        "NIR": image.select('SR_B4'),
        "SWIR2": image.select('SR_B7')
    }).rename('BSI')

indices_only = image.addBands([NDWI,NDMI,NDVI,WRI,AWEI,TWI,BSI,mNDWI])
indices_final =
indices_only.select(['NDWI',"mNDWI","NDVI","WRI","AWEI","TWI","BSI","NDMI"])

def composite_bands_17(image, year):
    band_rename = {
        'SR_B1': 'BLUE',
        'SR_B2': 'GREEN',
        'SR_B3': 'RED',
        'SR_B4': 'NIR',
        'SR_B5': 'SWIR1',
        'SR_B7': 'SWIR2'
    }

    # Rename bands if they exist in the image
    image = image.select(list(band_rename.keys()), list(band_rename.values()))

    # Indices
    NDWI = image.expression("(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)", {
        "NIR": image.select('NIR'),
        "SWIR1": image.select('SWIR1')

```

```
}).rename('NDWI')
```

```
mNDWI = image.expression("(GREEN - SWIR1) / (GREEN + SWIR1)", {  
    "GREEN": image.select('GREEN'),  
    "SWIR1": image.select('SWIR1')  
}).rename('mNDWI')
```

```
NDMI = image.expression(  
    "(NIR - (SWIR1 - SWIR2)) / (NIR + (SWIR1 - SWIR2))", {  
        "SWIR1": image.select('SWIR1'),  
        "SWIR2": image.select('SWIR2'),  
        "NIR": image.select('NIR')  
    }).rename('NDMI')
```

```
WRI = image.expression(  
    "(GREEN + RED)/(NIR + SWIR1)", {  
        "GREEN": image.select('GREEN'),  
        "RED": image.select('RED'),  
        "NIR": image.select('NIR'),  
        "SWIR1": image.select('SWIR1')  
    }).rename('WRI')
```

```
NDVI = image.expression(  
    "(NIR - RED) / (NIR + RED)", {  
        "RED": image.select('RED'),  
        "NIR": image.select('NIR')  
    }).rename('NDVI')
```

```
AWEI = image.expression(  
    "BLUE + (2.5 * GREEN) - 1.5 * (NIR + SWIR1) - (0.25 * SWIR2)", {  
        "BLUE": image.select('BLUE'),  
        "GREEN": image.select('GREEN'),  
        "NIR": image.select('NIR'),  
        "SWIR1": image.select('SWIR1'),
```

```

        "SWIR2": image.select('SWIR2')
    }).rename('AWEI')

TWI = image.expression(
    "BLUE * 0.0315 + GREEN * 0.2021 + RED * 0.3102 + NIR * 0.1594 - SWIR1 * 0.6806 -
    SWIR2 * 0.6109", {
        "BLUE": image.select('BLUE'),
        "GREEN": image.select('GREEN'),
        "RED": image.select('RED'),
        "NIR": image.select('NIR'),
        "SWIR1": image.select('SWIR1'),
        "SWIR2": image.select('SWIR2')
    }).rename('TWI')

BSI = image.expression(
    "((SWIR2 + RED) - (NIR + BLUE)) / ((SWIR2 + RED) + (NIR + BLUE))", {
        "BLUE": image.select('BLUE'),
        "RED": image.select('RED'),
        "NIR": image.select('NIR'),
        "SWIR2": image.select('SWIR2')
    }).rename('BSI')

indices_only = image.addBands([NDWI, NDMI, NDVI, WRI, AWEI, TWI, BSI, mNDWI])
indices_final = indices_only.select(['NDWI', 'mNDWI', 'NDVI', 'WRI', 'AWEI', 'TWI', 'BSI',
'NDMI'])
return indices_final

def composite_bands_l8(image,year):
    NDWI = image.expression(
        "(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)", {
            "NIR": image.select('SR_B5'),
            "SWIR": image.select('SR_B6')
        }).rename('NDWI')

```

```
mNDWI = image.expression("(Green-SWIR)/(Green+SWIR)", {
  "Green":image.select('SR_B3'),
  "SWIR":image.select('SR_B6')
}).rename('mNDWI')
```

```
NDMI = image.expression(
  "(NIR - (SWIR1 - SWIR2)) / (NIR + (SWIR1 - SWIR2))", {
    "SWIR1": image.select('SR_B6'),
    "SWIR2": image.select('SR_B7'),
    "NIR": image.select('SR_B5')
  }).rename('NDMI')
```

```
WRI = image.expression(
  "(GREEN + RED)/(NIR + SWIR1)", {
    "GREEN": image.select('SR_B3'),
    "RED": image.select('SR_B4'),
    "NIR": image.select('SR_B5'),
    "SWIR1": image.select('SR_B6')
  }).rename('WRI')
```

```
NDVI = image.expression(
  "(NIR - RED) / (NIR + RED)", {
    "RED": image.select('SR_B4'),
    "NIR": image.select('SR_B5'),
  }).rename('NDVI')
```

```
AWEI = image.expression(
  "BLUE + (2.5 * GREEN) - 1.5 * (NIR + SWIR1) - (0.25 * SWIR2)", {
    "BLUE": image.select('SR_B2'),
    "GREEN": image.select('SR_B3'),
    "NIR": image.select('SR_B5'),
    "SWIR1": image.select('SR_B6'),
    "SWIR2": image.select('SR_B7')
  }).rename('AWEI')
```

```

TWI = image.expression(
  "BLUE * 0.0315 + GREEN * 0.2021 + RED * 0.3102 + NIR * 0.1594 - SWIR1 * 0.6806 -
  SWIR2 * 0.6109", {
    "BLUE": image.select('SR_B2'),
    "GREEN": image.select('SR_B3'),
    "RED": image.select('SR_B4'),
    "NIR": image.select('SR_B5'),
    "SWIR1": image.select('SR_B6'),
    "SWIR2": image.select('SR_B7')
  }).rename('TWI')

```

```

BSI = image.expression(
  "(SWIR2 + RED) - (NIR + BLUE) / (SWIR2 + RED) + (NIR + BLUE)", {
    "BLUE": image.select('SR_B2'),
    "RED": image.select('SR_B3'),
    "NIR": image.select('SR_B5'),
    "SWIR2": image.select('SR_B7')
  }).rename('BSI')

```

```

indices_only = image.addBands([NDWI,NDMI,NDVI,WRI,AWEI,TWI, BSI,mNDWI])
indices_final =
indices_only.select(['NDWI',"mNDWI","NDVI","WRI","AWEI","TWI","BSI","NDMI"])

```

#Relleno Landsat-7

```

composite2005 = ee.ImageCollection([image2000, image2005]).mosaic()
composite2010 = ee.ImageCollection([image2015, image2010]).mosaic()

```

#Exportación de imágenes a formato .GeoTiff (Ejemplo)

```

geemap.ee_export_image_to_drive(
  image=indices_final,
  description='NewImage'+year,      # nombre de la tarea en Earth Engine
  folder='Year15',                  # carpeta en Google Drive

```

```
fileNamePrefix=year,      # nombre del archivo (sin .tif)  personalizado
scale=12,
crs='EPSG:32717',
fileFormat='GeoTIFF')
```

Apéndice B: Desarrollo de algoritmo de clasificación binaria usando la librería “*scikit-learn*” en Python

#Carga de las librerías necesarias

```
import os
import numpy as np
import geopandas as gpd
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
import rasterio
from rasterio.plot import plotting_extent
import cartopy.crs as ccrs
import cartopy.mpl.gridliner as gridliner
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.metrics import accuracy_score, confusion_matrix, classification_report, roc_curve, auc
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.inspection import permutation_importance
```

#Carga de imágenes necesarias para el muestreo

```
im_1985="Data/RST/1985.tif"
im_1990="Data/RST/1990.tif"
im_2019="Data/RST/2019.tif"
im_2024="Data/RST/2024.tif"
```

#Carga de shapefiles necesarios para el muestreo

```
train_1 = gpd.read_file("Data/SHP1/NPWet.shp").to_crs(epsg=32717)
train_11 = gpd.read_file("Data/SHP/NPWet90.shp").to_crs(epsg=32717)
train_12 = gpd.read_file("Data/SHP/NPWet19.shp").to_crs(epsg=32717)
train_2 = gpd.read_file("Data/SHP1/NPdry.shp").to_crs(epsg=32717)
valid = gpd.read_file("Data/SHP/VA1.shp").to_crs(epsg=32717)
```

#Obtención de los valores para el año 1985

with rasterio.open(im_1985) as src:

Obtener los nombres de las bandas

```
band_names = src.descriptions # Se muestra en formato tupla
```

Se ubican nombres genéricos si no hay nombres

```
if not any(band_names):
```

```
    band_names = [f'band_{i+1}' for i in range(src.count)]
```

Conversión de puntos shape en lista de coordenadas (x, y)

```
train_coords = [(x, y) for x, y in zip(train_1.geometry.x, train_1.geometry.y)]
```

```
valid_coords = [(x, y) for x, y in zip(valid.geometry.x, valid.geometry.y)]
```

Extracción de valores en cada banda

```
train_values = list(src.sample(train_coords))
```

```
valid_values = list(src.sample(valid_coords))
```

Conversión a DataFrame con los nombres de las bandas como nombres de columna

```
df_train = pd.DataFrame(train_values, columns=band_names)
```

```
df_valid = pd.DataFrame(valid_values, columns=band_names)
```

```
train_1 = train_1.join(df_train)
```

```
valid = valid.join(df_valid)
```

```
train_1 = train_1.drop(columns=['geometry', 'id'])
```

```
valid = valid.drop(columns=['geometry', 'id'])
```

```
train_1 = train_1.dropna()
```

```
valid = valid.dropna()
```

```
train_1['class'] = train_1['class'].astype(int)
```

```
valid['class'] = valid['class'].astype(int)
```

```
df_train = train_1
```

```
df_valid = valid
```

Carga de raster 1990

```
with rasterio.open(im_1990) as src_1990:
```

```
    band_names_1990 = src_1990.descriptions
```

```
    if not any(band_names_1990):
```

```
        band_names_1990 = [f'band_{i+1}' for i in range(src_1990.count)]
```

```
train_11_coords = [(x, y) for x, y in zip(train_11.geometry.x, train_11.geometry.y)]
```

```
train_11_values = list(src_1990.sample(train_11_coords))
```

Conversión a DataFrame

```
df_train_11 = pd.DataFrame(train_11_values, columns=band_names_1990)
```

```
# Join to GeoDataFrame
```

```
train_11 = train_11.join(df_train_11)
```

Eliminar columnas innecesarias

```
train_11 = train_11.drop(columns=['geometry', 'id'])
```

Eliminación de datos nulos y comprobación de consistencias de tipo de dato

```
train_11 = train_11.dropna()
```

```
train_11['class'] = train_11['class'].astype(int)
```

Extracción de datos en imagen del 2019

```

with rasterio.open(im_2019) as src_2019:
    band_names_2019= src_2019.descriptions
    if not any(band_names_2019):
        band_names_2019 = [f'band_{i+1}' for i in range(src_2019.count)]

    train_12_coords = [(x, y) for x, y in zip(train_12.geometry.x, train_12.geometry.y)]
    train_12_values = list(src_2019.sample(train_12_coords))

```

Conversión a DataFrame

```
df_train_12 = pd.DataFrame(train_12_values, columns=band_names_2019)
```

Unión a GeoDataFrame

```
train_12 = train_12.join(df_train_12)
```

Eliminar columnas innecesarias

```
train_12 = train_12.drop(columns=['geometry', 'id'])
```

Eliminación de datos nulos y comprobación de consistencias de tipo de dato

```

train_12 = train_12.dropna()
train_12['class'] = train_12['class'].astype(int)

```

Unión de train_1 (1985) y train_11 (1990)

```
df_train = pd.concat([train_1, train_11, train_12], ignore_index=True)
```

Extracción de datos en imagen del 2024

```
with rasterio.open(im_2024) as src:
```

Obtener los nombres de las bandas

```
band_names = src.descriptions
```

Se ubican nombres genéricos si no hay nombres

```

if not any(band_names):
    band_names = [f'band_{i+1}' for i in range(src.count)]

```

Conversión de puntos shape en lista de coordenadas (x, y)

```
train_coords_1 = [(x, y) for x, y in zip(train_2.geometry.x, train_2.geometry.y)]
```

Extracción de valores en cada banda

```
train_values_1 = list(src.sample(train_coords_1))
```

```
df_train_1 = pd.DataFrame(train_values_1, columns=band_names)
```

```
train_2 = train_2.join(df_train_1)
```

```
train_2 = train_2.drop(columns=["geometry", "id"])
```

```
train_2 = train_2.dropna()
```

```
train_2['class'] = train_2['class'].astype(int)
```

```
df_train_1 = train_2
```

```
train = pd.concat([df_train, df_train_1], axis=0)
```

Preparación de datos de entrenamiento

```
X_train = train.drop(columns=["class"])
```

```
y_train = train["class"]
```

```
X_valid = valid.drop(columns=["class"])
```

```
y_valid = valid["class"]
```

```
X_train, X_valid, y_train, y_valid = train_test_split(X_train, y_train, test_size=0.3,  
random_state=42)
```

```
scaler = StandardScaler()
```

```
X_train_scaled = pd.DataFrame(scaler.fit_transform(X_train), columns=X_train.columns)
```

```
X_valid_scaled = pd.DataFrame(scaler.transform(X_valid), columns=X_valid.columns)
```

#Entrenamiento del model de Random Forest (Clasificación binaria)

```
model = RandomForestClassifier(n_estimators=300, random_state=42)
model.fit(X_train_scaled, y_train)
```

#Predicción con los datos de validación

```
y_pred = model.predict(X_valid_scaled)
```

```
cm = confusion_matrix(y_valid, y_pred, labels=[0,1])
```

#Evaluación del modelo

```
print("Matriz de confusión:")
```

```
print(confusion_matrix(y_valid, y_pred))
```

```
plt.figure(figsize=(6,4))
```

```
sns.heatmap(cm, annot=True, fmt="d", cmap="Blues",
```

```
            xticklabels=["Otras coberturas", "Agua"],
```

```
            yticklabels=["Otras coberturas", "Agua"])
```

```
plt.xlabel("Valores de predicción")
```

```
plt.ylabel("Valores reales")
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.savefig("FigMatrix_thesis.jpg", dpi=500, format="jpg")
```

```
plt.show()
```

```
print("\nReporte de clasificación:")
```

```
print(classification_report(y_valid, y_pred))
```

#Generación de la curva ROC y presentación en pantalla

```
probs = model.predict_proba(X_valid)[:, 1]
```

```
fpr, tpr, _ = roc_curve(y_valid, probs)
```

```
roc_auc = auc(fpr, tpr)
```

```
plt.figure()
```

```
plt.plot(fpr, tpr, color='blue', lw=2, label=f'ABC = {roc_auc:.3f}')
```

```
plt.plot([0, 1], [0, 1], color='gray', linestyle='--')
plt.xlabel('Tasa de falsos positivos')
plt.ylabel('Tasa de verdaderos positivos')
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("FigROC_thesis.jpg", dpi=500, format="jpg")
plt.show()
```

Apéndice C: Tabla resumen de la evaluación de los elementos que condicionan la movilidad lateral en base a los parámetros morfométricos e hidroclimáticos, y recomendaciones de gestión en base al marco de referencia AMRO

ID	Migración máxima [m]	Sinuosidad máxima	Categoría AMRO	Medida específica	Buffer recomendado	Retraso	Valor (r)	p-valor	Ventana de prevención	Prioridad	Notas
XS 1	253.66	3.5	Evitar	Delimitación de zona de exclusión (buffer) Prohibición de creación de nuevas infraestructuras	507,32	2	0.480	0.114	dic-abr (t+2)	Media	
XS 2	281.16	5	Evitar	Planificación de espacios de cultivo fuera del buffer recomendado Prohibición de nuevos asentamientos	562,32	2	0.575	0.051	dic-abr (t+2)	Media	

				fuera del sector de influencia							
XS 3	233.81	3	Evitar	Prohibición de creación de nuevas infraestructuras	584,52	1	0.499	0.099	dic-abr (t+1)	Alta	Cercanía a perímetro urbano
XS 4	217.51	2.7	Mitigar	Revegetación con especies riparias Reconexión de meandros abandonados	543,77	0	-0.461	0.131	dic-abr (t)	Alta	Cercanía a perímetro urbano
XS 5	515.32	5	Evitar	Reconexión de meandros previos Buffers de vegetación ribereña Prohibición de delimitación de áreas de cultivos	1030,64	2	0.325	0.303	dic-abr (t+2)	Media	Cercanía a perímetro urbano
XS 6	434.59	3.7	Recuperar	Revegetación de los márgenes	651,88	1	-0.127	0.694	dic-abr (t+1)	Baja	
XS 7	247.67	4	Recuperar	Recuperación de planicies de inundación antiguas	495,34	0	-0.370	0.237	dic-abr (t)	Media	

XS 8	108.17	4.5	Recuperar	Revegetación con especies riparias	270,42	2	0.547	0.066	dic-abr (t+2)	Baja	
XS 9	121.84	2.4	Evitar	Controlar el crecimiento y usos agrícolas en las proximidades Aplicar estructuras de control de flujo	304,6	0	-0.575	0.050	dic-abr (t)	Alta	Cercanía a perímetro urbano
XS 10	133.62	2.5	Recuperar	Recuperación de planicies de inundación Revegetación de riberas	267,24	0	-0.159	0.621	dic-abr (t)	Media	
XS 11	271.85	2.3	Compensar	Creación de corredores ecológicos	407,75	2	0.887	0.000	dic-abr (t+2)	Baja	Cercanía a perímetro urbano
XS 12	136.16	2.4	Recuperar	Recuperación de áreas de planicies de inundación previas	340,40	0	0.695	0.012	dic-abr (t)	Alta	Cercanía a perímetro urbano
XS 13	128.58	3.6	Recuperar	Recuperación de planicies de inundación previas	192,87	1	-0.389	0.211	dic-abr (t+1)	Baja	

XS 14	196.69	3.8	Evitar	Creación de corredores ecológicos Prohibición de construcción de nuevas infraestructuras y asentamientos	295,03	1	-0.457	0.135	dic-abr (t+1)	Baja	Cercanía a perímetro urbano
-------	--------	-----	--------	---	--------	---	--------	-------	---------------	------	-----------------------------------

Apéndice D: Prueba de envío a Journal y estado de revisión

(Carta de recepción al Journal Environmental Challenges/Elsevier [CiteScore: 11.7])



Submission successful to Environmental Challenges - manuscript number

Desde em.envc.0.95f961.ed0b836d@editorialmanager.com
<em.envc.0.95f961.ed0b836d@editorialmanager.com>
en nombre de
ENVIRONMENTAL CHALLENGES <em@editorialmanager.com>

Fecha Lun 08/09/2025 20:15

Para Fernando Enrique Morante Carballo <fmorante@espol.edu.ec>

This is an automated message.

Manuscript Number: **ENVC-D-25-01333**

Integration of spectral indices and precipitation data to assess river morphometric features in a tropical semi-humid environment

Dear Dr. Morante,

Thank you for submitting your manuscript to Environmental Challenges.

This is a confirmation that we have received your submission and it has been assigned the following manuscript number: **ENVC-D-25-01333**. Please reference this manuscript number for any future enquiries about the status of your manuscript.

No further action is required from you at this time.

Track your submission

You can track the current status of your manuscript throughout the editorial process by logging in as an author at <https://www.editorialmanager.com/envc/>, and navigating to the "Submissions Being Processed" folder.

Find out more about the steps involved in the editorial process here: https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/5971/

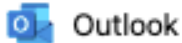
If you need help with login

Please click the "Send Username/Password" link on the Login page. If the problem persists, contact Author Support- refer to details at the end.

Thank you for your continued support of this journal.

Kind regards,
Environmental Challenges

(Notificación de estado: Bajo Revisión)



Track the status of your submission to Environmental Challenges

Desde Track your Elsevier submission <no-reply@submissions.elsevier.com>

Fecha Sáb 13/09/2025 2:19

Para Fernando Enrique Morante Carballo <fmorante@espol.edu.ec>

Manuscript Number: ENVC-D-25-01333

Manuscript Title: Integration of spectral indices and precipitation data to assess river morphometric features in a tropical semi-humid environment

Journal: Environmental Challenges

Dear Fernando Morante,

Your submitted manuscript is currently under review. You can track the status of your submission in Editorial Manager, or track the review status in more detail using Track your submission here:

<https://track.authorhub.elsevier.com?uuid=3c1e736c-850d-4065-893d-7a6a5eff3222>

This page will remain active until the peer review process for your submission is completed. You can visit the page whenever you like to check the progress of your submission. The page does not require a login, so you can also share the link with your co-authors.

If you are a WeChat user, then you can also receive status updates via WeChat. To do this please click the following link; you will be taken to Elsevier China's website where further instructions will guide you on how to give permission to have your submission's details made visible in WeChat. Note that by clicking the link no submission data is transferred to the WeChat platform. If you have any questions about using Track your submission with WeChat please visit 在线咨询 https://cn.service.elsevier.com/app/chat/chat_launch/supporthub/publishing/session/ - Journal Article Publishing 支持中心

<https://webapps.elsevier.cn/st-wechat/subscribe?signature=1757747848-4d60589a5f7bdc857ecfbba0fbd1d56e&uuid=3c1e736c-850d-4065-893d-7a6a5eff3222>

We hope you find this service useful.

Kind regards,
Journal Office of Environmental Challenges
Elsevier B.V.

(Encabezado del artículo con título e información de autores)

Integration of spectral indices and precipitation data to assess river morphometric features in a tropical semi-humid environment

Jairo Dueñas-Tovar^{1,2,3}, María Jaya-Montalvo^{2,4}, André Luiz Lopes de Faria⁵, Fernando Morante-Carballo^{2,3,6,*}

- 1 Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, 090902, Ecuador
- 2 Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, 090902, Ecuador
- 3 Geo-Recursos y Aplicaciones (GIGA), Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, 090902, Ecuador
- 4 Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, 090902, Ecuador
- 5 Laboratório de Geomorfologia do Quaternário, Departamento de Geografia, Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, Universidade Federal de Viçosa, 36570-900 Viçosa, MG, Brazil
- 6 Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, 090902, Ecuador

*Corresponding author: (Fernando Morante-Carballo) fmorante@espol.edu.ec;

ORCID's

Jairo Dueñas-Tovar: <https://orcid.org/0000-0002-3232-4611>

María Jaya-Montalvo: <https://orcid.org/0000-0002-6804-6377>

André Luiz Lopes de Faria: <https://orcid.org/0000-0003-0492-9725>

Fernando Morante-Carballo: <https://orcid.org/0000-0003-0374-0306>