



Erosión, sedimentación y dinámica lateral del río Amazonas entre la confluencia de los ríos Marañón-Ucayali y la localidad de Indiana - Loreto, Amazonía peruana

José Sanjurjo-Vílchez^{ID*}, León Bendayán-Acosta

Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana - IIAP. Av. A. Quiñones km. 2.5 -Iquitos, Perú.

Resumen: La dinámica fluvial se caracteriza por diversos fenómenos que ocurren a lo largo del cauce de un río, entre estos los procesos de erosión, sedimentación y movimiento lateral que afectan la vida de los ribereños asentados en los márgenes de los ríos de las regiones tropicales. En este estudio evaluamos los índices de erosión, sedimentación y migración lateral del canal principal en tres sectores de la cuenca media del río Amazonas en la Amazonía peruana. Los resultados muestran una gran vulnerabilidad a la erosión y migración lateral en el sector "Samaria" y en parte del sector "Iquitos". El sector "Muyuy" en la margen izquierda presenta un escenario de probable avulsión o incursión del río Amazonas sobre el río Itaya. Los procesos analizados han sido interpretados e ilustrados mediante el uso de procedimientos y técnicas proporcionados por la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica.

Palabras clave: río Amazonas, teledetección, erosión, sedimentación, migración lateral.

Erosion, Sedimentation and lateral migration of the Amazon River between the confluence of the Marañón-Ucayali rivers and the town of Indiana - Loreto, Peruvian Amazon

Abstract: Fluvial dynamics are characterized by various phenomena that occur along the course of a river, among these processes of erosion, sedimentation, and lateral movement that affect the lives of riversiders settled on the banks of rivers in tropical regions. In this study we evaluated the indices of erosion, sedimentation and lateral migration of the main channel in three sectors of the middle basin of the Amazon River in the Peruvian Amazon. The results show great vulnerability to erosion and lateral migration in the "Samaria" sector and in part of the "Iquitos" sector. The "Muyuy" sector on the left bank presents a scenario of probable avulsion or incursion of the Amazon River on the Itaya River. The analyzed processes have been interpreted and illustrated through the use of procedures and techniques provided by Remote Sensing and Geographic Information Systems.

Key words: Amazon river, remote sensing, erosion, deposition, lateral migration.

1. Introducción

Los sistemas fluviales del llano amazónico son dinámicos y presentan procesos de erosión, sedimentación y migración lateral que alteran el curso de los ríos, modificaciones que son

observadas en la transformación de las riberas, en la aparición, desaparición y cambio de forma de islas, islotes y playas; así como en las variaciones en la vegetación ribereña (Hupp y Osterkamp, 1996, 2013) constituyéndose en modeladores del

To cite this article: Sanjurjo-Vílchez, J., Bendayán-Acosta, L. 2024. Erosion, Sedimentation and lateral migration of the Amazon River between the confluence of the Marañón-Ucayali rivers and the town of Indiana - Loreto, Peruvian Amazon. *Revista de Teledetección*, 63, 23-36. <https://doi.org/10.4995/raet.2024.20142>

* Corresponding author: jsanjurjo@iiap.org.pe

paisaje circundante. Las intensidades y frecuencias de tales cambios afectan a los residentes y a la infraestructura establecida, provocando pérdidas económicas críticas en estos sectores (Saikia y Mahanta, 2023). Los ribereños utilizan los suelos aluviales que afloran en la época de estiaje para la siembra de cultivos de ciclo corto (Correa *et al.*, 2019; Ríos y Camacho, 2016) y ocupan las partes altas de la llanura de inundación, que se anegan ocasionalmente con las crecidas extraordinarias del río, para cultivos de ciclo intermedio (Kalliolla *et al.*, 1999; Pinedo-Vasquez *et al.*, 2002).

La identificación de áreas de riesgo potencial por inundación, erosión, sedimentación, movimiento lateral e impacto antropogénico es facilitada por la teledetección ya que esta proporciona la cobertura multitemporal de diversos espacios geográficos y experimenta avances tecnológicos que suministran productos que permiten observar con mayor detalle la dinámica de los ríos y de diversas variables biofísicas tal como las exhibidas por la geomorfología fluvial (Lehotský *et al.*, 2018). La interpretación visual de imágenes satelitales integrada con el modelamiento SIG proporcionan instrumentos que facilitan la caracterización de los ambientes fluviales (Ardila, 2013).

El análisis multitemporal permite discriminar el cambio que experimentan las coberturas de la superficie terrestre y aporta elementos de juicio para una mejor comprensión de las tendencias que estas cubiertas pudieren experimentar. El objetivo de este estudio fue caracterizar los procesos de erosión y sedimentación en el río Amazonas, así como analizar las tendencias del movimiento lateral y el riesgo de avulsión o incursión en la cuenca baja del río Itaya, utilizando herramientas de interpretación visual de imágenes y modelamiento SIG para generar productos cartográficos que grafiquen tales procesos. El propósito es proporcionar a los tomadores de decisión elementos de juicio que contribuyan en la formulación de planes de intervención a fin de minimizar los efectos de estos fenómenos naturales, así como para mitigar el impacto del cambio climático sobre la estabilidad del canal

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de Estudio

Este estudio fue realizado en un tramo del río Amazonas cercano a la ciudad de Iquitos, en el sector comprendido entre las coordenadas WGS84/UTM 667 067 E, 9 611 174 S y 720 585 E, 9 522 097 S, (Figura 1).

Se dividió el área de estudio en tres sectores en función de la forma del canal del río, así como por la mayor o menor actividad de erosión, sedimentación y movilidad lateral; además, los sectores 1 y 2 por el peligro de avulsión sobre el río Itaya. La Figura 1 muestra estas áreas. El sector 1 se ha denominado “Samaria” por los centros poblados (Samaria y Samaria 2da. Zona) establecidos en los alrededores del “aguajal” existente en ese lugar, siendo aquí el río del tipo meándrico, presentando dos curvas principales que caracterizan esta sección. En el sector 2, llamado “Muyuy” por el complejo de islas presentes en la zona, el canal del río es del tipo anastomosado. En el sector 3, nombrado como “Iquitos” por la cercanía de esta ciudad el río es del tipo meándrico. Se consideró además la importancia de la producción agrícola de la zona.

2.2. Imágenes satelitales

Se seleccionaron imágenes con los criterios siguientes: a) temporalidad 10 años; b) período inicial 1973; c) períodos esperados 1973, 1983, 1993, 2003, 2013, 2023. Para imágenes no disponibles se tomó una imagen con ± 1 año de antigüedad; finalmente los períodos observados fueron: 1973, 1982, 1993, 2003, 2013, 2022. Las imágenes utilizadas son de disponibilidad pública (Tabla 1a) en el servidor *EarthExplorer* de la USGS (*United States Geological Survey*).

2.3. Procesamiento Digital de Imágenes

Las imágenes se consiguieron en formato GeoTiff (imagen TIFF georreferenciada con coordenadas planas), con un nivel de procesamiento L1. Con ERDAS Imagine se compararon las imágenes obtenidas con la imagen testigo 006063 del 2021-09-19 de Landsat 8 sensor OLI, detectándose un desplazamiento en las imágenes examinadas;

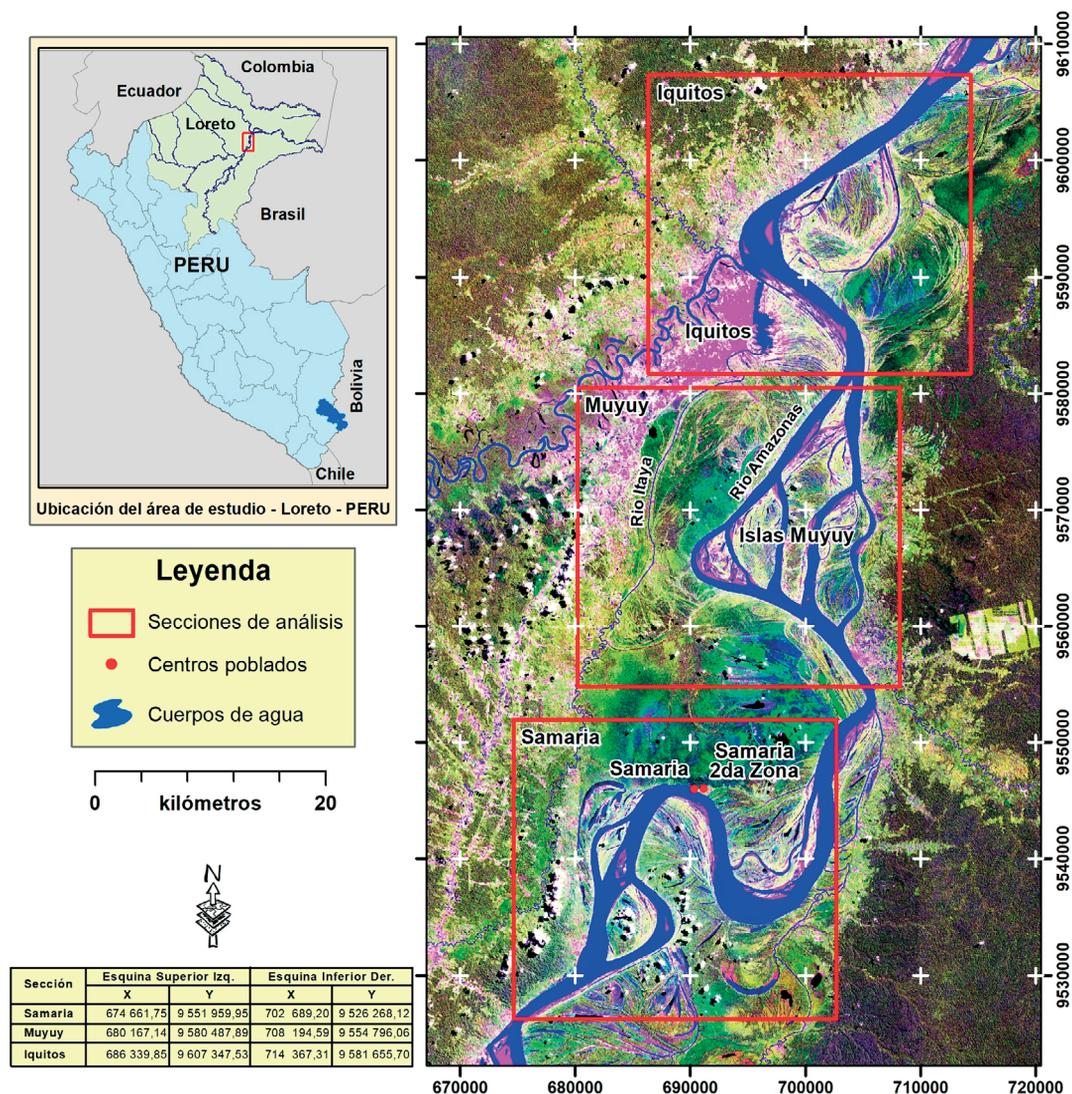


Figura 1. Vista del área de estudio y de las secciones de análisis. Imagen LandSat OLI 006063 20220813.

error rectificado a través de la corrección geométrica y el método de remuestreo del vecino más próximo (Lillesand, 2015; Campbell, 2023) empleando la técnica imagen-imagen, utilizándose como fuente de los GCP la imagen testigo antes mencionada, cuyos parámetros geodésicos fueron: Elipsoide WGS84, Datum Horizontal WGS84; Sistema de Proyección UTM zona 18 Sur. El Error Medio Cuadrático (RMS) máximo admitido fue ≤ 0.5 píxeles. La resolución espacial para las imágenes provenientes del sensor MSS fue de 68×68 m; y para las imágenes de los sensores TM, ETM+ y OLI fue de 30×30 m.

A continuación, con ArcMap se combinaron en un esquema de color RGB las bandas 4, 3, 2 para el caso del sensor MSS; 5, 4, 3 para el Sensor TM y ETM+; y 6, 5, 4 para el sensor OLI, composiciones de color utilizadas con el objeto de resaltar los bordes de los cuerpos de agua (Campbell, 2023). Luego se procedió a aplicar la técnica de manipulación del contraste por equalización del histograma (Chuvieco, 2016) para incrementar la individualización de los elementos del paisaje; para las imágenes MSS se hizo uso del algoritmo Porcentaje recortado (*Percent Clip*) con un valor entre 0,5 – 1,5, y con la función Gamma activada

en sus valores por defecto. Para TM, ETM+ y OLI se utilizó la desviación estándar (*Standard Deviations*) con n entre 1 – 1,75 y función *Gamma* desactivada.

2.4. Modelamiento SIG

Con las herramientas proporcionadas por ArcMap se obtuvieron coberturas vectoriales en formato *shapefile* digitalizando sobre las imágenes corregidas el curso del río Amazonas, para cada uno de los períodos considerados, a la escala cartográfica de trabajo de 1:75 000. Esta escala es aproximadamente la media entre la escala máxima para imágenes MSS que es de 1:102 000 y la de 1:45 000 para imágenes TM, ETM+ y OLI, con la cual los elementos del paisaje mantienen la simetría geométrica y los atributos visuales que permiten su identificación. La precisión de la digitalización no fue calculada por no ser determinante para los fines del estudio. La Unidad Mínima de Mapeo cartografiable fue de 4 mm² (Lencinas y Siebert, 2009; Goodchild, 2001), que a la escala de trabajo es igual a 2,25 ha.

Sobre las coberturas se aplicaron operaciones espaciales de unión, superponiéndolas por pares (1973-1982, 1982-1993, 1993-2003, 2003-2013, 2013-2022) para generar una nueva cobertura que muestre los cambios en la erosión y sedimentación para el período en cuestión. Se calificaron los espacios resultantes como erosión o sedimentación utilizando criterios de exclusión en base a las reglas de la Tabla 1b. Se registró la línea central del canal principal del río Amazonas por digitalización manual sobre los *shapefiles* de cada período. Luego, se recurrió a la caja de herramientas *Stream Chanel Migration Toolbox* (Legg *et al.*, 2014) que reportó los índices promedio de migración del canal medidos a lo largo del tramo en múltiples transectos. Se utilizaron como mapas complementarios el Mapa de Vegetación (Zárate, 2009) para caracterizar la vegetación, el Mapa Geológico (INGEMMET, 2016) para observar las estructuras geológicas; sobre el formato vectorial de estos dos mapas se realizaron operaciones de acondicionamiento a la nueva posición del río Amazonas en el 2022. El Modelo Digital de Elevaciones (DEM – *Digital Elevation Model* extraído del DEM

Tabla 1. Parámetros básicos para el procesamiento digital de Imágenes satelitales del estudio.

Tabla 1a. Imágenes LandSat utilizadas.

Año	Fecha de adquisición	LandSat/Sensor	Código	Época del año ¹
1973	19731207	1/MSS	LM01_L1TP_006063_19731207_20180428_01	Transición a Creciente
1982	19821018	4/MSS	LM40060631982291AAA03	Vaciante
1993	19930805	5/TM	5006063009321710	Vaciante
2003 ²	20030926	7/ETM+	LE70060632003269EDC01	Vaciante
	20031105	5/TM	LT50060632003309CUB00	Transición a Creciente
2013 ²	20130625	8/OLI	LC80060632013176LGN00	Transición a Vaciante
	20130828	8/OLI	LC80060632013240LGN00	Vaciante
	20130921	7/ETM+	LE07_L2SP_006063_20130921_20200907_02	Vaciante
2022	20220813	9/OLI	LC09_L2SP_006063_20220813_20220815_02	Vaciante

¹ SENAMHI, 2016.

² Uso de imágenes de fechas diferentes por la presencia de nubes en algunas áreas o efectos del error SCL-off data.

Tabla 1b. Reglas para Aplicar el Criterio de Exclusión.

Códigos	Suceso	Código final	Descripción final
44 — 44	⇒⇒	44	Islas
44 — 99	⇒⇒	1	Erosión
44 — 55	⇒⇒	2	Sedimentación
99 — 99	⇒⇒	99	Cuerpos de agua
99 — 44	⇒⇒	2	Sedimentación
99 — 55	⇒⇒	2	Sedimentación
55 — 55	⇒⇒	55	Tierra Firme
55 — 44	⇒⇒	2	Sedimentación
55 — 99	⇒⇒	1	Erosión

PALSAR de 12,5 m del satélite ALOS) (ALOS-PALSAR, 2011) proporcionó datos de elevación de la superficie terrestre que fueron utilizados para generar los perfiles topográficos de esta área.

3. Resultados y Discusión

3.1. Erosión y Sedimentación

La forma del canal del río es controlada por la carga sedimentaria según estimaciones de la migración lateral anual en varios ríos de la amazonia continental (Constantine *et al.*, 2014). En efecto, el Amazonas del lado peruano transporta una carga de 450×10^6 t año⁻¹ (Guyot *et al.*, 2007) y adopta formas entre meándrico y anastomosado (Kalliolla *et al.*, 1992) en las secciones de estudio; en contraste, en el lado brasileño donde las formas del canal suelen ser trenzadas (Latrubesse, 2008), arrastra una carga de 2070×10^6 t año⁻¹ (Dunne, 1998).

El pulso de inundación que altera la carga de sedimentos (Harrison *et al.*, 2017) y la cantidad de energía generada por el caudal del río son agentes determinantes del comportamiento destructivo de la erosión y de la acción constructiva de las

deposiciones, generando diferencias en los valores cuantitativos de un punto a otro. Las Tablas 2a y 2b exponen la variación de los índices de erosión y deposición en las secciones analizadas, los valores medios anuales muestran un decremento del 23% en los valores de erosión y un incremento en la deposición de 14%: con una ganancia de áreas mayor a las pérdidas; estos valores son proporcionales a los estimados para el río Amazonas entre los tributarios Purus y Negro (Passos y Soares, 2017).

La Figura 2 grafica las áreas de erosión y sedimentación entre 1972 y 2022; modeladas por acción de la energía de la corriente y el oleaje natural que son factores regulados por los ciclos de creciente y vaciante, y por efecto de las ondas causadas por las embarcaciones que circulan a diario por el río, que actuando sobre los componentes litológicos de las orillas, producen efectos destructivos en el borde cóncavo de los meandros por la mayor velocidad y turbulencia de la corriente en estos espacios. También originan derrumbes (Figura 2A) por socavamiento del banco por debajo del nivel del agua; en tanto que en la margen convexa se forman las barras meándricas (Figura 2B) por

Tabla 2. Evolución de la erosión y la sedimentación en el área de estudio.

Tabla 2a. Erosión.

Períodos (Total 49 años)	Sector Samaria (ha)	Sector Muyuy (ha)	Sector Iquitos (ha)	TOTAL	Promedio anual (ha)
1973 - 1982	2133,62	2321,47	2215,60	6670,69	741,19
1982 - 1993	2622,73	2902,78	2397,56	7923,07	720,28
1993 - 2003	2943,65	1790,77	2249,95	6984,37	698,44
2003 - 2013	2552,96	2466,06	1830,00	6849,02	684,90
2013 - 2022	2518,63	1449,90	1228,81	5197,34	577,48
TOTAL	12771,59	10930,98	9921,92	33624,49	3422,29
Promedio Anual	260,64	223,08	202,49	686,21	684,46

* Total = Sumatoria de los 5 periodos.

* Promedio Anual = Total / 49 años.

Tabla 2b. Sedimentación.

Períodos (Total 49 años)	Sector Samaria (ha)	Sector Muyuy (ha)	Sector Iquitos (ha)	TOTAL	Promedio anual (ha)
1973 - 1982	2448,33	1454,22	2651,81	6554,36	728,26
1982 - 1993	3727,88	3196,32	2880,11	9804,31	891,30
1993 - 2003	3439,07	2227,93	3533,03	9200,03	920,00
2003 - 2013	2100,49	1923,05	1734,71	5758,25	575,83
2013 - 2022	2069,53	2040,14	2429,27	6538,94	726,55
TOTAL	13785,30	10841,66	13228,93	37855,89	3841,94
Promedio Anual	281,33	221,26	269,98	772,57	768,39

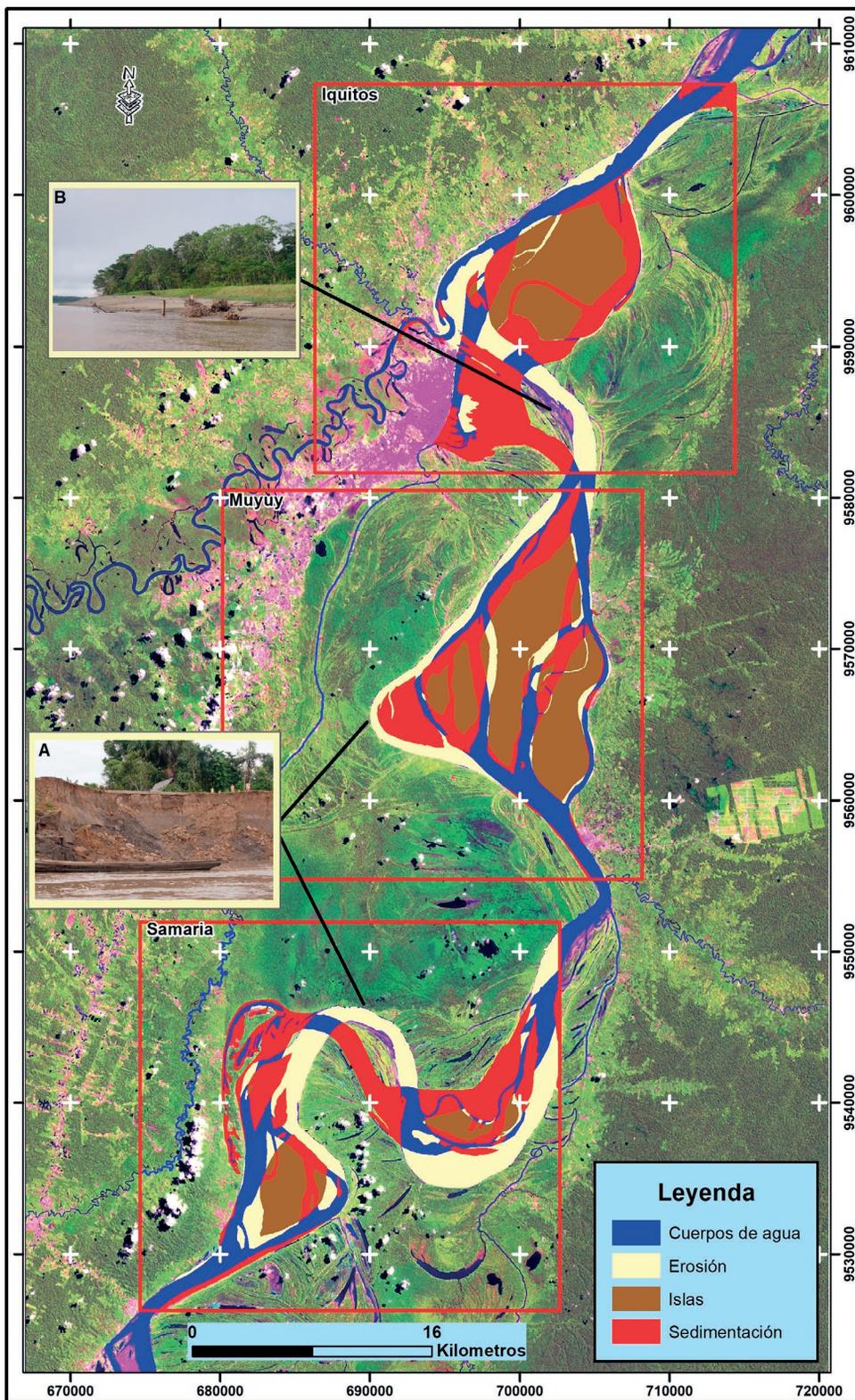


Figura 2. Erosión y sedimentación en la cuenca media del río Amazonas - Amazonía peruana, en el período 1973-2022.

deposición de sedimentos y escombros arrastrados por la corriente que en estas áreas tiene menos velocidad y energía.

No es frecuente la aparición de nuevas islas en el período analizado (1973-2022), en cambio es recurrente la transformación de la forma, el tamaño y la posición de ellas en los sectores “Samaria” e “Iquitos”. En las islas del complejo “Muyuy”, debido a la formación de terrazas superpuestas progresivamente por las deposiciones sedimentarias en el transcurso de las crecientes estacionales y periódicas (Encarnación, 1995), se ha incrementado el área superficial en un 45%, adoptando formas elongadas hacia el norte.

Amplias superficies del área estudiada se encuentran asentadas sobre terrazas que geológicamente (Figura 3b) corresponden a depósitos aluviales

del cuaternario holocénico (Qh-al) y depósitos aluviales del cuaternario pleistocénico (Qp-al) y que están constituidos, entre otros, por arenas, limos y arcillas no consolidadas (Räsänen *et al.*, 1998) que hacen de estas áreas susceptibles a la erosión y aportantes de sedimentos; sin embargo, la vegetación ribereña juega un papel importante como regulador de estos fenómenos a través de las raíces (Hupp y Osterkamp, 2013), del tamaño de las especies (Hupp y Osterkamp, 1996), y de la densidad de la vegetación (Camporeale *et al.*, 2013). En la sección “Samaria” es evidente que el meandro de la mitad superior se desplaza al este, observándose: a) la destrucción de áreas calificadas como Bosques de llanuras meándricas asentadas sobre terrazas Qh-al; b) la progresión de tal movimiento siguiendo el borde del Bosque de aguajales mixtos o semidensos (Figura 3a) que se

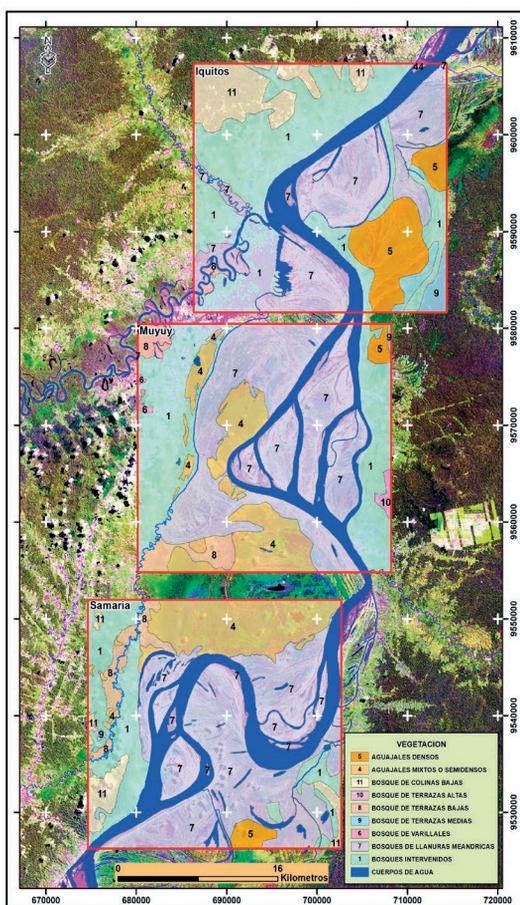


Figura 3a. Vegetación (Fuente: Zárate 2009).

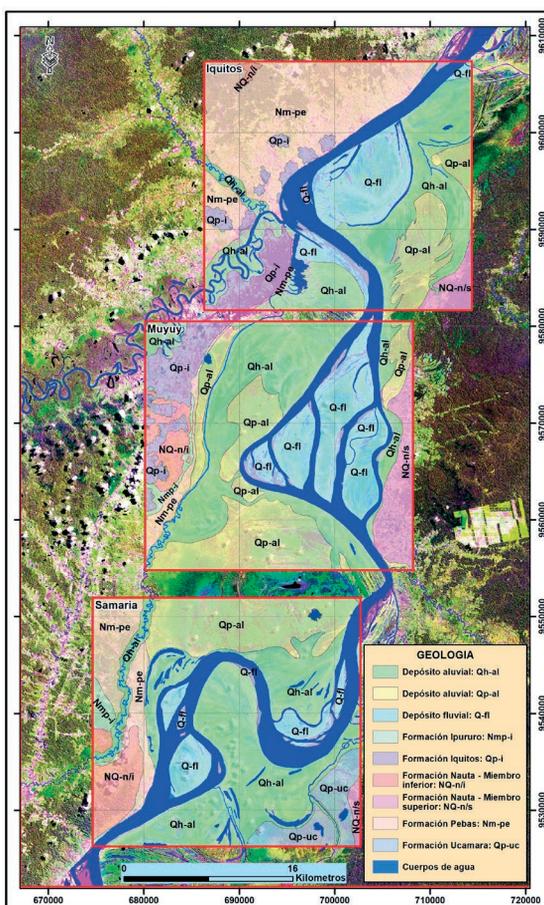


Figura 3b. Geología (Fuente: INGENMET, 2016).

Cuenca baja del río Itaya y cuenca media del río Amazonas - Amazonía peruana

encuentra establecido sobre una terraza Qp-al y en el cual la especie más frecuente es la *Mauritia flexuosa* “aguaje” cuyas raíces neumatóforos se expanden hasta 40 m alrededor de la planta (Del Castillo *et al.*, 2006) y alcanzan una profundidad aproximada de 60 cm (Santos, 2005), por lo cual el avance de la erosión sobre esta formación se reduce significativamente. Sin embargo, en el meandro ubicado en la mitad izquierda de la sección “Muyuy” sucede lo contrario, pues la erosión evoluciona a través de una formación geológica Qh-al que se encuentra entre bosques de aguajales mixtos o semidensos asentados sobre una terraza del tipo Qp-al.

Las islas “Muyuy” calificadas como depósitos fluviales del cuaternario (Q-fl) que litológicamente corresponden con arenitas, arcillas y limos (Castro, 2012) y, por tanto expuestas a la erosión, exhiben una relativa estabilidad que atribuimos a la densidad y tamaño de la vegetación establecida en terrazas sobre diversos niveles topográficos, encontrándose las especies arbóreas y leñosas en las más altas (Encarnación, 1995); no obstante es necesario observar con cuidado esta afirmación por la reducción de las poblaciones de grandes árboles por efectos de la intervención antrópica (Pinedo-Vasquez *et al.*, 2002).

Se advierten trechos rectilíneos del canal principal del río en las secciones “Muyuy” e “Iquitos”. En el primer caso no encontramos una explicación más allá de la conjetura pues en el lado izquierdo el cauce fluvial se desplaza por el borde de un bosque de llanuras meándricas establecida sobre una terraza aluvial del cuaternario pleistocénico (Qp-al) que son formaciones susceptibles de ser erosionadas. En el segundo caso, en la margen izquierda del canal el bosque es intervenido y la vegetación es de herbáceas, malezas y otras especies con raíces pivotantes o fibrosas pequeñas y poco profundas (Encarnación *et al.*, 2004) resultando en espacios altamente erosionables; sin embargo, la notable estabilidad de la orilla es proporcionada por la formación geológica Pebas del Neógeno miocénico (Nm-pe) que está caracterizada por la presencia de lignitos, turbas, lutitas, niveles de caliza y areniscas muy compactas, conchas calcáreas cementadas con arena y carbonatos, así como minerales de arcilla (Castro, 2012), formando estos últimos agregados más fuertes y estables, produciendo alta resistencia a la erosión.

3.2. Desplazamiento lateral de la línea central y evolución de la sección transversal

El desplazamiento lateral del cauce de un río es un evento natural que ocasiona cambios en las riberas que en muchos casos son catastróficos. La Figura 4 grafica los desplazamientos experimentados por la línea central del canal principal del río Amazonas en las secciones de estudio determinados como una media de los movimientos calculados sobre los transectos generados por *Stream Channel Tool*. La Tabla 3 muestra las distancias de migración lateral, así como la variación de la distancia transversal del canal en cada una de las secciones. El desplazamiento lateral varía entre 352,6-1194,4 m; la máxima migración ocurrió en el período 1993-2003 en el sector “Iquitos”, donde sucedió el mayor desplazamiento promedio (734,5 m) con una media anual de 74,7 m, concentrándose en la margen derecha del río y provocando cambios en su curso por la erosión de áreas con presencia de material no cohesivo como arenas y limos, mientras que las manifestaciones erosivas en la sección “Muyuy” suceden en la orilla izquierda y en “Samaria” tanto en la margen derecha como en la izquierda. Sobresalen en la sección “Samaria” lagos meándricos de variada extensión generados por la migración lateral, mientras que en la sección “Muyuy” se destaca el desplazamiento hacia el oeste del meandro ubicado en la mitad izquierda de esta área en progresión hacia el río Itaya.

Las variaciones del ancho del canal (Tabla 3) se determinaron sobre los mismos transectos utilizados para determinar la migración lateral, estos fluctuaron entre 969,3-2 341,3 m; con una media anual de 2118,8 m exhibida por la sección “Samaria”. Los valores calculados son de épocas de vaciante y transicionales a vaciante o creciente (Tabla 1a) y no consideran las amplitudes transversales de las épocas de creciente pues los sensores ópticos tienen limitaciones para adquirir imágenes en tal época por la nubosidad imperante en la zona en particular y la Amazonia en general.

3.3. Peligro de avulsión o incursión sobre el río Itaya

Es indiscutible el efecto de los procesos de erosión, sedimentación y migración que cambian el

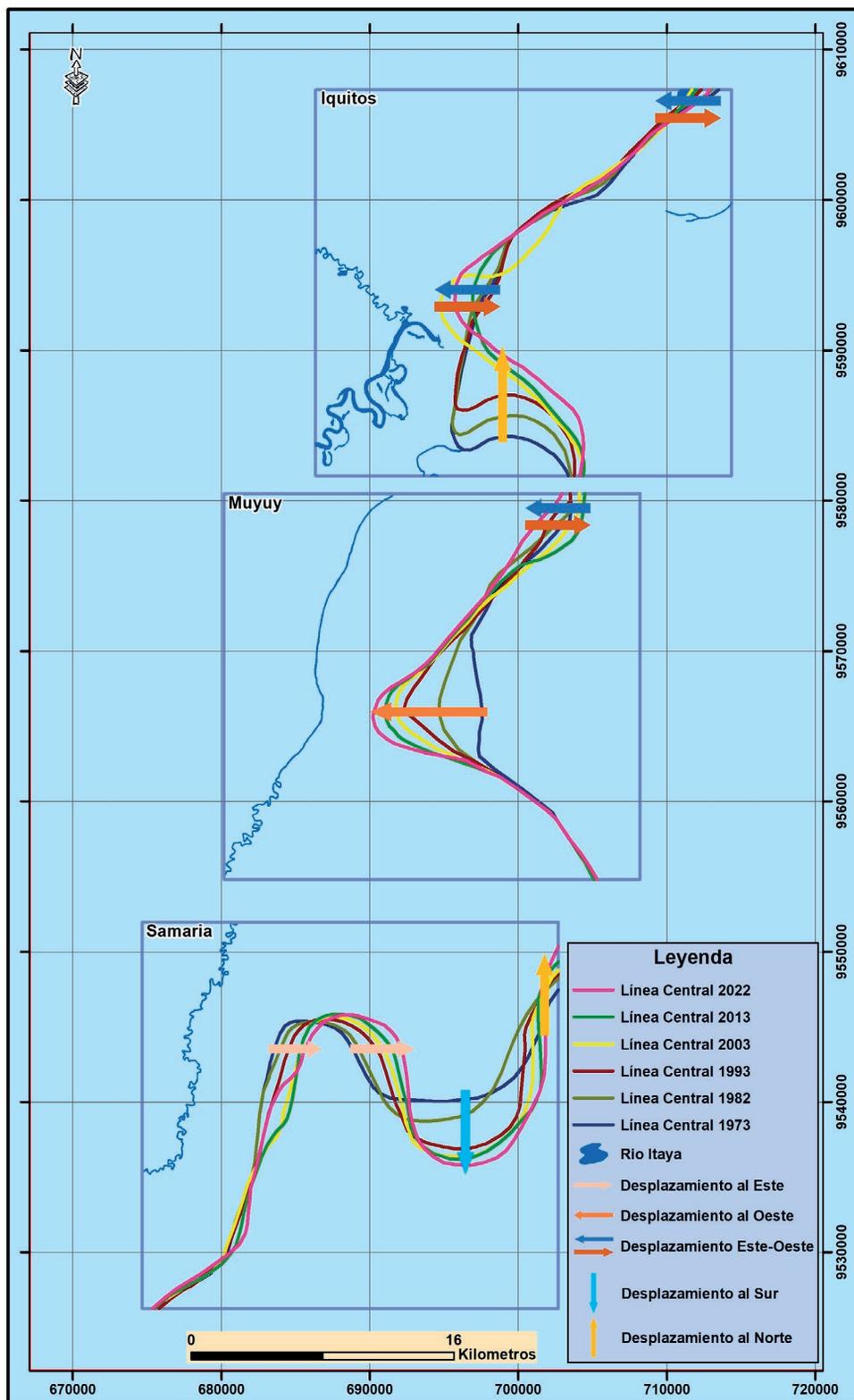


Figura 4. Evolución de la línea central del canal principal de la cuenca media del río Amazonas (Amazonia peruana), en las secciones de estudio entre 1973-2022.

Tabla 3. Tasa de migración lateral de la línea central y sección transversal del cauce principal del río Amazonas.

Tabla 3a: Sección “Samaria”.

Años	Desplazamiento promedio (m)		Sección Transversal	
	Período	Anual	Año	Promedio (m)
			1973	2 166,67
1973 - 1982	546,86	60,76	1982	2 168,02
1982 - 1993	934,15	84,92	1993	1 900,48
1993 - 2003	538,09	53,81	2003	1 927,34
2003 - 2013	352,62	35,26	2013	2 208,97
2013 - 2022	517,57	57,51	2022	2 341,31
TOTAL	2 889,31	292,27	TOTAL	12 712,79
* Media	577,86	58,45	** Media	2 118,80

* Promedio del Período = Promedio Total / 5 periodos.

Promedio Anual = Total Anual / 5 periodos.

**Promedio del Período = Promedio Total / 6 años.

Tabla 3b. Sección “Muyuy”.

Años	Desplazamiento promedio (m)		Sección Transversal	
	Período	Anual	Año	Promedio (m)
			1973	2 156,97
1973 - 1982	858,90	95,43	1982	2 176,32
1982 - 1993	608,19	55,29	1993	1 369,25
1993 - 2003	471,93	47,19	2003	1 524,83
2003 - 2013	356,93	35,69	2013	1 018,63
2013 - 2022	695,45	77,27	2022	969,31
TOTAL	2 991,40	310,88	TOTAL	9 215,31
* Media	598,28	62,18	** Media	1 535,89

Tabla 3c. Sección “Iquitos”.

Años	Desplazamiento promedio (m)		Sección Transversal	
	Período	Anual	Año	Promedio (m)
			1973	1 435,17
1973 - 1982	551,44	61,27	1982	1 560,50
1982 - 1993	604,48	54,95	1993	1 483,60
1993 - 2003	1 194,44	119,44	2003	1 584,69
2003 - 2013	795,89	79,59	2013	1 935,45
2013 - 2022	526,59	58,51	2022	1 609,64
TOTAL	3 672,84	373,77	TOTAL	9 609,05
* Media	734,57	74,75	** Media	1 601,51

curso del río y generan diversos peligros para las poblaciones ribereñas. Una inspección a la imagen del 2022 se presta para interpretar un escenario de avulsión o incursión del río Amazonas sobre el río Itaya a través de las secciones “Samaria” y “Muyuy” (Figura 5). Sin embargo, a la vista de los resultados inferimos que el sector “Samaria” no exhibe peligro alguno de avulsión o incursión debido al desplazamiento del canal hacia el este siguiendo el borde del “complejo de orillares”, cuya vegetación predominante es el “aguaje”, ubicado en la margen izquierda del río; de igual manera

un cambio del desplazamiento en dirección oeste no supone un peligro futuro debido a la barrera que significa la formación Pebas en cuyo borde oriental se encuentra el lago meándrico formado tras una migración antes de 1973 (Figuras 5a y 5b)

En el sector “Muyuy” el escenario plantea mayores probabilidades de avulsión o incursión por la progresiva aproximación del canal principal del río Amazonas hacia el río Itaya (Figuras 5c y 5d), como consecuencia de la erosión facilitada por la composición litológica del depósito aluvial del cuaternario holocénico. Un cálculo simple

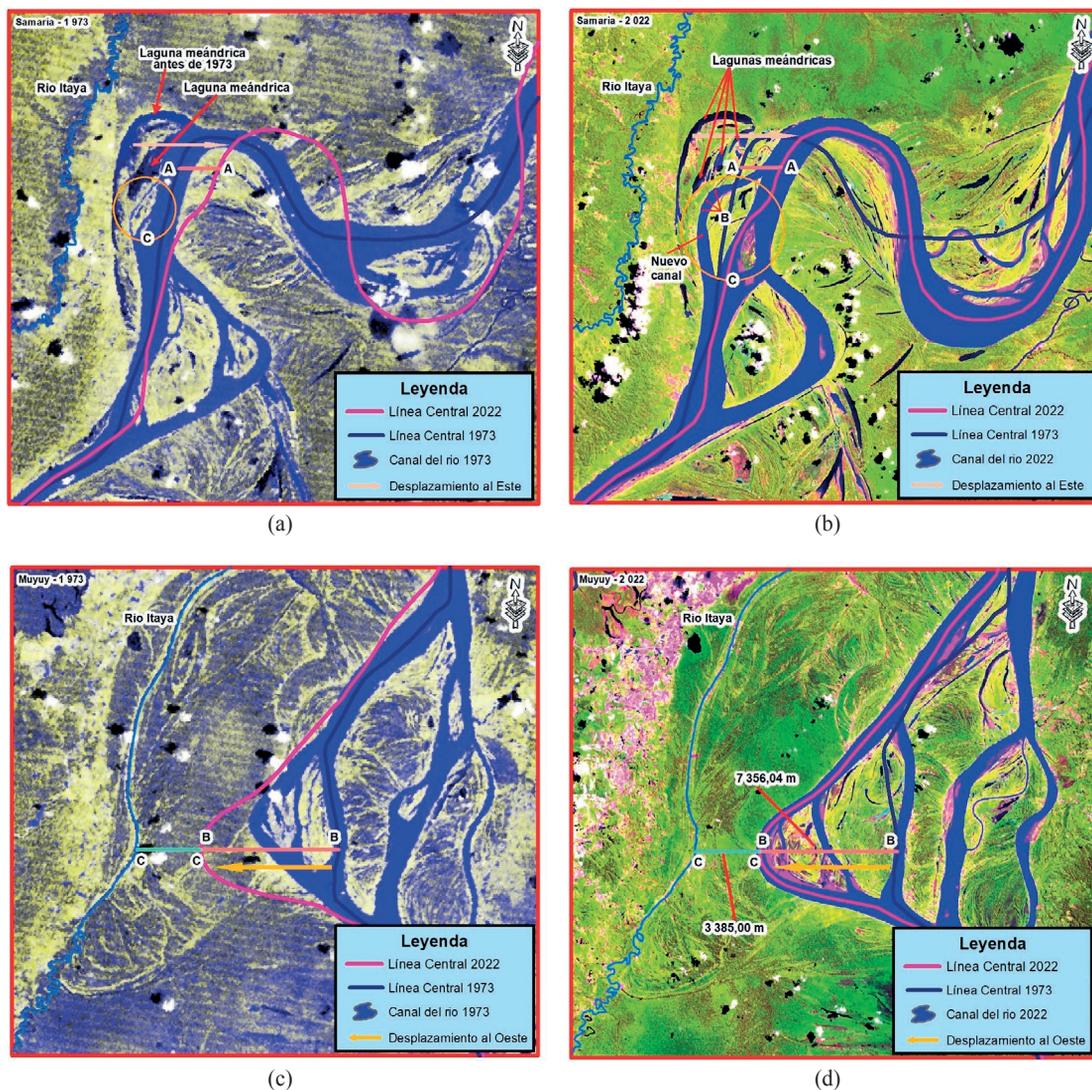


Figura 5. Riesgo de avulsión o incursión del río Amazonas (cuena media) sobre la cuena baja del río Itaya (Amazonia peruana).

utilizando la media estadística sobre el valor del desplazamiento de este canal en los 49 años de análisis, nos muestra una media de 150,1 m anuales, valor que al extrapolar al cálculo del tiempo que tardaría en erosionar el área que se interpone entre el Amazonas y el Itaya arroja una media aproximada de 22,6 años. Es probable que en este sector el Amazonas incursione en el Itaya pues la forma rectilínea de este último admite la conjetura de que el río Amazonas ha avulsionado o tomado al Itaya como un canal secundario en algún momento de la historia, presunción que se fundamenta,

además, en la gran heterogeneidad del paisaje geomorfológico de las llanuras aluviales en las que se destacan los cauces de ríos abandonados (Salo *et al.*, 1986; Ruokolainen *et al.*, 2019), así como en la gran variabilidad del desplazamiento lateral del río Amazonas en la zona de “Iquitos” (García y Bernex, 1994) y en la zona de “Muyuy” (García y Lee, 2022). Es posible que la incursión o avulsión del Amazonas en el Itaya no cause mayores efectos que aquellos provocados por la creciente del 2012 pues entre creciente y vaciante hay una diferencia de niveles que es mayor en el

Itaya (Paredes *et al.*, 1998), aun cuando el Modelo Digital de Elevaciones muestra que ambos canales se encuentran a la misma altitud sobre el nivel del mar.

4. Conclusiones

Los procesos de erosión, sedimentación y movimiento lateral son naturales y en los grandes ríos como el Amazonas constituyen escenarios donde se despliegan acciones destructivas (erosión) y constructivas (deposición). En el caso del primero son perjudiciales para el ribereño y el normal desarrollo de sus actividades, en tanto que la deposición genera nuevas áreas donde se establece la vegetación ribereña y son apropiadas para el desarrollo de actividades agrícolas. En este contexto las entidades comprometidas con la prevención de los desastres naturales deben desarrollar actividades dirigidas a la formulación de alertas tempranas y difusión de cartografía señalando las áreas potencialmente erosionables.

La avulsión o incursión del río Amazonas sobre el río Itaya en el sector “Muyuy” es un peligro latente; en tal sentido las entidades respectivas deben formular planes de evaluación, predicción, mitigación y adaptación en el caso de que tal evento ocurriera.

Finalmente, la gestión exitosa de las áreas ribereñas, que presumen escenarios peligrosos debido a la dinámica fluvial y a los efectos del cambio climático sobre la geomorfología del canal, debería incluir el monitoreo sistemático de tales espacios con el uso de herramientas de teledetección y SIG; estas pueden contribuir con información derivada del modelado de escenarios y predicción de riesgos (HEC-RAS, IBER y CCHE2D-Flow) que podrían ser una base sólida para diseñar, formular e implementar planes de intervención exitosos; sin embargo, la adopción de estos instrumentos como parte integral de los procesos de generación de información para la toma de decisiones es hasta ahora un desafío gigantesco.

5. Referencias

ALOS-PALSAR. 2011. Dataset: ASF DAAC 2015, ALOSPALSAR Radiometric Terrain Corrected - High res; Includes Material © JAXA/METI 2007. Accessed 13 Julio 2022. <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>

Ardila, J.F., Quintero, O.Y. 2013. Aplicación de la teledetección y los sistemas de información geográfica en la interpretación de zonas inundables. Caso de estudio: río Soapaga, sector Paz de río, Boyacá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(2), 55-76. <https://doi.org/10.18359/rcin.223>

Campbell, J.B., Wynne, R.H. Thomas, V.A. 2023. Introduction to Remote Sensing. 6th. Edition. New York. The Guilford Press.

Camporeale, C., Perucca, E., Ridolfi, L., Gurnell, A.M. 2013. Modeling the interactions between river morphodynamics and riparian vegetation. *Reviews of Geophysics*. 51(3), 379-414. <https://doi.org/10.1002/rog.20014>

Castro, W. 2012. Micro Zonificación Ecológica Económica para el Desarrollo Sostenible de la Carretera Iquitos-Nauta. Geología. Documento Temático. Iquitos-Perú. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana.

Chuvieco, E. 2016. Fundamentals of satellite remote sensing. An environmental approach. 2nd. Edition. New York. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19478>

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

Correa, V.E., Del Castillo, D., Inga, H., Paredes, E.J., Pinedo, M.H., Freitas, L. 2019. *Agroforestería familiar inundable y procesos de adaptación al medio ambiente en Loreto*. Iquitos. Perú. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana.

Del Castillo, D., Otárola, E., Freitas, L. 2006. *Aguaje. La maravillosa palmera de la Amazonia*. Iquitos. Perú. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana.

Dunne, T., Mertes, L.A.K., Meade, R.H., Richey, J.E., Forsberg, B.R. 1998. Exchanges of sediment between the flood plain and channel of the Amazon River in Brazil. *GSA Bulletin*, 110(4), 450-467. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1998\)110<0450:EOSBTF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<0450:EOSBTF>2.3.CO;2)

Encarnación, F., Aquino, R., Puertas, P., Ique, C. 1995. Flora y Vegetación de la Isla Muyuy, río Amazonas II. *Theorema*. 4(6), 61-63.

Encarnación, F., Kalliola, R., Rodríguez, F. 2004. *Diversidad de vegetación de la Amazonia peruana expresada en un mosaico de imágenes de satélite*. Iquitos-Perú. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana.

- García, J., Bernex, N. 1994. *El río que se aleja: cambio del curso del Amazonas, estudio histórico-técnico*. Iquitos-Perú. Centro de Estudios Teológicos de la Amazonia (CETA) - Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP).
- García-Angulo, K., Lee, K.T. 2022. Detecting the Planform Changes Due to the Seasonal Flow Fluctuation and 2012 Severe Flood in the Amazon River near Iquitos City, Peru Based on Remote Sensing Image Analysis. *Water*, 14(3) 509. <https://doi.org/10.3390/w14030509>
- Goodchild, M.F. 2001. Metrics of scale in remote sensing and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(2), 114-120. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85002-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85002-9)
- Guyot, J.L., Bazan, H., Fraizy, P., Ordonez, J.L. Armijos, L., Laraque, A. 2007. Suspended sediment yields in the Amazon basin of Peru: a first estimation. En: *Proceedings of Symposium Water Quality and Sediment Behaviour of the Future: Predictions for the 21st Century, Perugia, July 2007, IAHS Publ. 314*, 3-10.
- Harrison, L.R., Pike, A., Boughton, D.A. 2017. Coupled geomorphic and habitat response to a flood pulse revealed by remote sensing. *Ecohydrology* 10(5), e1845. <https://doi.org/10.1002/eco.1845>.
- Hupp, C.R., Osterkamp, W.R. 1996. Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology* 14, 277-295. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00042-4](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00042-4)
- Hupp, C.R., Osterkamp, W.R. 2013. Vegetation Ecogeomorphology, Dynamic Equilibrium, and Disturbance. En Shroder, J.F. (Ed). *Treatise on Geomorphology*, 12, 94-106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00324-9>
- INGEMMET. 2016. Mapa Geológico del Perú 1:100000. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú. Disponible en https://geocatminapp.ingemmet.gob.pe/complementos/descargas/DGR-GeologiaIntegrada_100k.zip. Acceso: 21/12/2022
- Kalliola, R., Salo, J., Puhakka, M., Rajasilta, M., Häme, T., Neller, R. J; Räsänen, M.E., Danjoy, W.A. 1992. Upper Amazon Channel Migration. *Naturwissenschaften* 79, 75-79. <https://doi.org/10.1007/BF01131806>
- Kalliola, R., Jokinen, P; Tuuki, E. 1999. Fluvial Dynamics and Sustainable Development in Upper río Amazonas, Peru. En: Padoch, C., Ayres, J.M., Pinedo-Vasquez, M., Henderson, A. (Eds). *Varzea: diversity, development, and conservation of Amazonia's whitewater floodplains. Advances in economic botany*, 13, 271-282.
- Latrubesse, E.M. 2008. Patterns of anabranching channels- The ultimate end-member adjustment of mega rivers. *Geomorphology*, 101, 130-145. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.035>
- Legg, N.T., Heimbürg, C., Collins, B.D., Olson, P.L. 2014. The Channel Migration Toolbox. ArcGIS® Tools for Measuring Stream Channel Migration. Washington State Department of Ecology. Disponible en <https://apps.ecology.wa.gov/publications/-SummaryPages/1406032.html>. Acceso: 02/11/2022.
- Lehotský, M., Rusnák, M., Kidová, A. 2017. Application of Remote Sensing and the GIS in Interpretation of River Geomorphic Response to Floods. En: Radecki-Pawlik, A., Pagliara, S.; Hradecký, J. (Eds). *Open Channel Hydraulics, River Hydraulic Structures and Fluvial Geomorphology. For Engineers, Geomorphologists and Physical Geographers*. Florida. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315120584-20>
- Lencinas, J.D., Siebert, A. 2009. Relevamiento de bosques con información satelital. Resolución espacial y escala. *Quebracho*. 17(1,2) 101-105. Disponible en <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/v17a11.pdf>. Acceso: 11/11/2022
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J. 2015. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7th Edition. USA. Wiley.
- Paredes, G., Kauffman, S., Kalliola, R. 1998. Suelos Aluviales Recientes de la Zona Iquitos-Nauta. En: Kalliola, R., Flores, S. (Eds). *Geoecología y Desarrollo Amazónico. Estudio Integrado en la Zona de Iquitos, Perú*. Finlandia. Universidad de Turku.
- Passos, M., Soares, E.A. 2017. Análise multitemporal do sistema fluvial Solimões-Amazonas entre os tributários Purus e Negro, Amazônia Ocidental, Brasil. *Geologia USP. Serie Científica*. 17(1), 61-74. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v17-324>
- Pinedo-Vasquez, M., Barletti, J., Del Castillo, D., Coffey, K. 2002. A tradition of change: the dynamic relationship between biodiversity and society in sector Muyuy, Peru. *Environmental Science y Policy*, 5, 43-53. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(02\)00023-0](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(02)00023-0)
- Räsänen, M., Irion, G., Rebata, L., Vargas, R., Wesselingh, F. 1998. Geología y geformas de la zona de Iquitos. En: Kalliola, R., Flores, S. (Eds). *Geoecología y Desarrollo Amazónico. Estudio Integrado en la Zona de Iquitos Perú*. Perú. Finlandia. Universidad de Turku.

- Ríos, M., Camacho, E. 2016. La agrobiodiversidad en várzea y su función económica en la Amazonía Peruana. *Scientia Agropecuaria*, 7(4), 377-389. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.04.03>
- Ruokolainen, K., Moulatlet, G. M., Zuquim, G., Hoorn, C., Tuomisto, H. 2019. Geologically recent rearrangements in central Amazonian river network and their importance for the riverine barrier hypothesis. *Frontiers of Biogeography*, 11(3). <https://doi.org/10.21425/F5FBG45046>
- Saikia, M., Mahanta, R. 2023. Riverbank Erosion and vulnerability – A study on the char dwellers of Assam, India. *Natural Hazard Research*. In Press, Journal Pre-proof. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.10.007>
- Salo, J., Kalliola, R., Häkkinen I., Mäkinen, Y., Niemelä, P., Puhakka, M., Coley, P.D. 1986. River Dynamics and the Diversity of Amazon Lowland Forest. *Nature* 22, 254-258. <https://doi.org/10.1038/322254a0>
- Santos, L.M. 2005. Nutritional and ecological aspects of buriti or aguaje (*Mauritia flexuosa* Linnaeus filius): A carotene-rich palm fruit from Latin America. *Ecology of Food and Nutrition*, 44, 345-358. <https://doi.org/10.1080/03670240500253369>
- SENAMHI. 2016. Proyecciones de Máxima Creciente de los ríos Amazonas, Marañón, Ucayali y Huallaga. Informe Técnico Nro. 11. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Disponible en <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/2036>. Acceso: 07/09/2022
- Zárate, R. 2009. Mapa Preliminar de Vegetación. En: Memoria Institucional. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. Informe Técnico Avances de la Zonificación Ecológica y Económica para el Ordenamiento Territorial del Departamento de Loreto. Proyecto Zonificación Ecológica y Económica del Departamento de Loreto Programa de Investigación en Cambio Climático, Desarrollo Territorial y Ambiental – PROTERRA.