

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**PATRONES DE CAMBIO MORFOLOGICO Y MEANDRICO DE 13  
RÍOS PERTENECIENTES A LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL  
AMAZONAS**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

**Efrain Eduardo Olivares Ramos**

**ASESOR: Ronald Gutiérrez Llantoy**

Lima, Noviembre de 2016



## **RESUMEN**

El presente trabajo de investigación estudia, identifica y analiza los patrones de cambio morfológico y meándrico de 13 ríos ubicados en la Región Hidrográfica del Amazonas en el rango de años comprendido entre 1987 y 2011 mediante la aplicación del modelo multitemporal de comparación de imágenes satelitales y de herramientas informáticas proporcionada por los sistemas de información geográfica (SIG). Con ello, se busca obtener los ratios de migración y la tendencia que siguen estos ríos amazónicos y expresarla en función de fórmulas empíricas. Además, se destaca la importancia de los estudios de fluviomorfología para el desarrollo del país.

La zona de estudio escogida se encuentra ubicada dentro de la Selva Amazónica, en la denominada Región Hidrográfica del Amazonas que involucra, principalmente, al departamento de Loreto (Perú). Aquí es donde se delimitan los 13 ríos que han sido analizados. Estos se caracterizan por carecer de estabilidad y desplazarse continuamente, un fenómeno que representa un peligro inminente para las obras civiles ubicadas ya sea sobre el lecho fluvial como en su zona de inundación. Como consecuencia, los ingenieros deben tener en cuenta el comportamiento de un río e identificar sus características morfodinámicas para poder diseñar este tipo de construcciones.

Con el fin de determinar los patrones de cambio fluviomorfológico y meándrico se procedió a aplicar la metodología del análisis multitemporal, el cual se basa en digitalizar imágenes satelitales adecuadamente recopiladas de acuerdo al rango de años de estudio preestablecido y, utilizando el software SIG, obtener los ratios de migración de los ríos seleccionados. De esta manera, se obtiene un patrón de tendencia de comportamiento que pueda aplicarse a toda la zona de estudio y se la compara con otras investigaciones similares. Además, se describen las propiedades geométricas de los ríos y se analizan las interrelaciones entre los distintos parámetros, tales como ancho de río, longitud de meandro, entre otros..

Con los resultados obtenidos, se comprobó que el comportamiento de los ríos meándricos guarda una tendencia global que se diferencia según las propiedades geométricas y el ecosistema al cual pertenecen. Finalmente, se destacó la importancia de estos estudios de fluviomorfología para el desarrollo del país.

## **ABSTRACT**

*Because of its large biological diversity (biodiversity) areas, the Peruvian jungle constitutes one of the most important region in Peru. Most Peruvian rivers from Peruvian Amazon region are from fluvial origin with dynamic characteristics which changes with the time and constitute a constant challenge for local and regional authorities as well the consultant and contractor companies.*

*The research is conducted to identify and analyzes patterns of change morphological and meandering of rivers in the Hydrographic Region of the Amazon located in the Peruvian land. The range of studied years is between 1987 and 2011 and it is limited only to thirteen selected rivers. The applied methodology on this research is a model of multi-temporal comparative analysis.*

*The studied area for this research is located in the Department of Loreto, Peruvian jungle. Most of the studied rivers are alluvial, with river bed and dynamic banks made up of mobile sediment and/or soil. These rivers are shaped by magnitude and frequency of the flow or by their ability of erode, deposit and transport sediment. This phenomenon represents a challenge to public works nearby river bed and/or its immediate vicinity, top of bank. Therefore, it is recommended that the engineer must take in account the unstable behavior of alluvial rivers and identify their morphodynamics features prior start the engineering design.*

*To accomplish the research goal, to find pattern of change fluvial-morphology and meandering of the selected Peruvian rivers, the applied methodology consisted on scanning the satellite images from determined years, then using GIS software, obtain migration ratios and trend of the studied rivers. In addition, the research with multi-temporal analysis developed a database of the geometric properties of rivers, their interrelationships among others parameters and finally empirical equations were developed based on those findings.*

*This research concludes that the meandering rivers' behavior have a trend related to their geometric properties and their ecosystem. Finally, it comes down to highlight the importance of studies fluvial morphology for the country's development, which not only include studies involving the problems of river crossings but also the impact that immigration implies.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor, Dr. Ronald Gutiérrez, por su confianza, dedicación, orientación y constante apoyo a lo largo del proceso de elaboración de la presente tesis ya que, sin ellos, no hubiese sido posible encaminar el proyecto de la forma esperada. Asimismo, agradezco a los profesores de la carrera de Ingeniería Civil por su guía y motivación en el transcurso de la misma.

En segundo lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento hacia mis padres, Efrain Olivares y Vicky Ramos, por el apoyo y la confianza depositada en mí desde el primer día para poder llegar a donde estoy ahora; a mi hermana, Karina Olivares, quien siempre ha sido un soporte para mí en todo momento; a mis abuelitos, por sus consejos y guía cotidiana; a mi tía Sonia Ramos, por sus consejos profesionales y apoyo a pesar de la distancia que nos separa; a toda mi familia por las palabras de aliento y estar a mi lado siempre y a mis amigos con quienes he compartido largos y grandes momentos de esta gran carrera en la Universidad.





## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABLAS .....	xi
RESUMEN .....	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
1.1. ANTECEDENTES .....	3
1.2. RÍOS A ANALIZAR.....	4
1.3. MORFOLOGÍA DE LOS RÍOS.....	5
1.3.1. Perfil Longitudinal de cauces de la llanura Amazónica .....	6
1.3.2. Sección Transversal de un río.....	7
1.3.3. Propiedades Morfológicas de los Ríos .....	7
1.3.4. Clasificación de los ríos .....	10
1.3.5. Ríos Meándricos.....	14
1.4. APLICACIONES POTENCIALES PARA CUANTIFICAR LA MIGRACIÓN DE RÍOS .....	25
1.4.1. Obras civiles .....	25
1.4.2. Restauración de ríos.....	25
1.4.3. Construcción de ciudades y centros poblados.....	26
1.5. CAMBIOS INDUCIDOS POR LA DINÁMICA NATURAL DE LOS RÍOS .....	26
1.5.1. En Centros Poblados .....	26
A lo largo de la extensa Amazonia Peruana, muchos centros poblados se han visto afectados por la dinámica natural de los ríos a lo largo de su curso. Un caso muy especial es la ciudad de Iquitos. Desde la época de la Conquista se han registrado escritos pertenecientes a Darío Uriarte que indican que los ríos Amazónicos, como Amazonas, Nanay y Marañón. En ellos indica que se inundan zonas costeras e, inclusive, a lo largo de su caminata se forman brazos de meandro. En la actualidad, existe un riesgo de erosión en el norte de la ciudad y molestia de la comunicación fluvial en el sur. En el este y oeste se ven pocos cambios en el paisaje en los últimos años y presencia de varios frentes de deposición y de erosión. (El Rio que se Aleja, 1994).....	26
1.5.2. En Infraestructura .....	26
<b>CAPÍTULO 2: DATOS Y MÉTODO .....</b>	<b>27</b>
2.1. METODOLOGÍA DE PREDICCIÓN .....	27
2.1.1. Análisis Multitemporal .....	27
2.1.2. <i>Planform Statics Tools</i> .....	29

2.2. CARACTERÍSTICAS FLUVIOMORFOLÓGICAS PRINCIPALES .....	29
2.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS RÍOS Y SU CUENCA .....	29
2.2.3. Río Corrientes.....	33
2.2.4. Río Curaray .....	34
2.2.5. Río Jangosa.....	35
2.2.7. Río Maniti.....	37
2.2.8. Río Mazán.....	39
2.2.9. Río Morona .....	40
2.2.10. Río Nanay .....	41
2.2.11. Río Tambo Yacu.....	42
2.2.13. Río Tigre .....	44
2.2.14. Río Yanu – Apaga .....	45
<b>CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>49</b>
3.1. Migración de Ríos.....	49
3.1.1. Migración Promedio del río Chambira.....	60
3.1.2. Migración Promedio del río Corrientes .....	61
3.1.3. Migración Promedio del río Curaray.....	62
3.1.4. Migración Promedio del río Jangosa.....	63
3.1.5. Migración Promedio del río Javari Mirim .....	64
3.1.6. Migración Promedio del río Maniti.....	65
3.1.7. Migración Promedio del río Mazán .....	66
3.1.8. Migración Promedio del río Morona .....	67
3.1.9. Migración Promedio del río Nanay .....	68
3.1.10. Migración Promedio del río Tambo Yacu.....	69
3.1.11. Migración Promedio del río Tamshiyacu .....	70
3.1.12. Migración Promedio del río Tigre .....	71
3.1.13. Migración Promedio del río Yanu-Apaga.....	72
3.2. Discusión de Resultados.....	73
<b>CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>84</b>
BIBLIOGRAFÍA.....	88

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1	Mapa con los tramos de ríos analizados.....	14
Figura 1.2	Perfil longitudinal de un río Amazónico típico.....	17
Figura 1.3	Descripción de un río ( <i>Thalweg</i> ).....	18
Figura 1.4	Representación de la geometría del valle de un río.....	18
Figura 1.5	Representación esquemática de la sinuosidad y sus grados.....	19
Figura 1.6	Geometría de un río según su sinuosidad.....	20
Figura 1.7	Esquema de clasificación de ríos según su edad.....	22
Figura 1.8	Morfología y clasificación de cauces aluviales con relación a la carga de sedimentos.....	23
Figura 1.9	Criterio de Leopold y Wolman para la clasificación de ríos.....	24
Figura 1.10	Erosión y sedimentación de un meandro.....	25
Figura 1.11	Clasificación de meandros según Brice.....	26
Figura 1.12	Geometría de un meandro.....	28
Figura 1.13	Evolución de un meandro (según NEDECO).....	28
Figura 1.14	Cortes de Meandro – Río Tigre.....	29
Figura 1.15	Modelo de migración de meandros.....	32
Figura 2.1	Mapa Geológico del Perú (INGEMMET).....	41
Figura 2.2	Sinuosidades de ríos de la Región Hidrográfica del Amazonas.....	58
Figura 3.1	Evolución del Río Chambira entre los años 1987 y 2009.....	59
Figura 3.2	Evolución del Río Corrientes entre los años 1988 y 2011.....	59
Figura 3.3	Evolución del Río Curaray entre los años 1989 y 2011.....	60
Figura 3.4	Evolución del Río Jangosa entre los años 1990 y 2010.....	60
Figura 3.5	Evolución del Río Javari Mirim entre los años 1987 y 2009.....	61
Figura 3.6	Evolución del Río Maniti entre los años 1987 y 2009.....	61
Figura 3.7	Evolución del Río Mazán entre los años 1988 y 2010.....	62
Figura 3.8	Evolución del Río Morona entre los años 1987 y 2010.....	62
Figura 3.9	Evolución del Río Nanay entre los años 1987 y 2009.....	63
Figura 3.10	Evolución del Río Tambo Yacu entre los años 1988 y 2010.....	63
Figura 3.11	Evolución del Río Tamshiyacu entre los años 1987 y 2009.....	64
Figura 3.12	Evolución del Río Tigre entre los años 1988 y 2011.....	64
Figura 3.13	Evolución del Río Yanu-Apaga entre los años 1987 y 2009.....	65
Figura 3.14	Migración del río Chambira entre los años 1987 y 2001.....	65
Figura 3.15	Migración del río Chambira entre los años 2001 y 2009.....	65
Figura 3.16	Migración del río Corrientes entre los años 1988 y 1999.....	66

Figura 3.17	Migración del río Corrientes entre los años 1999 y 2011.....	66
Figura 3.18	Migración del río Curaray entre los años 1989 y 2000.....	66
Figura 3.19	Migración del río Curaray entre los años 2000 y 2011.....	66
Figura 3.20	Migración del río Jangosa entre los años 1990 y 2000.....	66
Figura 3.21	Migración del río Jangosa entre los años 2000 y 2010.....	66
Figura 3.22	Migración del río Javari Mirim entre los años 1987 y 2001.....	67
Figura 3.23	Migración del río Javari Mirim entre los años 2001 y 2009.....	67
Figura 3.24	Migración del río Maniti entre los años 1987 y 2001.....	67
Figura 3.25	Migración del río Maniti entre los años 2001 y 2009.....	67
Figura 3.26	Migración del río Mazán entre los años 1988 y 2000.....	67
Figura 3.27	Migración del río Mazán entre los años 2000 y 2010.....	67
Figura 3.28	Migración del río Morona entre los años 1987 y 1999.....	68
Figura 3.29	Migración del río Morona entre los años 1999 y 2010.....	68
Figura 3.30	Migración del río Nanay entre los años 1987 y 2001.....	68
Figura 3.31	Migración del río Nanay entre los años 2001 y 2009.....	68
Figura 3.32	Migración del río Tambo Yacu entre los años 1988 y 2000.....	68
Figura 3.33	Migración del río Tambo Yacu entre los años 2000 y 2010.....	68
Figura 3.34	Migración del río Tamshiyacu entre los años 1987 y 2001.....	69
Figura 3.35	Migración del río Tamshiyacu entre los años 2001 y 2009.....	69
Figura 3.36	Migración del río Tigre entre los años 1988 y 1999.....	69
Figura 3.37	Migración del río Tigre entre los años 1999 y 2011.....	69
Figura 3.38	Migración del río Yanu Apaga entre los años 1987 y 1999.....	69
Figura 3.39	Migración del río Yanu Apaga entre los años 1999 y 2009.....	69
Figura 3.39	Tasa de Migración del río Chambira de 1987 al 2001.....	70
Figura 3.40	Tasa de Migración del río Chambira del 2001 al 2009.....	70
Figura 3.41	Tasa de Migración del río Corrientes de 1988 a 1999.....	71
Figura 3.42	Tasa de Migración del río Corrientes de 1999 a 2011.....	71
Figura 3.43	Tasa de Migración del río Curaray de 1989 al 2000.....	72
Figura 3.44	Tasa de Migración del río Curaray del 2000 al 2011.....	72
Figura 3.45	Tasa de Migración del río Jangosa de 1990 al 2000.....	73
Figura 3.46	Tasa de Migración del río Jangosa del 2000 al 2010.....	73
Figura 3.47	Tasa de Migración del río Javari Mirim de 1987 al 2001.....	74
Figura 3.48	Tasa de Migración del río Javari Mirim del 2001 al 2009.....	74

Figura 3.49	Tasa de Migración del río Maniti de 1987 al 2001.....	75
Figura 3.50	Tasa de Migración del río Maniti del 2001 al 2009.....	75
Figura 3.51	Tasa de Migración del río Mazán de 1988 al 2000.....	76
Figura 3.52	Tasa de Migración del río Mazán del 2000 al 2010.....	76
Figura 3.53	Tasa de Migración del río Morona de 1987 a 1999.....	77
Figura 3.54	Tasa de Migración del río Morona de 1999 al 2010.....	77
Figura 3.55	Tasa de Migración del río Nanay de 1987 al 2001.....	78
Figura 3.56	Tasa de Migración del río Nanay del 2001 al 2009.....	78
Figura 3.57	Tasa de Migración del río Tambo Yacu de 1988 al 2000.....	79
Figura 3.58	Tasa de Migración del río Tambo Yacu del 2000 al 2010.....	79
Figura 3.59	Tasa de Migración del río Tamshiyacu de 1987 al 2001.....	80
Figura 3.60	Tasa de Migración del río Tamshiyacu del 2001 al 2009.....	80
Figura 3.61	Tasa de Migración del río Tigre de 1988 a 1999.....	81
Figura 3.62	Tasa de Migración del río Tigre de 1999 al 2011.....	81
Figura 3.63	Tasa de Migración del río Yanu Apaga de 1987 a 1999.....	82
Figura 3.64	Tasa de Migración del río Yanu Apaga de 1999 al 2009.....	82
Figura 3.65	Migración vs Radio de Curvatura en función del ancho de cauce.....	83
Figura 3.66	Comportamiento de la relación entre $L_m$ y $B - 1$ .....	84
Figura 3.67	Comportamiento de la relación entre $L_m$ y $B - 2$ .....	85
Figura 2.68	Sinuosidades de los ríos.....	86
Figura 3.69	Sinuosidades vs Pendientes.....	87
Figura 3.70	Gráfico $M$ vs $RC$ en función del ancho de cauce.....	90
Figura 3.71	Gráfico Migración en función del ancho de cauce vs Radio de Curvatura en función del ancho de cauce.....	90



## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1.1	Listado de ríos a analizar.....	15
Tabla 1.2	Clasificación de los ríos según cauce y sinuosidad.....	20
Tabla 1.3	Velocidades críticas del agua para materiales no cohesivos (m/s).....	32
Tabla 1.4	Velocidades críticas del agua para materiales cohesivos (m/s).....	33
Tabla 1.5	Bandas Espectrales.....	34
Tabla 1.6	Combinación de bandas espectrales.....	35
Tabla 2.1	Cálculo de la sinuosidad – Río Chambira.....	42
Tabla 2.2	Cálculo de la sinuosidad – Río Corrientes.....	44
Tabla 2.3	Cálculo de la sinuosidad – Río Curaray.....	45
Tabla 2.4	Cálculo de la sinuosidad – Río Jangosa.....	46
Tabla 2.5	Cálculo de la sinuosidad – Río Javari Mirim.....	47
Tabla 2.6	Cálculo de la sinuosidad – Río Maniti.....	48
Tabla 2.7	Cálculo de la sinuosidad – Río Mazán.....	49
Tabla 2.8	Cálculo de la sinuosidad – Río Morona.....	51
Tabla 2.9	Cálculo de la sinuosidad – Río Nanay.....	52
Tabla 2.10	Cálculo de la sinuosidad – Tambo Yacu.....	53
Tabla 2.11	Cálculo de la sinuosidad – Río Tamshiyacu.....	54
Tabla 2.12	Cálculo de la sinuosidad – Río Tigre.....	55
Tabla 2.13	Cálculo de la sinuosidad – Río Yanu-Apaga.....	57
Tabla 2.14	Valores promedio de los parámetros geométricos de los 13 ríos analizados.....	57
Tabla 3.1	Descripción de los años de análisis de cada río.....	83
Tabla 3.2	Características fluviomorfológicas de los ríos.....	84
Tabla 3.3	Curvatura Promedio de los 13 ríos.....	87
Tabla 3.4	Comparativo Radio de Curvatura y Tasa de Migración.....	88
Tabla 3.5	Resumen de Tasa de Migración de ríos analizados.....	89
Tabla 3.6	Propiedades Geométricas según diversos criterios.....	92
Tabla 3.7	Número de Meandros de cada tramo de río.....	93
Tabla 3.8	Número de cortes de Meandro por cada tramo de río.....	93



## INTRODUCCIÓN

La presente tesis se ha realizado con el principal objetivo de poder registrar los cambios fluviomorfológicos de 13 ríos localizados en la Amazonía del Perú y entender la importancia de los ríos meándricos para construcciones existentes o futuras (como obras civiles).

En el capítulo I se describe el Marco Teórico del Proyecto de Investigación haciendo hincapié en los principales conceptos sobre los ríos meándricos, métodos de clasificación, propiedades morfológicas, sus propiedades geométricas, el uso de imágenes satelitales y las posibles aplicaciones del estudio realizado.

En el capítulo II se desarrolla la descripción de la Metodología y los Datos de los ríos a estudiar. La metodología de predicción desarrolla el análisis multitemporal basado en la utilización de imágenes satelitales, con la cual podemos obtener información estadística de los ríos para las zonas de estudios. Además, se muestran algunas características fluviomorfológicas de los ríos analizados para poder calificarlos como meándricos.

En el capítulo III se presenta el análisis multitemporal basado en el uso de imágenes satelitales en los 13 ríos, pues es el que nos permite obtener la información estadística para el análisis de migración de cada uno de ellos. Esta metodología detallada en las investigaciones realizadas por *Hickin* y *Nanson* (1992), plantearon formulaciones empíricas estudiando algunos ríos canadienses. Esta ecuación empírica permite estimar, de una manera aproximada, las tasas de migraciones, según parámetros locales de la zona de estudio. Además se discuten los resultados obtenidos.

En el capítulo IV, finalmente, se presentan las conclusiones y sugerencias que se encontró a lo largo del presente estudio y determinamos por qué es importante su aplicación, principalmente en nuestro país.

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	MÉTODO	JUSTIFICACIÓN
<p><b>Central</b> ¿Cómo han sido los cambios morfológicos y meándricos y cuál es la tendencia del curso de los ríos pertenecientes a la Región Hidrográfica del Amazonas a lo largo de los últimos 20 – 25 años?</p> <p><b>Específicos</b> 1. ¿Qué efectos en la población tienen dichos cambios? 2. ¿Cuáles son las posibles aplicaciones que podemos darle a la presente investigación? 3. ¿Los ríos estudiados siguen una misma tendencia en su comportamiento morfolodinámico que podremos extender a toda la zona de estudio? 4. ¿Qué propiedades geométricas y fluviomorfológicas han cambiado a lo largo de los años en los ríos pertenecientes a la Región Hidrográfica del Amazonas?</p>	<p><b>General</b> Desarrollar un análisis del comportamiento morfolodinámico de los ríos que pertenecen a la Región Hidrográfica del Amazonas, en lo que se refiere a la tasa de migración que han venido sufriendo en los últimos años y, además, los cambios en sus propiedades fluviomorfológicas y cómo afectarán estos en un futuro inmediato.</p> <p><b>Específicos</b> 1. Predecir el comportamiento fluviomorfológico de los ríos y evitar que las construcciones y obras civiles aleaños se vean afectadas por el cambio en el alineamiento de los mismos. 2. Obtener tasas de migración de todos los ríos seleccionados pertenecientes a la Cuenca Hidrográfica del Amazonas. 3. Aplicaremos software que permiten trabajar con imágenes digitales de los ríos y software de modelamiento de los programas para analizar las migraciones de los ríos en el rango de años previsto. 4. Difundir el uso del software relacionados a la migración de ríos.</p>	<p><b>General</b> La morfología de la cuenca del Amazonas es determinada por el relieve, el clima y la vegetación. Así mismo, la corriente construye un sinnúmero de ramificaciones en las crecidas y, después de la riada, tienen lugar modificaciones en algunos afluentes. En consecuencia, todos estos factores afectan el comportamiento del río, por el cual varían su alineamiento y sus propiedades fluviomorfológicas con el paso del tiempo.</p> <p><b>Específicos</b> 1. Los ríos sufren, a lo largo del tiempo, cambios tanto en su morfología como en su recorrido debido a, principalmente, los procesos de erosión y sedimentación. 2. Estos ratios de migración deben ser altos y cambiantes a lo largo de los años. 3. El software que aplicaremos serán muy útiles y novedosos para el estudio de este tipo de fenómenos que se dan en la naturaleza y poder cuantificarlos. 4. En la actualidad, es muy poco conocido el manejo y aplicación de los software propuestos dentro del ámbito académico.</p>	<p><b>Independiente:</b> Fisiografía de los ríos que pertenecen a la Región Hidrográfica del Amazonas</p> <p><b>Dependiente:</b> Cambios morfológicos y meándricos en los ríos (migración del alineamiento de los ríos).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud y ancho de los ríos.</li> <li>• Geología de la zona.</li> <li>• Precipitaciones.</li> <li>• Caudal</li> <li>• Pendientes</li> <li>• Sinuosidad de los ríos.</li> <li>• Ratios de migración de los ríos.</li> <li>• Variabilidad del curso de los ríos.</li> <li>• Clima</li> </ul>	<p><b>Perspectiva Metodológica</b> La investigación tendrá un enfoque mixto tanto cualitativo como cuantitativo.</p> <p><b>Tipo de Investigación</b> La investigación es correlacional exploratorio y descriptivo</p> <p><b>Diseño de Investigación</b> Este estudio se realizará en las siguientes etapas: Etapa cualitativa: Se hará estudio en base a imágenes satelitales obtenidas de fuentes internacionales de datos. De acuerdo a esto, analizaremos el comportamiento de los ríos entre los años 1987 y 2011 y, luego, los compararemos adecuadamente. Etapa cuantitativa: Se hará un estudio no experimental empleando la herramienta GIS adecuada para obtener las distancias de migración de cada río analizado. Luego, empleando los indicadores de las propiedades geométricas de los ríos (longitud, ancho, pendiente) obtendremos los ratios de migración a lo largo de los años estudiados y la tendencia de comportamiento morfolodinámico que siguen en esta zona de estudio</p> <p><b>Límites de la Investigación</b> Sólo se desarrollará el estudio en ríos pertenecientes a la Región Hidrográfica del Amazonas.</p> <p><b>Unidad de Análisis: Población y Muestra</b> La población de estudio son los cambios morfológicos y meándricos 13 ríos de la Región Hidrográfica del Amazonas y la muestra de estudio son dichos cambios en los años correspondientes en el rango de años que va desde 1987 a 2011.</p>	<p><b>Teórica</b> Los ríos pertenecientes a la Cuenca del Amazonas sufren cambios morfológicos y meándricos a lo largo de su curso que afectan, potencialmente, a las obras civiles que pasan o se encuentran cerca de ellos. Además, el presente estudio podrá ser utilizado como base de consulta para posteriores investigaciones acerca del tema.</p> <p><b>Práctico</b> Podrá ser utilizado para visualizar los cambios (mediciones) que se han producido en el alineamiento de los ríos y cómo afectará esto en un futuro inmediato. Además, se podrán implementar en diseños previos de construcciones futuras cercanas para que estas no se vean afectadas por la migración de los ríos y, así, la población tenga una mejor calidad de vida.</p>

## CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

### 1.1. ANTECEDENTES

En la actualidad, han sido muchos los investigadores que se han dedicado a estudiar el comportamiento de los ríos alrededor del mundo, debido a su importancia para los diferentes ecosistemas. En lo que se refiere al Perú, el río Amazonas es uno de los más importantes, dado su gran caudal y extensión en el territorio nacional y, por ese motivo, se han desarrollado estudios en torno a su relevancia. Es por ello que surgió el interés de realizar un tema tesis, denominado: “Patrones de Cambio Morfológico y Meándrico de 13 ríos pertenecientes a la Región Hidrográfica del Amazonas”.

Son muchos los investigadores que han hecho estudios sobre los cambios morfológicos que ha sufrido el río Amazonas a lo largo del tiempo. Por ejemplo, tenemos al investigador de la Universidad de *Pittsburg*, Jorge Abad, quien se ha dedicado a estudiar la morfología de los ríos y sus ratios de erosión y sedimentación, como podemos observar en su publicación: “*2d Stream hydrodynamic sediment transport and bed morphology model for engineering applications*” (Abad, 2008). Además, tenemos al Ing. Arturo Rocha, quien estudió la morfología fluvial con fines de aplicar sus conocimientos a obras que beneficien a la sociedad.

Por otro lado, gran cantidad de investigadores se ha valido de la tecnología para poder realizar sus estudios y plasmarlo en un texto científico. Dentro de este campo, son las imágenes satelitales las cuales son muy útiles para poder analizar una porción determinada de agua dentro del volumen de control que se quiere analizar. Existen muchas formas de llevar a cabo este proceso; sin embargo, la página web de la NASA brinda una manera simple y eficiente de poder captar dichas imágenes satelitales, trabajar con ellas y obtener los resultados que esperamos de nuestro estudio. Ello se logra con un software adecuado y con una metodología especificada. En la actualidad, el investigador Ingeniero Billy Solórzano ha propuesto un estudio de análisis de migración de ríos, sus causas y consecuencias en su tesis denominada: “Procesos fluviomorfológicos de relevancia en el río Tahuamanu en el ámbito del puente Tahuamanu”, donde aplica metodologías similares a las de la presente tesis y que permiten predecir el comportamiento de dicho río y obtener conclusiones valiosas a partir de ello.

De igual forma, otros investigadores se han dedicado al estudio de estos ríos con el fin de analizarlos con algún software que permitan predecir su comportamiento. Uno de ellos es el mismo J. Abad quien, junto al Ing. M. García, se han valido del software *RVRmeander* para analizar los ríos con el fin de obtener sus ratios de erosión y migración a lo largo de los años, como lo presentan en “*RVRmeander a toolbox for remeandering of channelized streams*” (Abad y Garcia, 2006).

Así también, se tiene al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico que ha realizado un estudio denominado “Variaciones Morfológicas del Río Amazonas y Susceptibilidad a Inundaciones en los alrededores de Iquitos” (INGENMET, 2012), en el cual hace uso de imágenes satelitales para concluir que el mencionado río sufre una erosión de 70 m/año y que, con el transcurrir de los años, las poblaciones cercanas serían afectadas por inundaciones o acercamiento del río a sus hogares.

## 1.2. RÍOS A ANALIZAR

Para el presente estudio, se ha considerado analizar 13 ríos representativos de la Amazonía Peruana. A continuación, se muestra el esquema de ubicación (Figura 1.1) y en la tabla 1.1 se hace alusión a algunas de sus características.

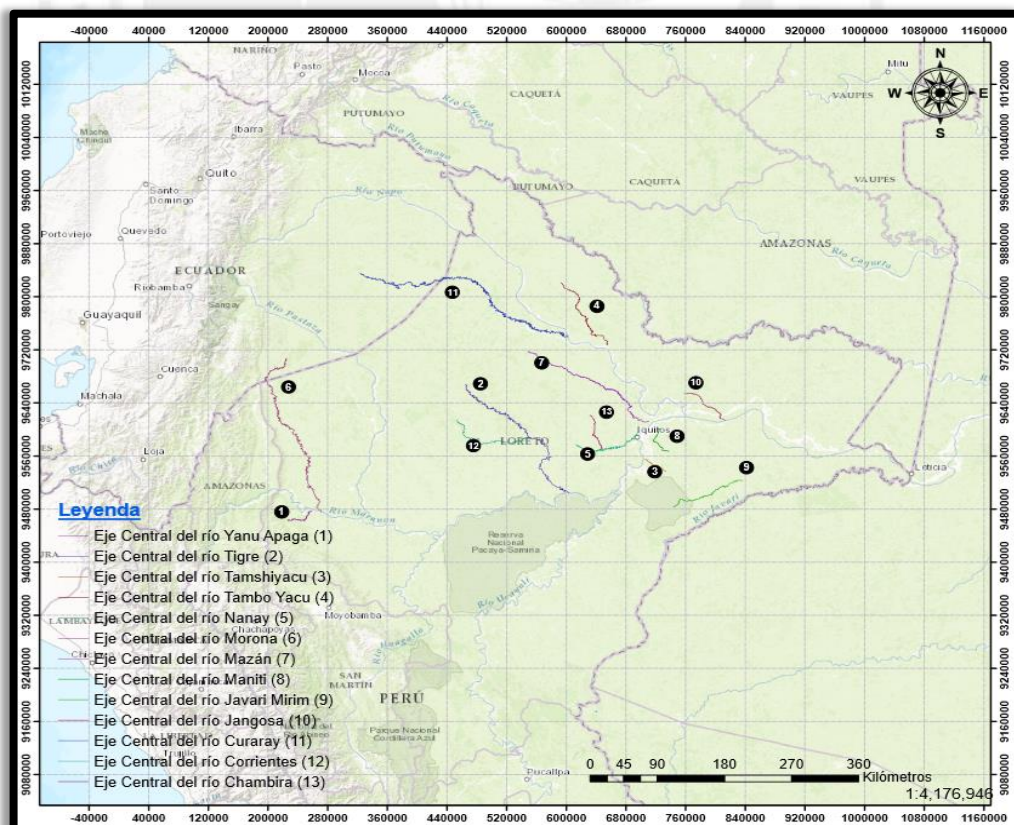


Figura 1.1: Mapa con los tramos de ríos de análisis



**Tabla 1.1:** Listado de ríos a analizar

Ítem	Nombre de Río	Ubicación	Longitud (km)	Longitud de análisis (km)	Coordenada UTM inicial Zona 18S	Coordenada UTM final Zona 18 S
1	Chambira	Loreto	230	130	632032.0 m E / 9621661.0 m S	648349.0 m E / 9569174.0 m S
2	Corrientes	Loreto	350	215	452872.0 m E / 9414026.0 m S	549236.0 m E / 9586538.0 m S
3	Curaray	Perú (Loreto) y Ecuador	800	760	322831.0 m E / 9834847.0 m S	600884.0 m E / 9738976.0 m S
4	Jangosa	Loreto	230	160	757870.0 m E / 9654794.0 m S	812714.0 m E / 9614036.0 m S
5	Javari Mirim	Loreto	300	215	743659.0 m E / 9482762.0 m S	170027.0 m E / 9522675.0 m S
6	Maniti	Loreto	250	115	726391.0 m E / 9600926 m S	737310.0 m E / 9566514.0 m S
7	Mazán	Loreto	600	470	548393 m E / 9717784.0 m S	711383.0 m E / 9613145.0 m S
8	Morona	Loreto y Ecuador	550	530	224566.4 m E / 9707343.4 m S	270900.8 m E / 9474982.9 m S
9	Nanay	Loreto	315	230	611512.0 m E / 9576541.0 m S	694728.0 m E / 9590667.0 m S
10	Tambo Yacu	Loreto	430	290	593046.0 m E / 9820948.0 m S	654832.0 m E / 9727148.0 m S
11	Tamshiyacu	Loreto	180	70	733624.0 m E / 9536757.0 m S	705881.0 m E / 9554449.0 m S
12	Tigre	Loreto	598	465	464310.0 m E / 9667083.0 m S	601748.0 m E / 9505332.0 m S
13	Yanu-Apaga	Loreto	155	95	225907.0 m E / 9463903 m S	258262.0 m E / 9477653.0 m S

En el Anexo B se muestra el Plano General de Ubicación de los ríos.

### 1.3. MORFOLOGÍA DE LOS RÍOS

La morfología de los ríos estudia la estructura, las formas fluviales y el mecanismo de desarrollo de los mismos, incluyendo la configuración del cauce en planta, la geometría de las secciones transversales, las características del perfil y la forma del fondo (Rocha Felices, 1998). Las formas que adoptan los ríos pueden originarse debido a su propio comportamiento o, por defecto, debido a acciones externas, principalmente humanas. Así, es posible inferir el comportamiento futuro del río.

La morfología de un determinado río no es constante a lo largo del tiempo. Entre las principales causas de su variación tenemos, por ejemplo, la cantidad de caudal que se presenta en épocas tanto de estiaje como de avenida, las características geológicas de la cuenca a la que pertenece el mismo, la cobertura vegetal, los ratios de erosión y sedimentación, entre otros. Para poder predecir con gran exactitud los cambios de la morfología fluvial es necesario tener conocimientos detallados de las características del material que conforma el relieve por donde

discurre el flujo, las características geométricas de la zona, el transporte de sedimentos del flujo, cómo es la influencia de factores externos como la cobertura vegetal (tamaño de las raíces, rugosidad, etc.) y, además, utilizar modelos matemáticos adecuados al objetivo propuesto. Las ecuaciones que gobiernan un flujo tridimensional son las ecuaciones de *Navier – Stokes*. La mayoría de software para predicción de morfología de ríos utilizan simplificaciones de este conjunto de ecuaciones, pues el costo computacional requerido para su procesamiento es alto y además se requiere información detallada que muchas veces no está disponible (Solórzano, 2011).

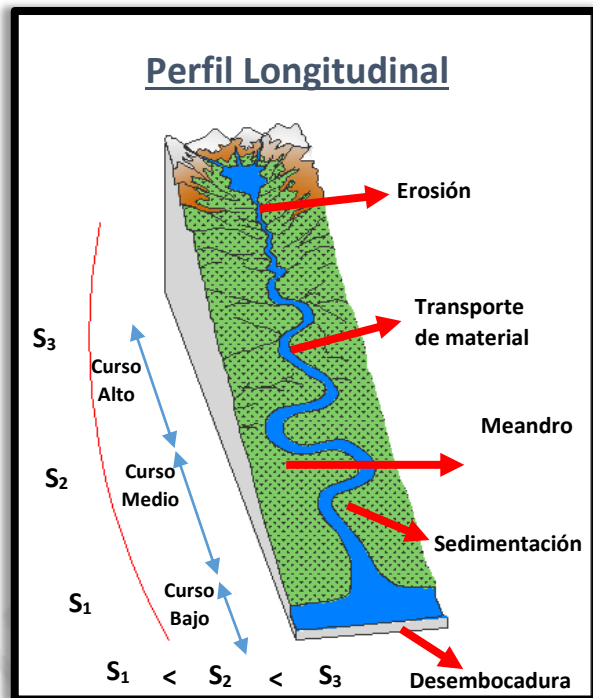
Los problemas relativos a la fluviomorfología constituyen un reto permanente para la ingeniería. Sin embargo, la comprensión de las variadas formas que adoptan los ríos es indispensable para el diseño de las diversas obras civiles que estén en contacto con uno o cerca de él. En los ríos, las márgenes son erosionables y cambiantes. En consecuencia, los ríos son muy dinámicos con el paso del tiempo y pueden alterar el paisaje de la zona en que se encuentran.

### **1.3.1. Perfil Longitudinal de cauces de la llanura Amazónica**

Los ríos seleccionados se encuentran en la llanura amazónica de la selva peruana. Por lo tanto, el eje hidráulico de los ríos de esta parte de la selva no es una línea recta. Su recorrido fluvial tiene una tendencia natural a la sinuosidad. Este fenómeno representa en el río el mínimo consumo de energía y que su pendiente varíe a lo largo de su recorrido. En consecuencia, a medida que el flujo avanza, su pendiente disminuye gradualmente, como se muestra en la Figura 1.2. Así, esta disminución significa la pérdida de capacidad de arrastre de partículas, pérdida de poder de erosión del cauce y disminución del tamaño de partículas que arrastra (Morales, 2009).

Con esta premisa, se puede deducir que en las partes altas de las cuencas, hay una gran capacidad de erosión y velocidades altas de partícula que permiten el arrastre de las más gruesas aguas abajo. En las zonas intermedias, las cuales cuentan con pendientes moderadas, se aprecia la disminución de velocidad y, por lo tanto, deposición de material grueso en el lecho fluvial. En las zonas bajas, donde la pendiente es suave, las velocidades son bajas, lo cual implica únicamente el transporte de material muy fino y la deposición de material pequeño. Esta es una característica saltante de las llanuras amazónicas. (Solórzano, 2011)





**Figura 1.2:** Perfil Longitudinal de un río Amazónico típico (elaboración propia, basado en Acosta, 2013)

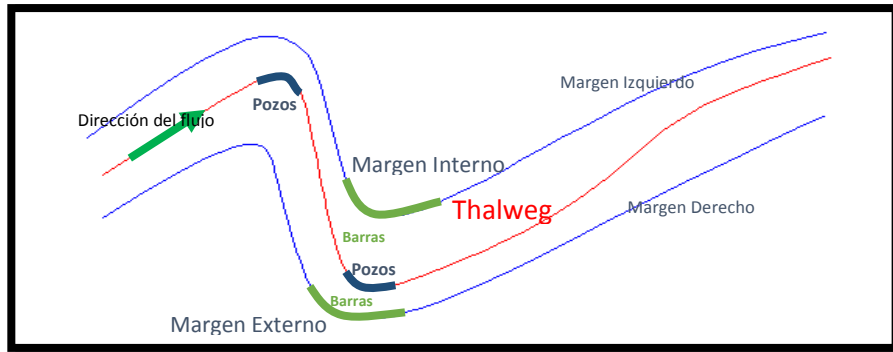
### 1.3.2. Sección Transversal de un río

Para un río, su sección transversal viene definida por la geometría que presenta en planta y las características de los sedimentos que conforman el lecho del cauce y los que son transportados por la corriente. En el caso de la sección transversal en una curva, en la margen externa del río se nota una mayor profundidad si la comparamos con la margen interna. En particular, para un río meándrico la sección transversal típica que presenta es de forma trapezoidal, en la parte curva, debido a su alta sinuosidad (Hickin y Nanson, 1983). Como se aprecia en la Figura 1.2, para los ríos de la Amazonía peruana tenemos 3 secciones transversales típicas.

### 1.3.3. Propiedades Morfológicas de los Ríos

#### 1.3.3.1. Thalweg

También denominado Vaguada o "camino del valle" (por su significado proveniente del alemán). En términos simples, es la línea imaginaria que une las máximas profundidades de la sección transversal de un río (Rocha, 2009) y donde el flujo posee mayor velocidad. En la figura 1.3 se puede observar que esta línea no es fija en el cauce del río ya que puede moverse de un margen a otro. El *thalweg* se presenta en todas las corrientes naturales.



**Figura 1.3:** Descripción de un río – Thalweg (elaboración propia)

### 1.3.3.2. Sinuosidad

La sinuosidad de un río es el grado de curvatura del plano que tiene un determinado curso del mismo. La sinuosidad es la relación entre la longitud del Thalweg y la longitud total del valle (Ecuación 1 y 2). El valor mínimo de la sinuosidad es 1, el cual corresponde a un río totalmente recto, mientras que el valor máximo está alrededor de 4 (Leopold y Wolman, 1960), Para calcular la sinuosidad, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$S_v = \frac{L_v}{L_{vR}} \quad \dots (1) \quad , \quad S_R = \left( \frac{L_R}{L_{vR}} \right) \times \frac{1}{S_v} \quad \dots (2)$$

En la figura 1.4 se indican los elementos de cada ecuación, donde:

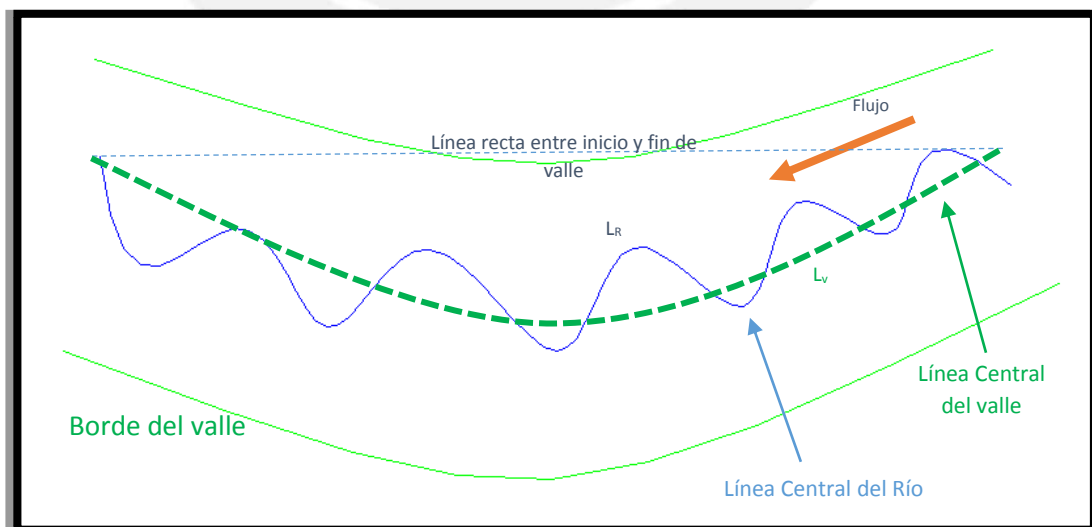
$S_v$ : Sinuosidad del valle

$S_R$ : Sinuosidad del río

$L_v$ : Longitud del eje del valle

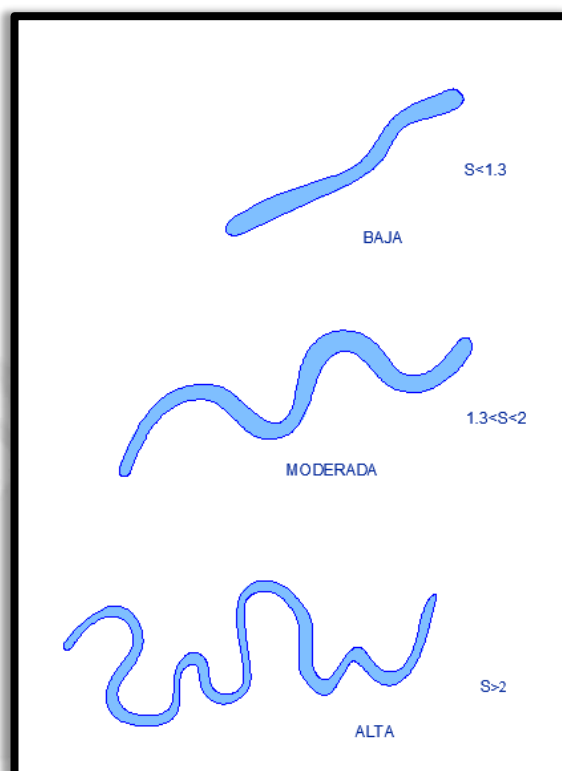
$L_R$ : Longitud del eje del río

$L_{vR}$ : Longitud de inicio y fin del tramo del valle



**Figura 1.4:** Representación de la Geometría del valle de un río (elaboración propia)

La sinuosidad es un parámetro muy importante de las formas aluviales. Existen autores que califican a los ríos morfológicamente como de baja sinuosidad ( $S < 1.3$ ), moderada sinuosidad ( $1.3 < S < 2$ ) y alta sinuosidad ( $S > 2$ ). En la figura 1.5 se muestran esquemáticamente la sinuosidad y sus grados descritos anteriormente.



**Figura 1.5:** Representación esquemática de la sinuosidad y de sus grados (elaboración propia, basado en Rocha, 2009)

### 1.3.3.3. Barras

Se denomina así a los depósitos de sedimentos adyacentes a las orillas o dentro del cauce de un río (Rocha, 2009). Las barras se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Longitudinales:** Son aquellas barras que son paralelas al eje del canal. Son muy frecuentes en ríos entrelazados, abanicos aluviales y sistemas anastomosados.
- **Transversales:** Aquellas barras que son transversales al eje del canal, muy frecuentes en ríos entrelazados y en sistemas anastomosados.
- **Diagonales:** Barras que son oblicuas al eje del canal, muy frecuentes en ríos entrelazados, en abanicos aluviales y en algunos sistemas anastomosados.

- **En espolón (*point bar*):** Aquellas barras ubicadas en el sector interno de meandros que se encuentran en dirección casi perpendicular al canal. Muy frecuente en sistemas aluviales meándricos y anastomosados.
- **Laterales y Anexas:** Barras ubicadas en los márgenes de los canales y los cuales migran aguas abajo aunque con una componente lateral.

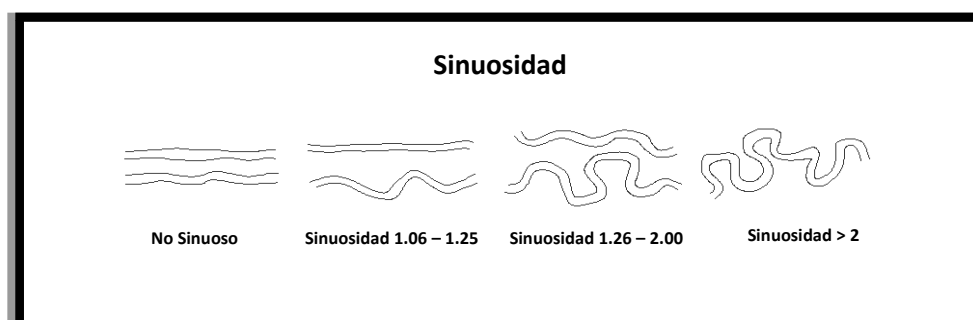
### 1.3.4. Clasificación de los ríos

#### 1.3.4.1. Según el tipo de cauce y sinuosidad

En la tabla 1.2 se establecen las características de acuerdo al tipo de cauce. Se puede observar 5 tipos de cauces y se muestran sus características respecto a morfología, sinuosidad ancho y profundidad y tipos de barras que poseen. En la figura 1.6 se observa la sinuosidad de un río según su geometría.

**Tabla 1.2:** Clasificación de los ríos según cauce y sinuosidad

Tipo de Cauce	Morfología	Sinuosidad	Ancho/Prof.	Barras
<b>Recto</b>	Único cauce con estanques y rápidos, thalweg escasamente sinuoso.	Cercana a 1	< 40	Oblicuas y longitudinales.
<b>Ligeramente Sinuoso</b>	Único cauce con estanques y rápidos, thalweg ligeramente sinuoso.	1.05 – 1.5	< 40	Oblicuas y achatadas.
<b>Meandriforme</b>	Único cauce con estanques y rápidos, thalweg sinuoso.	> 1.05	< 40	Barras en espolón.
<b>Entrelazado</b>	Dos o más cauces con barras y perímetro inestable.	> 1.3	> 40	Dominan barras centrales
<b>Divagantes</b>	Dos o más cauces.	Cercano a 1.5	< 40	Variable, comienzan a formarse espolones
<b>Anastomosado</b>	Dos o más cauces con barras y perímetro estables.	> 2	< 10	Muy variable.



**Figura 1.6:** Geometría de un río según su sinuosidad (elaboración propia)

#### **1.3.4.2. Según su edad**

A lo largo del recorrido de un río, este presenta diversas características en su curso. Una de las principales es su capacidad erosiva, la cual tiene como causa fundamental la pendiente del tramo y su descarga. Según esta premisa, se clasifican a los ríos en tres etapas: niñez, juventud y madurez (Figura 1.7).

##### **1.3.4.2.1. Formación o Niñez**

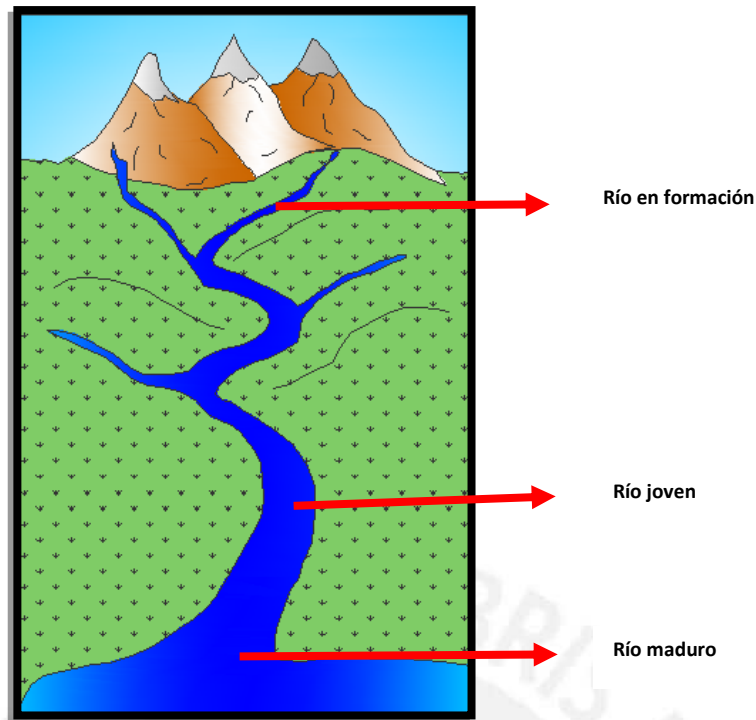
Se refiere a la fase inicial de la formación de un río. Por lo general, se encuentran en los cauces de alta montaña. Se caracterizan por tener una gran fuerza erosiva, la cual produce quebradas y socavones pronunciados, por sus pendientes altas, las cuales pueden ser mayores al 10% y por sus secciones transversales tipo V. La mayoría del sedimento producido por la erosión proviene de estas zonas. Además, son muy irregulares y presentan procesos de degradación (Gracia y Meza, 2013).

##### **1.3.4.2.2. Juventud**

En esta fase, la característica principal de los ríos es tener una pendiente media y altas velocidades de flujo. Además, suelen transportar partículas grandes de arena, gravas y cantos rodados, lo que favorece el fenómeno de abrasión del fondo del cauce y da lugar a la formación de los valles. Debido a los efectos que causa la erosión regresiva, los valles se profundizan rápidamente, ampliándose y formando, con el paso del tiempo, una "V" (Gracia y Meza, 2013).

##### **1.3.4.2.3. Madurez**

En la fase de madurez, las pendientes de los ríos son bajas o muy bajas y las erosiones en el fondo del cauce durante los periodos de avenidas, son momentáneas ya que, al disminuir la velocidad, el río recupera los sedimentos arrastrados nuevamente. Generalmente, los ríos tratan de ampliar el cauce y la energía es utilizada en los procesos de erosión lateral, presentándose trezamientos y, continuamente, formándose meandros (Gracia y Meza, 2013). Cabe mencionar que en la presente Tesis, los ríos que se estudian y analizan, pertenecientes a la Región de Selva Alta y Baja, se han considerado en su etapa de madurez, siendo estas de alta sinuosidad y meándricos.



**Figura 1.7:** Esquema de clasificación de los ríos según su edad (elaboración propia)

#### 1.3.4.3. Según su libertad para ajustar su forma y su gradiente

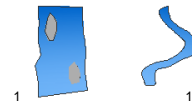





Existen dos criterios importantes para poder clasificar a los ríos de acuerdo a sus cauces (Schum, 1977). Estos son:

- *Cauces de lecho rocosos:* Aquellos que son confinados entre afloramientos rocosos de tal manera que tanto el material que compone el fondo y como las márgenes determinan la morfología del cauce.
- *Cauces aluviales:* En este caso, el río fluye en un canal cuyo fondo y márgenes están constituidos por material transportado por el río bajo las condiciones de su flujo.

#### 1.3.4.4. Según la carga de sedimentos

Teniendo en cuenta la carga y el transporte de sedimentos, es posible hacer una clasificación de los cauces aluviales de la siguiente manera (Figura 1.8): canales con carga de fondo (material transportado, el cual tiene origen en el lecho), canales que tienen carga en suspensión (material transportado por el flujo disuelto en agua; es decir, carga de lavado) y canales que cuentan con carga mixta (carga suspendida y carga de fondo en unos porcentajes determinados para cada caso).



Morfología		Tipo de Cauce		
		Carga de Fondo	Carga Mixta	Carga en suspensión
Canal Simple	Forma del Cauce	Recto	Meándrico	Trenzado
	Relación Ancho/Profundidad	60	25	8
Canal Múltiple	Patrón del canal			
	Sinuosidad	1 1.1	1.4 1.7	2.5
Canal Múltiple	Patrones			
	Asociaciones	Abanico aluvial	Llanura de inundación	Planicie Aluvial Delta

**Figura 1.8:** Morfología y clasificación de cauces aluviales con relación a la carga de sedimentos

Asimismo, se logró comprobar con ensayos de laboratorio que, en un incremento de carga de los sedimentos, el río puede sufrir un proceso de metamorfosis en su cauce, de rectos a meándricos. Finalmente, si se sigue aumentando la carga de sedimentos, se llega a cauces trenzados (Schum, 1977).

#### 1.3.4.5. Criterios Matemáticos

##### a) Criterio de Lane

Un método para clasificar ríos está dado por las ecuaciones (3 y 4) de Lane. Si:

$$S \times Q_m^{1/4} \leq 0.0007 \quad \text{Ríos Meándricos} \quad \dots \quad (3)$$

$$S \times Q_m^{1/4} \gg 0.0041 \quad \text{Ríos Trenzados} \quad \dots \quad (4)$$

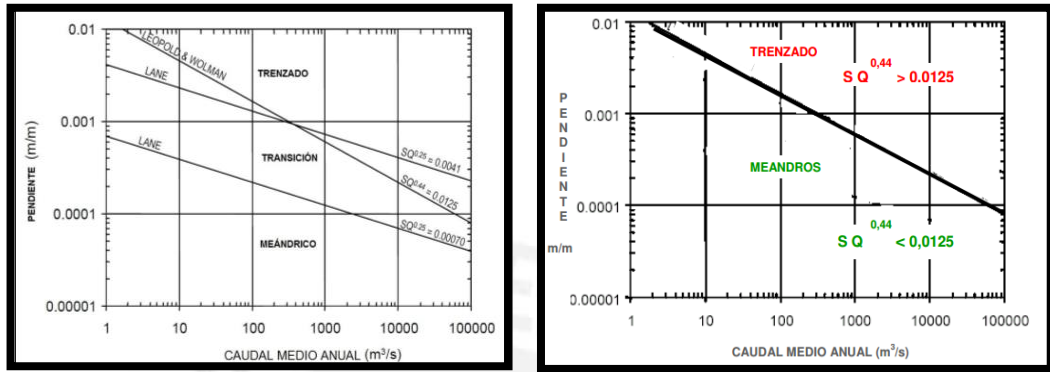
Donde la pendiente (S) está en m/m y el caudal medio anual (Qm) en m<sup>3</sup>/s. El criterio fue establecido experimentalmente en trabajos hechos en cauces arenosos para distinguir los ríos meándricos de los entrelazados en función del caudal y la pendiente.

##### b) Criterio de Leopold y Wolman

Leopold y Wolman realizaron observaciones de campo y estudios de laboratorio muy importantes. La parte experimental de sus investigaciones se realizaron en el Laboratorio de Sedimentología del Instituto Tecnológico de California. Ellos lograron establecer una relación entre pendiente y caudal

(Figura 1.9), para lechos de arena y de grava, la cual es válida para distinguir los ríos trezados de los ríos meándricos. La ecuación 5 es la que marca el umbral respectivo:

$$S = 0.0125Q_m^{-0.44} \quad \dots \quad (5)$$



**Figura 1.9:** Criterio de Leopold y Wolman para la clasificación de los ríos (Rocha, 2009)

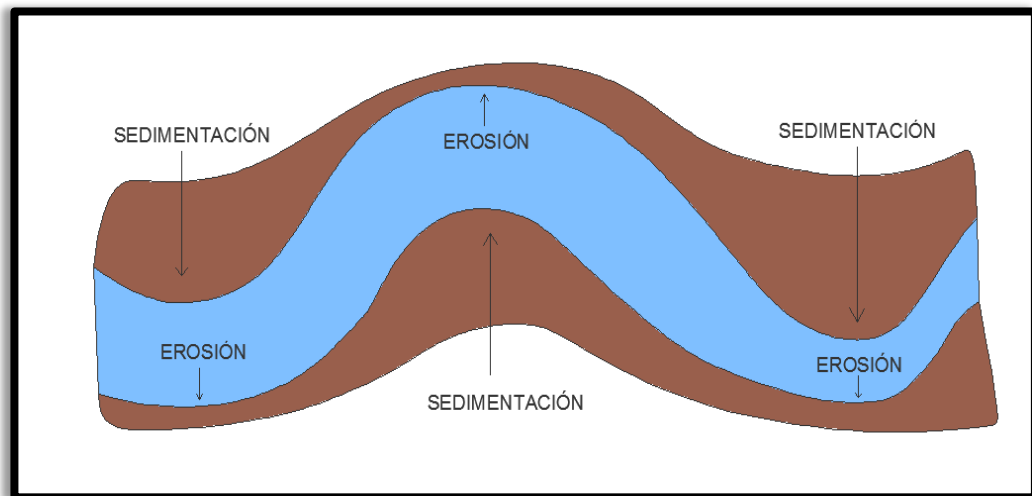
### c) Criterio de Schum y Khan

Schum y Khan determinaron que, para una pendiente baja y gastos sólidos pequeños, el canal es prácticamente recto y que, al aumentar la pendiente y el gasto sólido, aparece un cauce meándrico. Para valores mayores aparecía un cauce entrelazado (Rocha, 2009). Esto lo pudieron lograr gracias a los estudios que realizaron en un canal aluvial.

### 1.3.5. Ríos Meándricos

El origen de la palabra meandro viene del río *Büyük Menderes*, el cual se encuentra en el suroeste de Turquía y muestra un comportamiento típico de un río meándrico. En general, un río meándrico es aquel que es descrito por su curso y cuya sinuosidad es pronunciada y presentan muchas inflexiones a lo largo de su recorrido. Se caracteriza por formarse con mayor facilidad en los ríos de las llanuras aluviales con pendientes muy escasas, dado que los sedimentos suelen depositarse en la parte convexa del meandro, mientras que en la parte cóncava, a causa de la fuerza centrífuga, predomina la erosión y el retroceso en la orilla. Pueden ocurrir cortes de meandros, los cuales dejan los denominados “brazos muertos” u *oxbow lakes* (Farías, 2005). También se puede decir que un meandro es la sinuosidad de un río formada por un proceso de erosión en la orilla exterior

(cóncava) y de sedimentación en la orilla interior (convexa), como se puede apreciar en la Figura 1.10:



**Figura 1.10:** Erosión y sedimentación de un meandro (elaboración propia, basado en Kerchack, 2013)

Los ríos aluviales tienen la tendencia de formar meandros, es decir, no mantener un curso rectilíneo. Los meandros se forman en tramos de pendiente suave con carga de sedimentos finos, donde existe cierto equilibrio entre la erosión y deposición. Los ríos meándricos están formados por una sucesión de curvas, en su gran mayoría, cuya sinuosidad es superior a 1,5 (valor referencial). Un río aluvial es tortuoso en la medida en la que tiene muchas curvas y tiene meandros en la medida en la que estas curvas (es decir, las tortuosidades) se desplazan (Rocha, 2009). Esta movilidad o migración de los meandros, tiene una gran importancia en la construcción de obras civiles al momento de proyectarlas y construirlas. Algunas características de los ríos meándricos son las siguientes:

- Márgenes u orillas erosionables
- Baja pendiente
- Sección transversal variable
- Transporte de partículas sólidas no muy grande, de granulometría
- En la mayoría de casos, variación de caudales no muy marcada
- Suelen correr sobre amplias áreas de inundación
- Flujo característico en las curvas

Así también, un río meándrico puede ser entrelazado al mismo tiempo. Respecto a este punto, el carácter trenzado y el meándrico pueden estar presentes en un

mismo río. Es frecuente que uno, en su tramo alto, sea trezado y luego pase a ser meandriforme aguas abajo, donde la pendiente es menor aunque el caudal es mayor (Vide, 2005) Los cauces meándricos pueden ser de las siguientes clases (Figura 1.11):

- **Regulares:**

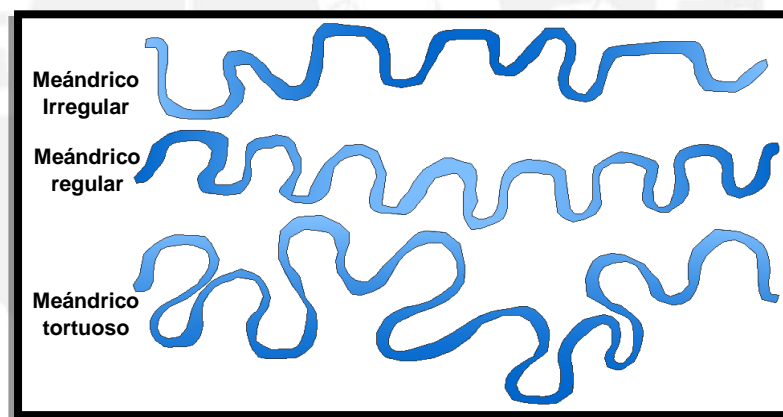
Los meandros se repiten de manera homogénea casi en la totalidad de la longitud del río. El ángulo entre el canal y el eje del valle es menor a  $90^\circ$ .

- **Irregulares:**

No se repite el patrón de meandro y los diferentes meandros son irregulares.

- **Tortuosos:**

En este tipo de ríos, se repite un patrón de meandros con ángulos de  $90^\circ$  entre el eje del canal y la tendencia del valle. Estos suelen formarse cuando la geología, el relieve, la resistencia a la erosión de ciertas márgenes controlan el cauce. En el Amazonas, este sistema es el que más abunda.



**Figura 1.11:** Clasificación de meandros según Brice (elaboración propia)

Los ríos meándricos pueden llegar a tener varias formas en un mismo lugar, lo que depende del régimen hidrológico y de la carga de sedimentos que transporte elementos presentes en las cuencas.

### 1.3.5.1. Formación de un Meandro

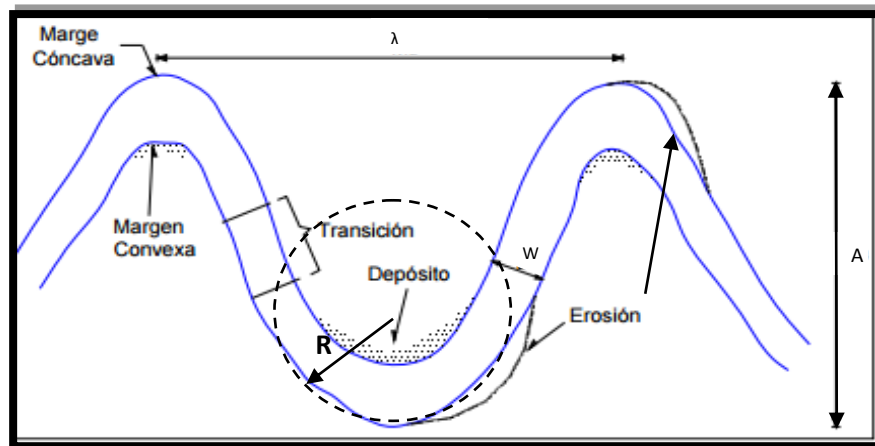
Se refiere a los factores naturales y los procesos que dan lugar a los meandros. El proceso de formación de meandros es un proceso autointensificado, en el cual una mayor curvatura provoca más erosión de la orilla, lo que se traduce en una mayor curvatura. La configuración en forma de onda de una corriente está cambiando constantemente. Cuando se forma un canal sinusoidal se somete a un proceso durante el cual la amplitud y la concavidad de los márgenes aumenta por efectos del flujo helicoidal debido al aumento de la cantidad de erosión que ocurre en el exterior de la curva (Leopold, 1994).

Los ríos tienen como característica la tendencia a formar meandros. Debido a ello, se dice que son serpenteantes; en otras palabras, presentan un fenómeno natural a no seguir un curso rectilíneo, lo cual da una idea de su constante dinamismo. Cuando se está ante la presencia de un meandro, se debe entender que el recorrido fluvial ha aumentado, lo cual implica una disminución de la pendiente del río y de la velocidad media de la corriente.

### 1.3.5.2. Geometría de un meandro

Se denomina así a la descripción técnica de un determinado curso de agua serpenteante. Los meandros se caracterizan por tener una forma de onda irregular (Gallego y Campos, 2014). Dentro de ellos, existen varios parámetros geométricos que sirven para describir los canales de meandros, como se aprecia en la figura 1.12, y, dentro de ellos, se incluyen los siguientes:

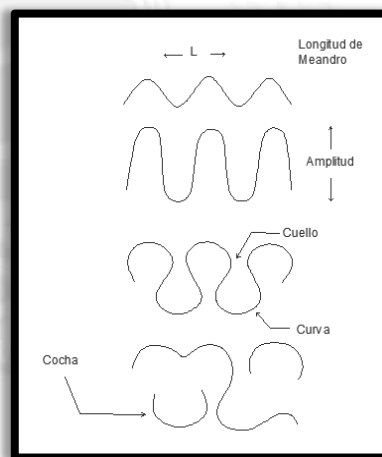
- Longitud de onda ( $\lambda$ ): Es la longitud repetida del patrón del meandro a lo largo de la línea central del valle o eje de los meandros.
- Amplitud o ancho del meandro (A): Ancho de la cadena de meandros medida perpendicularmente al eje de los meandros.
- Radio de curvatura (R): Radio de curvatura que es medida entre dos puntos de inflexión.
- Ancho del canal o cauce (W o B): Ancho medido en el punto de inflexión del meandro.
- Curvatura (C): Se define como la inversa del radio de curvatura.



**Figura 1.12:** Geometría de un meandro

### 1.3.5.3. Comportamiento de los meandros

El comportamiento de un meandro puede llegar a ser muy complejo. Las curvas características de los ríos meándricos son muy dinámicas. Como se muestra en la figura 1.13, el meandro, en sus inicios, surge como una onda, la cual se va alargando en amplitud para luego formar cuellos y volverse más curva hasta el punto, en algunos casos, de llegar a formar las denominadas cochas.



**Figura 1.13:** Evolución de un Meandro (basado en NEDECO)

Los Meandros no llegan a ser estables y se caracterizan por un alargamiento constante, migración aguas abajo y cortes eventuales. Este dinamismo se manifiesta mediante continuos procesos de erosión, sedimentación y desplazamientos laterales y longitudinales. Por consiguiente, la formación de curvas y meandros es inherente en la naturaleza. Los cortes eventuales en el meandro son



la respuesta de este a la inestabilidad y movilidad característica de su curso. Un corte de meandro genera ajustes importantes como el acortamiento de la longitud del río, aumento de pendiente, entre otros. Las denominadas cochas o “meandros abandonados”, son una especie de lagunas que se encuentran en la selva y que, usualmente, son un corte de meandro (Morales, 2009).

#### 1.3.5.4. Cortes de Meandro

Los cortes de meandro (*oxbow lake*, en inglés) son pequeños lagos en forma de U, que se generan a partir de una curva de meandro la cual ha sido abandonada de un río. Generalmente, se forma cuando el río corta el cuello de un determinado meandro para lograr acortar su curso, dejando a este separado del cauce. Si el corte se realiza a un meandro, quedará un lago en forma de media luna; en cambio, si hay más de dos cortes, se formará un lago serpenteante (Figura 1.14).

Su formación se origina cuando un río crea un meandro por los procesos de erosión sobre sus orillas a causa de la acción hidráulica. Luego de un periodo considerable de tiempo, este meandro se va curvando cada vez más y más hasta que, en un determinado momento, sucede que el cuello del meandro termina tocando el lado opuesto y el río corta por dicho cuello, separando el meandro que generará el denominado “brazo muerto”. De esta manera, los sedimentos del río se depositan en las entradas o cuello de meandro y forman tapones (*Hickin*, 2002).



**Figura 1.14:** Cortes de Meandro – Río Tigre

Este fenómeno natural ocurre por la continua deposición en las orillas convexas y la erosión de las orillas cóncavas en los meandros, con lo cual, las dos orillas cóncavas se van aproximando hasta formar los brazos de meandro. Este proceso tiene lugar a lo largo del tiempo con una duración variable, desde varios años a varias décadas y puede ser esencialmente estático (*Constantine y Dunne, 2008*).

#### **1.3.5.5. Causas de Cambios fluviomorfológicos en los ríos meándricos**

##### **a. Causas Naturales**

- **Mecánica de la erosión:** La erosión en los meandros se producen en el exterior de la curva que describen, donde la velocidad es mayor. La deposición de los sedimentos se produce en el borde interior debido a que el río no puede llevar una carga excesiva de estos, creando un deslizamiento de pendiente. Por consiguiente, al ser el movimiento más rápido en el exterior de la curva, esta tiene mayor capacidad erosiva y el meandro tiende a migrar en la dirección hacia fuera de la curva mencionada.
- **Transporte de sedimentos y cortes de meandro:** Así como existe el fenómeno de erosión, el transporte de sedimentos es una causa muy importante de los cambios fluviomorfológicos en ríos meándricos. Generalmente, su migración lateral se debe a la remoción del material de la parte alta de la cuenca y la deposición de ellos en la parte baja.

##### **b. Causas Externas**

- **Obras Civiles:** Son las obras grandes que sirven para el uso y beneficio de la población de la zona, las cuales están en contacto con el río directamente o muy cerca (llanura). Dichas obras alteran la evolución natural del río, trayendo como consecuencia la restricción de la migración o, en su defecto, elevando la tasa de la misma, que el promedio esperado en el entorno afectado. Además, puede agrandar o degradar la llanura del río. Por ejemplo, se tienen obras civiles como puentes, hidrovías, carreteras, obras de captación, ciudades en llanuras de inundación, entre otras.
- **Contaminación:** A lo largo del tiempo, los ríos se han desarrollado presentando diversos cambios en su composición. Uno de los elementos que varía

continuamente, especialmente en el último siglo, es la cantidad de sedimentos que fluye por el mismo. A causa de la contaminación, la cantidad de sólidos que transporta el río se ha visto incrementada, lo cual afecta la evolución del río y genera cambios importantes. Un ejemplo es el caso del Río Madre de Dios, el cual ha visto que la cantidad de sólidos ha aumentado por la presencia de metales pesados, entre ellos el mercurio, utilizados por la minería ilegal, según la Autoridad Nacional de Agua (ANA), lo cual implicó que la tasa de erosión se intensificara, causando que las viviendas que se encuentran en las márgenes cercanas estén en peligro.

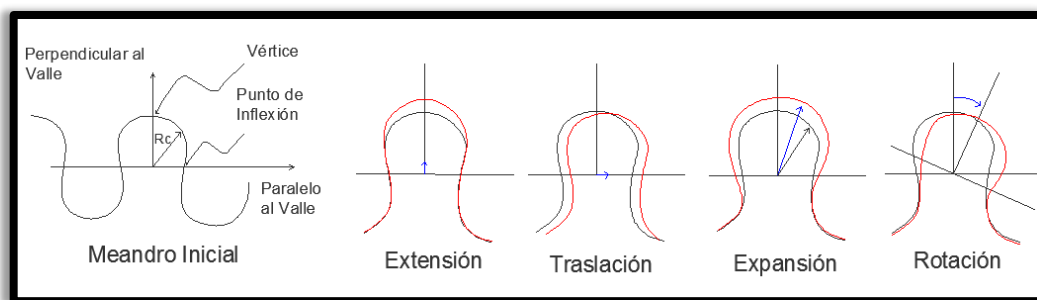
- **Calentamiento Global:** Como consecuencia del calentamiento global, los glaciares van desapareciendo y derritiéndose, lo cual genera que haya más líquido sobre los océanos. Esta situación causa el aumento los caudales de los ríos Amazónicos y genera que los procesos de erosión y sedimentación se den con mayor celeridad ya que el material por transportar acumulado en los ríos, también, será mayor. Al aumentar el caudal y, por tanto la velocidad, las tasas de migración también se ven incrementadas (Rocha, 1998). En consecuencia, las autoridades deben tener presente que la población será más vulnerable a los efectos de la migración de los ríos, como es ver afectada sus centros poblados o dañar su infraestructura, tales como carreteras y puentes.

#### **1.3.5.6. Migración de Meandros**

Desde el punto de vista de la hidráulica fluvial, todos los ríos están sujetos a procesos de erosión o degradación, equilibrio y sedimentación, en mayor o menor medida. Desde la perspectiva ingenieril, resulta interesante poder reunir elementos cuantitativos de análisis que permitan inferir esas tendencias de evolución morfológica a fin de poder planificar con cierta racionalidad actividades humanas y futuras construcciones en el ambiente fluvial y sus alrededores

##### **a. ¿Cómo migran los ríos?**

Los ríos meándricos sufren un proceso de inestabilidad dinámica por el cual el meandro se mueve dentro de su área de inundación disponible (en la llanura próxima). La migración incluye el cambio lateral del cauce principal, el cual es expresado en términos de distancia recorrida a la línea central del canal (*Hickin y Nanson, 1983*), como se aprecia en la Figura 1.15.



**Figura 1.15:** Modelo de Migración de Meandros (elaboración propia, basado en Solórzano, 2011)

## b. Inicio del movimiento de una partícula

El movimiento se inicia cuando se vence el esfuerzo necesario de una partícula de diámetro dado, denominado esfuerzo crítico. Por consiguiente, dicho esfuerzo involucra una velocidad crítica de iniciación de movimiento. En las Tablas 1.3 y 1.4 se muestran la relación entre velocidad y diámetro de partícula para el inicio de movimiento para suelos de materiales cohesivos y no cohesivos (Solórzano, 2011).

**Tabla 1.3:** Velocidades críticas del agua para materiales no cohesivos (m/s)

Material	Diámetro medio (mm)	Tirante de la corriente en (m)					
		0.4	1	2	3	5	más de 10
Polvo y Limo	0.005 - 0.05	0.15 - 0.20	0.20 - 0.30	0.25 - 0.40	0.30 - 0.45	0.40 - 0.55	0.45 - 0.65
Arena fina	0.05 - 0.25	0.20 - 0.35	0.30 - 0.45	0.40 - 0.55	0.45 - 0.60	0.55 - 0.70	0.65 - 0.80
Arena gruesa	1.0 - 2.5	0.50 - 0.65	0.60 - 0.75	0.70 - 0.80	0.75 - 0.90	0.85 - 1.00	0.95 - 1.20
Gravilla fina	2.5 - 5.0	0.65 - 0.80	0.75 - 0.85	0.80 - 1.00	0.90 - 1.10	1.00 - 1.20	1.20 - 1.50
Grava fina	15 - 25	1.10 - 1.25	1.20 - 1.45	1.35 - 1.65	1.50 - 1.85	1.65 - 2.00	2.00 - 2.30
Grava media	25 - 40	1.25 - 1.50	1.45 - 1.85	1.65 - 2.10	1.85 - 2.30	2.00 - 2.45	2.30 - 2.70
Grava gruesa	40 - 75	1.50 - 2.00	1.85 - 2.40	2.10 - 2.75	2.30 - 3.10	2.45 - 3.30	2.70 - 3.60
Gujarro fino	75 - 100	2.00 - 2.45	2.40 - 2.80	2.75 - 3.20	3.10 - 3.50	3.30 - 3.80	3.60 - 4.20
Canto rodado fino	200 - 300	3.50 - 3.85	3.80 - 4.35	4.30 - 4.70	4.65 - 4.90	5.00 - 5.50	5.40 - 5.90
Canto rodado medio	300 - 400		4.35 - 4.75	4.70 - 4.95	4.90 - 5.30	5.50 - 5.60	5.90 - 6.00
Canto rodado grueso	400 - 500			4.95 - 5.35	5.30 - 5.50	5.60 - 6.00	6.00 - 6.20

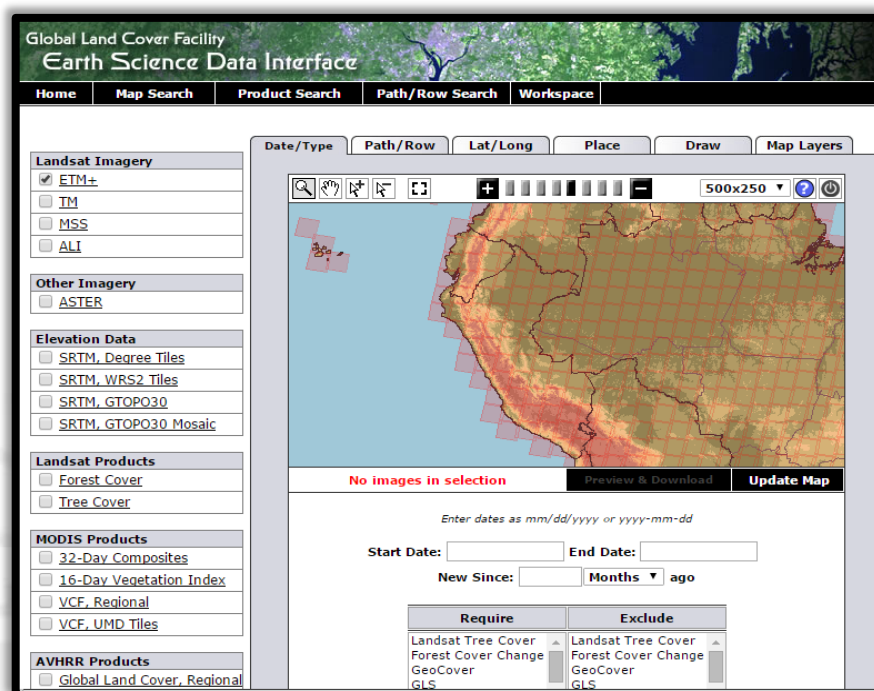
**Tabla 1.4:** Velocidades críticas del agua para materiales cohesivos (m/s)

Denominación de los suelos	Porcentaje del contenido de partículas		Suelos poco compactos, peso volumétrico del material seco, 1.20 - 1.66 tn/m <sup>2</sup>							
			Suelos mediamente compactado, peso volumétrico del material seco, 1.20 - 1.66 tn/m <sup>2</sup>		Suelos compactos, peso volumétrico del material seco de 1.66 - 2.04 tn/m <sup>2</sup>		Suelos muy compactos, el peso volumétrico del material seco de 2.04 - 2.14 tn/m <sup>2</sup>			
			Profundidades medias de la corriente (m)							
Arcillas, tierras fuertemente arcillosas	-	-	0.4 - 1.0	2.0 - 3.0	0.4 - 1.0	2.0 - 3.0	0.4 - 1.0	2.0 - 3.0	0.4 - 1.0	2.0 - 3.0
	30 - 50	70 - 50	0.35 - 0.4	0.45 - 0.5	0.35 - 0.4	0.45 - 0.5	0.7 - 0.85	0.95 - 1.1	1.4 - 1.7	1.9 - 2.1
Suelos Aluviales, arcillas margosas	10 - 20	90 - 50	-	-	0.6 - 0.7	0.8 - 0.85	0.8 - 1.0	1.2 - 1.3	1.1 - 1.3	1.5 - 1.7
Tierras arenosas	5 - 10	20 - 40	Según el tamaño de las fracciones arenosas							



### 1.3.5.7. Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales son representaciones visuales de información que son captadas por un sensor montado en un satélite artificial. Dichos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la Tierra, las cuales, procesadas adecuadamente, entregan información aplicable a cualquier campo de estudio. En la Figura 1.16 se observa una plataforma que presenta imágenes satelitales.



**Figura 1.16:** Imágenes Satelitales - ESDI

### 1.3.5.8. Satélites Artificiales

Los satélites artificiales son objetos de fabricación humana que se colocan en órbita alrededor de un cuerpo celeste como un planeta o un satélite natural. Dentro de ellos destacan los satélites denominados *Landsat*.

Los satélites *Landsat* fueron lanzados para la observación en alta resolución de la superficie de la Tierra. Dichos satélites están dotados de varios sensores que son empleados para la teledetección con el fin de obtener datos de recursos terrestres. Como resultado, estos satélites dan las imágenes satelitales que, con un correcto análisis, pueden dar información para estudios geográficos, astronómicos, geológicos, entre otros. La información que es captada por los satélites presenta un conjunto de bandas espectrales. Con una conveniente combinación de ellas se



puede obtener y visualizar la información del terreno en estudio, como se puede observar en las Tablas 1.5 y 1.6 (Solórzano, 2011).

**Tabla 1.5:** *Bandas Espectrales*

Banda	Rango Espectral (nm)	Zona del Espectro	Resolución en el terreno (m)
1	450 - 515	Visible - azul	30
2	525 - 605	Visible - verde	30
3	630 - 690	Visible - rojo	30
4	750 - 900	Infrarrojo - rojo (visible)	30
5	1550 - 1750	Infrarrojo lejano	30
6	10400 - 12500	Térmico lejano	60
7	2090 - 2350	Térmico próximo	30
8 (pancromática)	520 - 900	Prácticamente todo visible	15

**Tabla 1.6:** *Combinación de Bandas Espectrales*

Combinación de bandas	Aplicabilidad	Descripción
3, 2, 1	Color "verdadero". Como lo percibe el ojo humano	El color azul oscuro indica aguas profundas. El azul claro, aguas poco profundas.
4, 3, 2	Falso color. Útil para estudios de cobertura vegetal, cultivos, deforestación	Los colores magenta y rojo indican vegetación densa. El color blanco indica áreas deforestadas.
4, 5, 3	Falso color. Utilizada para análisis de humedad de suelos y vegetación	Se resaltan los límites entre agua y suelo. La vegetación se presenta de color marrón verde y naranja.
7, 4, 2	Falso color. Utilizada para identificar zonas urbanas y praderas.	Las áreas urbanas son mostradas en tono magenta y los prados de color verde claro.

En el presente estudio se utilizaron Imágenes del satélite *Landsat 4, 5 y 7* por ser de buena resolución para un análisis multitemporal de migración de meandros, donde 30 m = 1 pixel.

## 1.4. APLICACIONES POTENCIALES PARA CUANTIFICAR LA MIGRACIÓN DE RÍOS

El presente estudio puede aplicarse al diseño previo de construcciones, obras civiles y restauración de ríos, como a continuación se hace referencia:

### 1.4.1. Obras civiles

En los últimos años se vienen realizando proyectos de infraestructura referidos a carreteras, las cuales se extienden por la Amazonía. Dichas vías suelen ubicarse en las inmediaciones o sobre ríos meándricos. En consecuencia, la única forma de cruzarlos es construyendo un adecuado puente, el cual debe tener una ubicación estratégica para que pueda evitar los procesos de erosión y sedimentación que sufre un río a lo largo de los años. Es necesario delimitar la zona de menor tasa de migración para poder construir los cimientos y los pilares para evitar daños y costos excesivos y adicionales en el diseño de defensas ribereñas, por ejemplo. Para ello, es necesario estimar la tasa de migración, erosión y sedimentación del río. Asimismo, se tienen construcciones de muelles e implementación de Hidrovías. Con respecto a los muelles, se debe tener la misma consideración que con la carretera; es decir, se debe calcular la tasa de migración y usarla en el diseño para evitar gastos innecesarios a largo plazo. En el caso de las hidrovías, se debe tener en cuenta las tasas de migración, erosión y sedimentación para poder mantener la navegabilidad en el río y desarrollar la región económicamente con todo el comercio que traería consigo esta inversión.

### 1.4.2. Restauración de ríos

Como consecuencia de la alteración del curso de un río para el beneficio humano, se encuentra la canalización, la profundización del río, la pérdida de las llanuras de inundación, la degradación de la calidad del agua, lo cual se reduce la biodiversidad del hábitat y el atractivo natural del río. Ante estos posibles cambios que el río puede sufrir, se debe tener un registro histórico de la geometría natural del río con el fin de poder restaurar el río con buena aproximación (Nagle, 2006). Ejemplos de esta aplicación tenemos en el Reino Unido, cuando se realizó la restauración del río Cole y el río Skeme.

### **1.4.3. Construcción de ciudades y centros poblados**

Al momento de construir ciudades o centros poblados, se debe tener en cuenta las tasas de migración de los ríos que se encuentren cerca, pues pueden terminar siendo un problema para los habitantes. La dinámica constante de estos ríos puede interferir en sus actividades cotidianas y en las construcciones que potencialmente se realicen ya que generarán una sensación de inestabilidad (Maza y Garcia, 2011).

## **1.5. CAMBIOS INDUCIDOS POR LA DINÁMICA NATURAL DE LOS RIOS**

### **1.5.1. En Centros Poblados**

A lo largo de la extensa Amazonia Peruana, muchos centros poblados se han visto afectados por la dinámica natural de los ríos a lo largo de su curso. Un caso muy especial es la ciudad de Iquitos. Desde la época de la Conquista se han registrado escritos pertenecientes a Darío Uriarte que indican que los ríos Amazónicos, como Amazonas, Nanay y Marañón. En ellos indica que se inundan zonas costeras e, inclusive, a lo largo de su caminata se forman brazos de meandro. En la actualidad, existe un riesgo de erosión en el norte de la ciudad y molestia de la comunicación fluvial en el sur. En el este y oeste se ven pocos cambios en el paisaje en los últimos años y presencia de varios frentes de deposición y de erosión. (El Rio que se Aleja, 1994)

### **1.5.2. En Infraestructura**

Los puentes y carreteras son las principales obras civiles que se ven afectadas por la dinámica fluvial de los ríos. Ellas sufren por los procesos de erosión y sedimentación y deterioran la estructura de sus cimientos y soportes. Un ejemplo claro es el Puente Tahuamanu, el cual ha visto debilitado en sus cimientos debido a la constante erosión de las orillas del río Tahuamanu. Este fenómeno debe poner alertas a las autoridades para que puedan dar un correcto mantenimiento a estas estructuras tan importantes para la sociedad (Medina y Santisteban, 2011).

## **CAPÍTULO 2: DATOS Y MÉTODO**

### **2.1. METODOLOGÍA DE PREDICCIÓN**

#### **2.1.1. Análisis Multitemporal**

El análisis multitemporal es una técnica que consiste en comparar, en diversos tiempos, las características morfológicas de una zona cualquiera de la Tierra. De esta forma, se obtienen conclusiones diferenciadas relacionadas con las transformaciones espaciales de la zona en estudio. El procesamiento multitemporal implica que las series de datos provenientes de diversas fechas deben convertirse en un único conjunto de datos (Mehl y Peinado, 1997). Para realizar el análisis multitemporal, es necesario contar con una serie de imágenes satelitales que dispongan de una buena resolución para que los resultados y conclusiones que se consigan sean lo más precisos posible para un periodo de años razonable. En el presente trabajo de investigación, se utilizaron imágenes satelitales de instituciones como ESDI (*Earth Science Data Interface*) y *Global Land Cover Facility (University of Maryland) Data Source*. Todas estas bases de datos brindan imágenes satelitales *Landsat* que cuentan con una calidad de 30 m = 1 pixel. En el Anexo A – 2 se muestra de manera detallada la forma en que se digitalizaron las imágenes.

Se obtuvieron imágenes necesarias para el estudio de los 13 ríos seleccionados y fueron organizadas de acuerdo al rango de tiempo de estudio y análisis que se había previsto (1987-2011), según la disponibilidad de las mismas en el directorio determinado. Cabe resaltar que se buscaron tramos de ríos que sean meándricos en casi su totalidad de extensión, con una cantidad de curvas bastante representativa, para poder tener los resultados esperados. Una vez que se encontraron y almacenaron las imágenes en un directorio propio, se procedieron a georreferenciar las mismas en el programa AutoCAD Map 3D, teniendo en cuenta las coordenadas UTM de cada imagen y cada río. Cabe resaltar que las imágenes contaron con una referencia propia que, debido a la tarjeta de video de una determinada computadora, pueden estar desplazadas unos cuantos metros. Esta dificultad se arregló moviendo la imagen según sus coordenadas originales registradas. Luego, con una combinación de bandas adecuadas, se digitalizó o vectorizó cada uno de los márgenes de los 13 ríos seleccionados y se organizaron por capas los distintos años que se habían previsto (1990, 2000 y 2010, por ejemplo). Una característica de cada uno de los tramos que se analizaron es que,

por lo menos, tienen 50 meandros y su longitud es bastante grande, lo cual es importante para los resultados que se obtendrán en el procesamiento de los datos.

Los trazos de los márgenes han servido para poder encontrar la línea central del río (eje), que representará, por simplificación, el comportamiento del río. Para eso, se aplicó la herramienta *Channel Planform Statistics Tools* desarrollada por la "National Center for Earth-Surface Dynamics", la cual se encuentra formada por un conjunto de programas Visual Basic que fueron escritos exclusivamente para un programa GIS, en este caso, el *ArcMap 9.1*. Esta herramienta ha sido instalada en un archivo de mapa de *ArcMap* llamado *planform\_statistics\_tools\_v91.mxd* y puede realizar tres funciones especiales. La primera función es Interpolar la línea central de dos líneas (en otras palabras, dos márgenes que han sido digitalizados con la utilización de imágenes satelitales). El ancho, el radio local de curvatura en cada punto espaciados uniformemente y sus coordenadas UTM a lo largo de la línea central se guardan en un archivo de texto. La segunda función es medir las distancias de migración entre dos líneas (que pueden ser las líneas obtenidas de aplicar la herramienta anterior). La tercera función es generar un archivo de forma tipo poligonal de las cajas al lado de los márgenes del río que se corresponden con una determinada línea central, el cual no es de relevancia para el presente estudio.

Los ejes de los ríos han dado la estadística requerida. Con ellos, se han podido obtener la sinuosidad promedio, la migración, relaciones geométricas, entre otras características. Para hallar el eje central, el programa pidió como *input* los márgenes laterales y la distancia de análisis del tramo del río. En este estudio, se hizo un análisis de los ríos cada 50 m, como mínimo, con lo cual se obtuvo un conjunto considerable de datos que se han tratado adecuadamente. Para obtener la distancia de migración, el programa pidió como *input* los ejes centrales y el ancho del cauce con lo que devolvió una hoja de Excel con los valores solicitados. Graficando lo anterior, se obtuvo un espectro de migración de distancias. Además, se realizaron los ajustes estadísticos necesarios y se obtuvo la media de las migraciones y la tasa anual ya que el programa arrojó los resultados de migración en forma de tabla de la siguiente forma  $d_{output} = C_i \cdot \Delta t$ . Para hallar la tasa de migración, solamente fue necesario dividir la distancia que se obtuvo entre el lapso de tiempo tomado. Adicionalmente, se realizaron arreglos estadísticos para obtener todos los gráficos necesarios y las regresiones para obtener fórmulas generales para el caso de los ríos meándricos pertenecientes a la Región Hidrográfica del Amazonas en hojas de Excel, que se encuentran en el CD adjunto como Anexo D y E.



Finalmente, se hicieron comparaciones con resultados obtenidos con otros autores y se obtuvieron gráficas que compararon el comportamiento de los ríos meándricos en esta Región Hidrográfica con los de otras zonas del mundo. Asimismo, se determinó la tendencia seguida por los ríos estudiados para establecer un determinado patrón en la migración de los mismos.

### **2.1.2. *Planform Statics Tools***

Esta herramienta ha sido desarrollada por el Centro Nacional para la Dinámica de la Superficie Terrestre (*National Center for Earth-Surface Dynamics*) y es un complemento para la plataforma de ArcGIS 9.2 y 10. Mediante una serie de algoritmos, hace uso del lenguaje de programación *Visual Basic VBA* para dos funciones principales, importantes para el desarrollo de la presente tesis. La primera de ellas consistió en hallar el eje principal del río y la segunda fue determinar la distancia de migración entre dos líneas determinadas, que en este caso se utilizó para determinar dicha distancia entre dos ejes de ríos en dos tiempos diferentes (*Lagasee, 2005*). Adicionalmente, arrojó valores de propiedades geométricas del río, como curvatura, ancho de cauce, ángulo de deflexión, radio de curvatura, entre otros (*NCED, 2006*). En el Anexo A – 4 se ha elaborado un manual de uso de esta herramienta en castellano para su uso por cualquier estudiante.

## **2.2. CARACTERÍSTICAS FLUVIOMORFOLÓGICAS PRINCIPALES**

### **2.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS RÍOS Y SU CUENCA**

#### **2.2.1.1. CLIMA Y PRECIPITACIÓN**

El clima en esta región hidrográfica se caracteriza por ser cálido tropical. Además, llueve durante gran parte del año, con énfasis en los inicios del año y mediados del mismo. Un promedio de lluvia que se obtiene de la zona es entre 2000 y 3000 mm al año. Algunos ejemplos se pueden encontrar en pantanos, sabanas y selvas. Las temperaturas que se pueden encontrar en esta zona superan los 18° C. La humedad relativa anual es de 80% y la velocidad del viento oscila entre los 3 y 10 km/h (*SENAMHI, 2014*).

### 2.2.1.2. VEGETACIÓN

La vegetación en esta región es densa y húmeda. Esta se puede dividir en tres tipos, según la altura y la filtración del sol (MINAM, 2011):

- La Bóveda del Bosque: En esta zona predominan los árboles gigantes, cuya altura fluctúa entre los 40 y 60 m y cuyas raíces son extremadamente grandes. Es el nivel que recibe mayor cantidad de radiaciones solares y el más rico en especies animales (aves, insectos, mamíferos).
- Nivel Intermedio: En esta zona se encuentran especies cuya altura oscila entre los 10 y 40 m y las cuales están adaptadas a las sombras.
- Sotobosque: Es el área que crece más cerca del suelo. La luz apenas llega y existe una abundancia de organismos descomponedores de hojas.

La importancia de la vegetación Amazónica radica en los siguientes puntos:

- Regula el curso de los ríos que lo atraviesan al retener una parte del agua procedente de las lluvias e ir liberándola paulatinamente.
- La espesa cubierta vegetal y las raíces profundas de los árboles gigantes protegen los suelos de la erosión.
- Regula el clima a nivel regional y es un gran pulmón que brinda oxígeno.

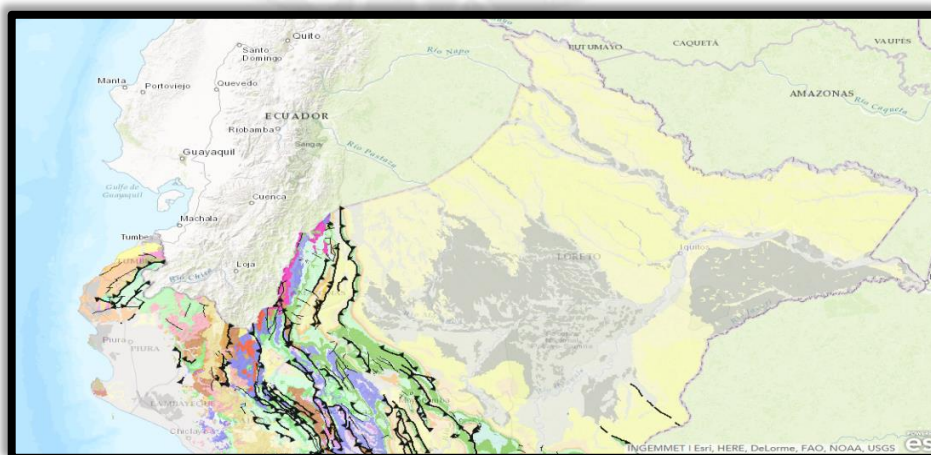
### 2.2.1.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

En la Amazonía peruana, los suelos tropicales son abundantes, ocupan las dos terceras partes del territorio y presentan propiedades y mecanismos que controlan su comportamiento mucho más complejos que los suelos transportados del resto del país. La región Hidrográfica del Amazonas presenta una gran diversidad litológica generada a lo largo de los diferentes periodos, los cuales van desde ígneos hasta metamórficos, pasando por los volcánicos y sedimentarios. Estos se manifiestan en diferentes ambientes de sedimentación, cuencas, intrusiones básicas y ácidas y efusiones volcánicas, correspondientes a las regiones de la Selva Alta y la Selva Baja. El suelo es poco fértil y cuenta con una capa de humus muy delgada, la cual se destruye al desaparecer la cubierta vegetal (Paz Soldan, 1862).

De acuerdo a algunos estudios, se puede concluir que en la selva alta y en los límites de la selva baja se encuentran tanto rocas ígneas como sedimentarias,

mientras que en la selva baja predominan las rocas sedimentarias del terciario y cuaternario, y están constituidas principalmente por areniscas, lutitas y arcillitas. En cambio, las rocas ígneas que se encuentran en la selva alta son el granito, andesita, y tipos volcánicos, mientras que las del tipo sedimentario son las areniscas, pizarras, calizas y dolomitas. Asimismo, en la roca madre que originó los suelos de la selva alta predominan los materiales residuales como los transportados, lo cual da paso a los suelos litocambosólicos y acrisoles mientras que en la selva baja predominan los materiales residuales que dan paso a los suelos calcáreos, arcillosos y con presencia de lutita, arenisca y rocas ígneas (INGENMET, 2011).

La geomorfología de la zona Amazónica sugiere que la selva baja es casi en su totalidad plana y su altura varía entre los 80 y 400 m.s.n.m. Como consecuencia, los ríos en esta zona discurren lentamente y los caudales son pequeños, por lo que, en épocas de sequía, suelen formarse con mayor facilidad los denominados brazos de meandro. Generalmente, esta región se encuentra en estado de madurez o avanzada erosión. Este se caracteriza por su gran humedad y terreno cubierto por su densa vegetación tropical, además que se encuentra levemente inclinada hacia el Este y comprende las llanuras de Loreto y Madre de Dios. El territorio es suavemente ondulado, por el despliegue de amplias superficies planas, lomadas y zonas colinosas bajas, depresiones, terrazas aluviales, etc., modelados en sedimentos blandos y subhorizontales del terciario superior y aluviales del cuaternario. La llanura esta íntegramente drenada por los ríos Marañón, Huallaga y Ucayali, formadores del gran Amazonas y su sistema de tributarios, como se observa en la Figura 2.1 (Carrillo, 1994). En el Anexo A – 3 se detalla más las principales características de la Cuenca del Amazonas.



**Figura 2.1:** Mapa Geológico del Perú (INGEMMET)



La sinuosidad del río, según la tabla 2.1, ha venido disminuyendo a lo largo de los años, tendiendo a estar cerca del valor de 1.7. La diferencia en la pendiente es debido a cortes de meandro que produjeron disminución en el incremento la sinuosidad.

### **2.2.3. Río Corrientes**

#### **2.2.3.1. Ubicación**

El Río Corrientes se ubica en el departamento de Loreto y pertenece a la Cuenca del Marañón. Tiene una longitud de, aproximadamente, 450 km. Las coordenadas del tramo seleccionado son:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 452872.00 m E / 75.42° O

Coordenada Norte – Sur: 9414026.00 m S / 3.49° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 549236.00 m E / 74.56° O

Coordenada Norte – Sur: 9586538.00 m S / 3.74° S

#### **2.2.3.2. Longitud de estudio y pendiente**

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 215 km, aproximadamente, el cual corresponde al tramo con mayor cantidad de meandros. Además, la pendiente media del cauce principal es  $S=0.00003$  m/m.

#### **2.2.3.3. Características Geométricas del Río Corrientes**

El río Corrientes, según la clasificación de *Leopold y Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

#### **2.2.3.4. Sinuosidad**

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.2:



**Tabla 2.2:** Cálculo de la sinuosidad – Río Corrientes

Río Corrientes				
	Año			Sinuosidad
	1988	1999	2011	
L <sub>v</sub> (km)	138.50	135.01	136.31	Sv
L <sub>VR</sub> (km)	100.35	103.37	103.38	
L <sub>R</sub> (km)	209.61	217.12	216.37	Sr
S (Sinuosidad)	1.51	1.61	1.59	

La sinuosidad del río Corrientes, según la tabla 2.2, ha venido manteniéndose en el valor de 1.6, aproximadamente. Cabe resaltar que entre el año 2000 y 2010 hay una mayor pendiente (descendiente) que entre el año 1990 y 2000, en la cual el valor es el mismo, ello debido a los cortes de meandro existentes en la zona y a la migración.

## 2.2.4. Río Curaray

### 2.2.4.1. Ubicación

El Río Curaray se ubica en los países de Perú y de Ecuador, es afluente del río Napo y pertenece a la cuenca del Napo. Tiene una longitud de, aproximadamente, 800 km. Las coordenadas del tramo son:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 322831.00 m E / 76.59° O

Coordenada Norte – Sur: 9834847.00 m S / 1.49° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 600884.00 m E / 74.09° O

Coordenada Norte – Sur: 9738976.00 m S / 2.36° S

### 2.2.4.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió fue de 760 km, aproximadamente. Además, la pendiente media del cauce es  $S=0.00003$  m/m.

### 2.2.4.3. Características Geométricas del río Curaray

El río Curaray, según la clasificación de *Leopold y Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

### 2.2.4.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.3:

**Tabla 2.3:** Cálculo de la sinuosidad – Río Curaray

Río Curaray							
	Año			Sinuosidad			
	1989	2000	2011				
$L_v$ (km)	336.40	336.50	340.10	$S_v$	1.15	1.15	1.16
$L_{vR}$ (km)	293.70	293.73	293.62	$S_r$	2.29	2.26	2.23
$L_R$ (km)	769.21	759.85	758.80				
S (Sinuosidad)	2.29	2.26	2.23				

La sinuosidad del río Curaray, según la tabla 2.3, ha venido manteniéndose en el valor de 2.25, aproximadamente, y va decreciendo paulatinamente debido a la migración, erosión y a los cortes de meandro.

### 2.2.5. Río Jangosa

#### 2.2.5.1. Ubicación

El Río Jangosa se ubica en el departamento de Loreto. Tiene una longitud de, aproximadamente, 230 km. Las coordenadas del tramo seleccionado son:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 757870.00 m E / 72.68° O

Coordenada Norte – Sur: 9654794.00 m S / 3.12° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 812714.00 m E / 72.19° O

Coordenada Norte – Sur: 9614036.00 m S / 3.49° S

### 2.2.5.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 160 km, aproximadamente. Además, la pendiente media del cauce es  $S=0.00003$  m/m.

### 2.2.5.3. Características Geométricas del río Jangosa

El río Jangosa, según la clasificación de *Leopold y Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

### 2.2.5.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.4:

**Tabla 2.4:** Cálculo de la sinuosidad – Río Jangosa

Río Jangosa							
	Año			Sinuosidad			
	1990	2000	2010				
$L_v$ (km)	86.30	84.90	82.20	$S_v$	1.25	1.23	1.19
$L_{vR}$ (km)	69.10	69.20	69.04	$S_r$	1.87	1.87	1.89
$L_R$ (km)	161.39	159.14	155.16				
<b>S (Sinuosidad)</b>	<b>1.87</b>	<b>1.87</b>	<b>1.89</b>				

La sinuosidad del río Jangosa, según la tabla 2.4, ha venido manteniéndose en el valor de 1.88, aproximadamente.

### 2.2.6. Río Javari Mirim

#### 2.2.6.1. Ubicación

El Río Javari Mirim discurre por el departamento de Loreto y pertenece a la Cuenca de Yavari. Tiene una longitud de, aproximadamente, 300 km. Las coordenadas del tramo seleccionado en coordenadas UTM y en grados sexagesimales son las siguientes:

Punto Inicial (Zona: 18S):

Coordenada Este – Oeste: 743659.00 m E / 72.80° O

Coordenada Norte – Sur: 9482762.00 m S / 4.68° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 170027.00 m E / 71097° O

Coordenada Norte – Sur: 9522675.00 m S / 4.31° S

### 2.2.6.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 215 km, aproximadamente. Además, la pendiente media del cauce es  $S=0.00013$  m/m.

### 2.2.6.3. Características Geométricas del río Javari Mirim

El río Javari Mirim, según la clasificación de *Leopold y Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

### 2.2.6.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.5:

**Tabla 2.5:** Cálculo de la sinuosidad – Río Javari Mirim

Río Javari Mirim						
	Año			Sinuosidad		
	1987	2001	2009	Sv	Sr	Sr
$L_v$ (km)	116.68	115.56	116.80	1.16	1.15	1.16
$L_{vR}$ (km)	100.61	100.67	100.74	1.85	1.85	1.83
$L_R$ (km)	215.37	213.25	213.16			
<b>S (Sinuosidad)</b>	<b>1.85</b>	<b>1.85</b>	<b>1.83</b>			

La sinuosidad del río Jangosa, según la tabla 2.5, ha venido manteniéndose en el valor de 1.85, aproximadamente.

### 2.2.7. Río Maniti

#### 2.2.7.1. Ubicación

El Río Maniti se ubica en Iquitos y pertenece a la cuenca del Amazonas. Tiene una longitud de, aproximadamente, 250 km. Las coordenadas del tramo seleccionado son las siguientes, tanto en UTM como en grados sexagesimales:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 726391.00 m E / 72.96° O

Coordenada Norte – Sur: 9600926.00 m S / 3.61° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 737310.00 m E / 72.86° O

Coordenada Norte – Sur: 9566514.00 m S / 3.92° S

### 2.2.7.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 115 km. Además, la pendiente media del cauce principal es  $S=0.00036$  m/m.

### 2.2.7.3. Características Geométricas del río Maniti

El río Maniti, según la clasificación de *Leopold* y *Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

### 2.2.7.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.6:

**Tabla 2.6:** Cálculo de la sinuosidad – Río Maniti

Río Maniti			
	Año		
	1987	2001	2009
$L_v$ (km)	58.70	58.40	56.97
$L_{vR}$ (km)	36.13	36.21	36.10
$L_R$ (km)	119.70	114.60	113.58
S (Sinuosidad)	2.04	1.96	1.99

Sinuosidad			
$S_v$	1.62	1.61	1.58
$S_r$	2.04	1.96	1.99

La sinuosidad del río Jangosa, según la tabla 2.6, ha venido manteniéndose en el valor de 2, aproximadamente, debido, principalmente, a los cortes de meandro.



## 2.2.8. Río Mazán

### 2.2.8.1. Ubicación

El Río Mazán se ubica en el departamento de Loreto y pertenece a la Cuenca del Napo. Tiene una longitud de 600 km. Las coordenadas del tramo seleccionado son las siguientes, tanto en UTM como en grados sexagesimales:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 548393.00 m E / 74.56° O

Coordenada Norte – Sur: 9717784.00 m S / 2.55° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 711383.00 m E / 73.1° O

Coordenada Norte – Sur: 9613145.00 m S / 3.5° S

### 2.2.8.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 470 km, aproximadamente. Además, la pendiente media del cauce es  $S = 0.00013$  m/m.

### 2.2.8.3. Características Geométricas del río Mazán

El río Mazán, según la clasificación de *Leopold y Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

### 2.2.8.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.7:

**Tabla 2.7:** Cálculo de la sinuosidad – Río Mazán

Río Mazán			
	Año		
	1988	2000	2010
$L_v$ (km)	233.05	237.37	232.70
$L_{vR}$ (km)	193.26	193.57	193.25
$L_R$ (km)	477.58	472.27	468.00
S (Sinuosidad)	2.05	1.99	2.01

Sinuosidad			
	1988	2000	2010
Sv	1.21	1.23	1.20
Sr	2.05	1.99	2.01

La sinuosidad del río Jangosa, según la tabla 2.7, ha venido manteniéndose en el valor de 2.02, aproximadamente.

## **2.2.9. Río Morona**

### **2.2.9.1. Ubicación**

El Río Morona discurre por los países de Perú y Ecuador y pertenece a la Cuenca del Marañón. Tiene una longitud de, aproximadamente, 550 km. Las coordenadas del tramo seleccionado son las siguientes, tanto en UTM como en grados sexagesimales:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 548393.00 m E / 74.56° O

Coordenada Norte – Sur: 9717784.00 m S / 2.55° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 711383.00 m E / 73.1° O

Coordenada Norte – Sur: 9613145.00 m S / 3.5° S

### **2.2.9.2. Longitud de estudio y pendiente**

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 525 km, aproximadamente. Además, la pendiente media es  $S = 0.00006$  m/m.

### **2.2.9.3. Características Geométricas del río Morona**

El río Morona, según la clasificación de *Leopold y Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

### **2.2.9.4. Sinuosidad**

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.8:

**Tabla 2.8:** Cálculo de la sinuosidad – Río Morona

Río Morona				
	Año			Sinuosidad
	1987	1999	2010	
L <sub>v</sub> (km)	290.10	288.80	287.40	Sv
L <sub>vR</sub> (km)	237.00	237.67	237.37	Sr
L <sub>R</sub> (km)	529.89	523.63	528.90	
S (Sinuosidad)	1.83	1.81	1.84	

La sinuosidad del río Morona, según la tabla 2.8, ha venido manteniéndose en el valor de 1.82, aproximadamente.

## 2.2.10. Río Nanay

### 2.2.10.1. Ubicación

El Río Nanay se ubica en el departamento de Loreto y es un afluente del Amazonas. Tiene una longitud de 315 km. Las coordenadas del tramo seleccionado son las siguientes, tanto en UTM como en grados sexagesimales:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 611512.00 m E / 74.00° O

Coordenada Norte – Sur: 9576541.00 m S / 3.83° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 9590667.00 m E / 73.25° O

Coordenada Norte – Sur: 694728.00 m S / 3.7° S

### 2.2.10.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 230 km, aproximadamente. Además, la pendiente media del cauce principal es 0.0002.

### 2.2.10.3. Características Geométricas del río Nanay

El río Nanay, según la clasificación de *Leopold* y *Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

#### 2.2.10.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.9:

**Tabla 2.9:** Cálculo de la sinuosidad – Río Nanay

Río Nanay							
	Año			Sinuosidad			
	1987	2001	2009				
$L_v$ (km)	98.76	99.00	99.04	Sv	1.11	1.12	1.13
$L_{vR}$ (km)	88.60	88.62	88.00				
$L_R$ (km)	230.77	231.73	232.80	Sr	2.34	2.34	2.35
S (Sinuosidad)	2.34	2.34	2.35				

La sinuosidad del río Nanay, según la tabla 2.9, ha venido manteniéndose en el valor de 2.34, aproximadamente.

#### 2.2.11. Río Tambo Yacu

##### 2.2.11.1. Ubicación

El río Tambo Yacu se ubica en el departamento de Loreto. Tiene una longitud aproximada de 430 km. Las coordenadas del tramo seleccionado son las siguientes, tanto en UTM como en grados sexagesimales:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 733624.00 m E / 72.9° O

Coordenada Norte – Sur: 9536757.00 m S / 4.19° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 705881.00 m E / 73.15° O

Coordenada Norte – Sur: 9554449.00 m S / 4.03° S

##### 2.2.11.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se analizó fue de 430 km, aproximadamente. Además, la pendiente media del cauce principal es 0.0001 m/m.

### 2.2.11.3. Características Geométricas del río Tambo Yacu

El río Tambo Yacu, según la clasificación de *Leopold y Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

### 2.2.11.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.10:

**Tabla 2.10:** Cálculo de la sinuosidad – Río Tambo Yacu

Río Tambo-Yacu							
	Año			Sinuosidad			
	1988	2000	2010				
$L_v$ (km)	146.27	147.42	148.15	$S_v$	1.30	1.31	1.32
$L_{vR}$ (km)	112.51	112.66	112.62	$S_r$	2.01	1.97	1.96
$L_R$ (km)	294.69	290.07	290.57				
S (Sinuosidad)	2.01	1.97	1.96				

La sinuosidad del río Tambo Yacu, según la tabla 2.10, ha venido disminuyendo hasta 1.96, aproximadamente.

### 2.2.12. Río Tamshiyacu

#### 2.2.12.1. Ubicación

El Río Tamshiyacu se ubica en el departamento de Loreto y pertenece a la Cuenca del Amazonas. Tiene una longitud de, aproximadamente, 180 km. Las coordenadas del tramo seleccionado son las siguientes, tanto en UTM como en grados sexagesimales:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 733624.00 m E / 72.9° O

Coordenada Norte – Sur: 9536757.00 m S / 4.19° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 705881.00 m E / 73.15° O

Coordenada Norte – Sur: 9554449.00 m S / 4.03° S



### 2.2.12.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 70 km, aproximadamente. Además, la pendiente media del cauce principal es 0.0003.

### 2.2.12.3. Características Geométricas del río Tamshiyacu

El río Tamshiyacu, según la clasificación de *Leopold* y *Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

### 2.2.12.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.11:

**Tabla 2.11:** Cálculo de la sinuosidad – Río Tamshiyacu

Río Tamshiyacu							
	Año			Sinuosidad			
	1987	2001	2009				
L <sub>v</sub> (km)	36.48	36.59	36.10	Sv	1.10	1.11	1.09
L <sub>vR</sub> (km)	33.04	33.02	32.97	Sr	1.93	1.84	1.85
L <sub>R</sub> (km)	70.26	67.35	66.90				
S (Sinuosidad)	1.93	1.84	1.85				

La sinuosidad del río Tamshiyacu, según la tabla 2.11, ha venido disminuyendo hasta 1.85, aproximadamente.

### 2.2.13. Río Tigre

#### 2.2.13.1. Ubicación

El río Tigre es una se ubica en Perú y Ecuador y pertenece a la Cuenca del Marañón y recorre el territorio amazónico del departamento de Loreto. Tiene una longitud de 598 km. Las coordenadas del tramo seleccionado son las siguientes, tanto en UTM como en grados sexagesimales:

Punto Inicial (Zona 18S)

Coordenada Este – Oeste: 464310.0 m E / 75.32° O

Coordenada Norte – Sur: 9667083.0 m S / 3.01° S

Punto Final (Zona 18S)

Coordenada Este – Oeste: 601748.0 m E / 74.08° O

Coordenada Norte – Sur: 9505332.0 m S / 4.47° S

### 2.2.13.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 465 km, aproximadamente. Además, la pendiente media del cauce principal es 0.0002.

### 2.2.13.3. Características Geométricas del río Tigre

El río Tigre, según la clasificación de *Leopold y Wolman*, es un río Meándrico. Por otro lado, para la clasificación hecha por *Lane*, el río Tigre se encontraría en una transición entre río Trenzado y Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados

### 2.2.13.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.12:

**Tabla 2.12:** Cálculo de la sinuosidad – Río Tigre

Río Tigre				
	Año			Sinuosidad
	1988	1999	2011	
$L_v$ (km)	249.33	248.04	247.47	$S_v$ 1.16 1.15 1.15
$L_{vR}$ (km)	215.13	214.90	215.05	$S_r$ 1.87 1.88 1.88
$L_R$ (km)	465.04	465.86	466.27	
S (Sinuosidad)	1.87	1.88	1.88	

La sinuosidad del río Tigre, según la tabla 2.12, ha venido manteniéndose estable en un valor de 1.88, aproximadamente.

### 2.2.14. Río Yanu – Apaga

#### 2.2.14.1. Ubicación

El Río Yanu-Apaga se ubica en el departamento de Loreto y pertenece a la Cuenca del Marañón. Tiene una longitud de, aproximadamente, 350 km. Las coordenadas

del tramo seleccionado son las siguientes, tanto en UTM como en grados sexagesimales:

Punto Inicial (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 452872.00 m E / 75.42° O

Coordenada Norte – Sur: 9414026.00 m S / 3.49° S

Punto Final (Zona 18S):

Coordenada Este – Oeste: 549236.00 m E / 74.56° O

Coordenada Norte – Sur: 9586538.00 m S / 3.74° S

#### 2.2.14.2. Longitud de estudio y pendiente

La longitud del cauce del tramo principal que se estudió y analizó fue de 215 km, aproximadamente, el cual corresponde al tramo con mayor cantidad de meandros. Además, la pendiente media del cauce principal es  $S=0.00003$  m/m.

#### 2.2.14.3. Características Geométricas del río Yanu-Apaga

El río Yanu-Apaga, según la clasificación de *Leopold* y *Wolman*, es un río Meándrico. En el Anexo A – 1 se muestra la determinación de la clasificación del río de acuerdo a los criterios mencionados y sus características geométricas.

#### 2.2.14.4. Sinuosidad

Con los parámetros que se tomaron de mediciones de cada año de análisis, se calcula la sinuosidad del río, como se observa en la Tabla 2.13:

**Tabla 2.13:** Cálculo de la sinuosidad – Río Yanu – Apaga

Río Yanu-Apaga												
	Año			Sinuosidad								
	1987	1999	2009									
$L_v$ (km)	45.76	46.43	44.84	<table border="1"> <tr> <td><math>S_v</math></td> <td>1.31</td> <td>1.33</td> <td>1.29</td> </tr> <tr> <td><math>S_r</math></td> <td>2.05</td> <td>2.07</td> <td>2.14</td> </tr> </table>	$S_v$	1.31	1.33	1.29	$S_r$	2.05	2.07	2.14
$S_v$	1.31	1.33	1.29									
$S_r$	2.05	2.07	2.14									
$L_{vR}$ (km)	34.91	35.03	34.76									
$L_R$ (km)	93.60	96.25	95.99									
<b>S (Sinuosidad)</b>	<b>2.05</b>	<b>2.07</b>	<b>2.14</b>									

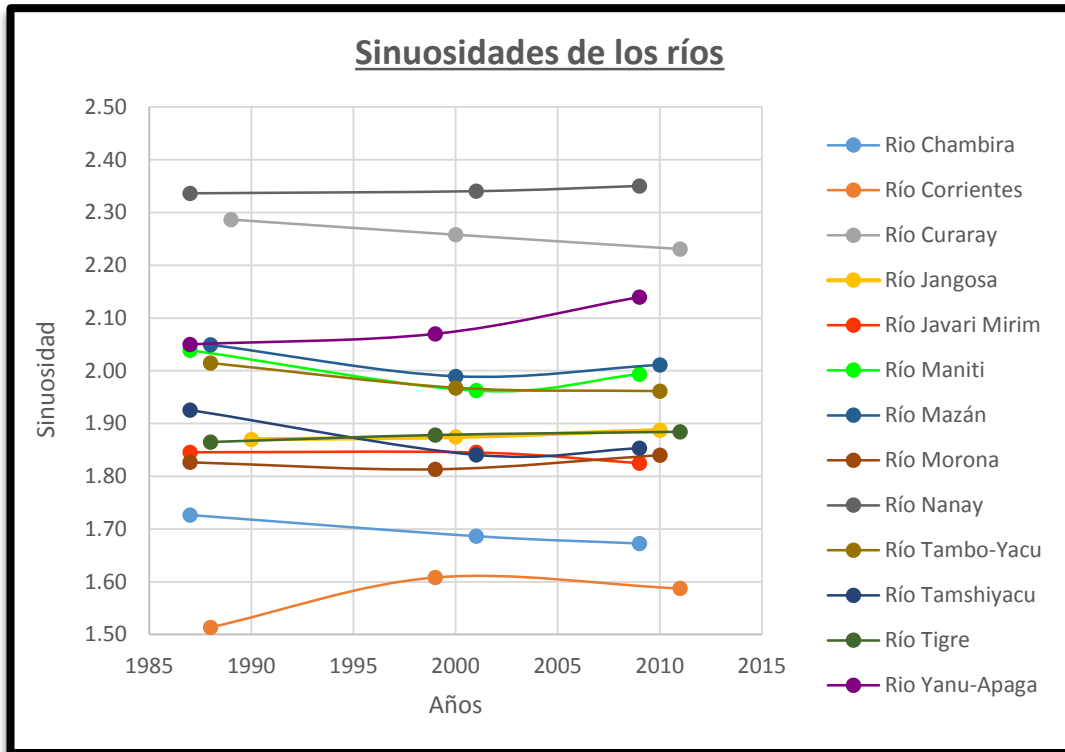
La sinuosidad del río Yanu Apaga, según la tabla 2.13, ha venido manteniéndose en el valor de 1.6, aproximadamente. Cabe resaltar que entre el año 2000 y 2010 hay una mayor pendiente (descendente) que entre el año 1990 y 2000, en la cual el valor es el mismo.

A continuación, se muestra el cuadro resumen (Tabla 2.14) de los valores de radio de curvatura ( $R_c$ ), longitud de onda ( $\lambda$ ) y ancho promedio ( $W$ ) de los 13 ríos analizados. Para el cálculo de los parámetros geométricos ( $R$ ,  $\lambda$ ,  $W$ ,  $A$ ) se hicieron mediciones en el eje del río para distintos años, dando como tendencia a mantener como promedio los valores señalados, las cuales son las principales referencias de la geometría de cada río.

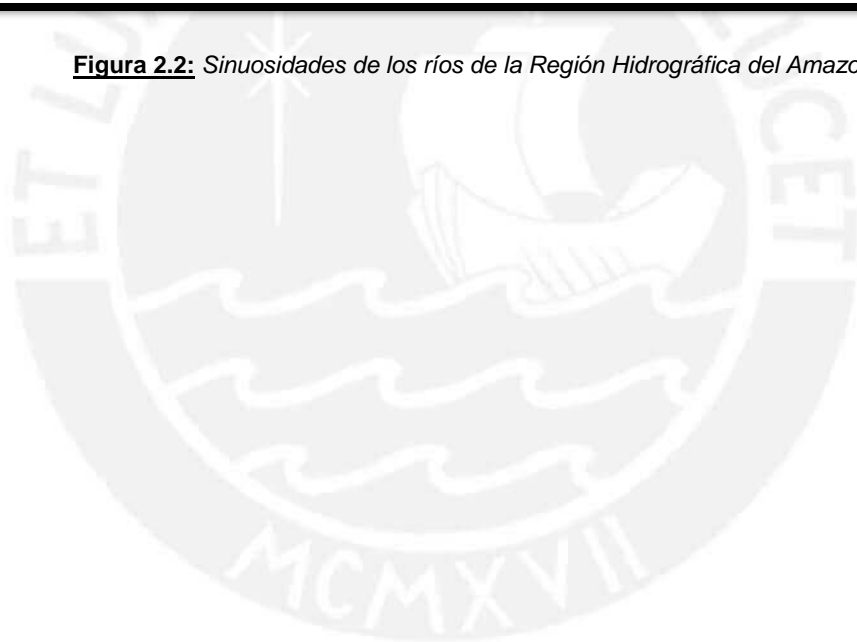
**Tabla 2.14:** Valores promedio de los parámetros geométricos de los 13 ríos analizados

Río	Longitud de onda promedio (m)	Amplitud de meandro promedio (m)	Radio de Curvatura promedio (m)	Ancho de canal promedio (m)	Curvatura promedio (m)
<b>Chambira</b>	638.86	300.00	237.83	77.38	0.0042
<b>Corrientes</b>	2047.33	700.00	840.55	110.14	0.0012
<b>Curaray</b>	2387.67	900.00	754.67	159.91	0.0013
<b>Jangosa</b>	539.95	450.00	178.50	51.80	0.0056
<b>Javari Mirim</b>	898.87	500.00	291.64	63.37	0.0034
<b>Maniti</b>	435.50	250.00	163.23	47.29	0.0061
<b>Mazán</b>	851.81	425.00	263.64	62.98	0.0038
<b>Morona</b>	2177.49	1000.00	750.92	161.42	0.0013
<b>Nanay</b>	1668.05	800.00	536.06	155.92	0.0019
<b>TamboYacu</b>	740.77	600.00	243.90	62.97	0.0041
<b>Tamshiyacu</b>	541.15	300.00	150.70	32.54	0.0066
<b>Tigre</b>	3162.16	1000.00	839.68	212.79	0.0012
<b>Yanu-Apaga</b>	943.24	600.00	335.69	56.01	0.0030

Asimismo, en la Figura 2.2, se muestra la gráfica de los valores obtenidos de las sinuosidades de los ríos a lo largo de los años señalados. Se observa que la tendencia natural es que estos valores oscilen entre 1.5 y 2.5, lo cual es una característica de los ríos meándricos para la zona de la Región Hidrográfica del Amazonas



**Figura 2.2:** Sinuosidades de los ríos de la Región Hidrográfica del Amazonas

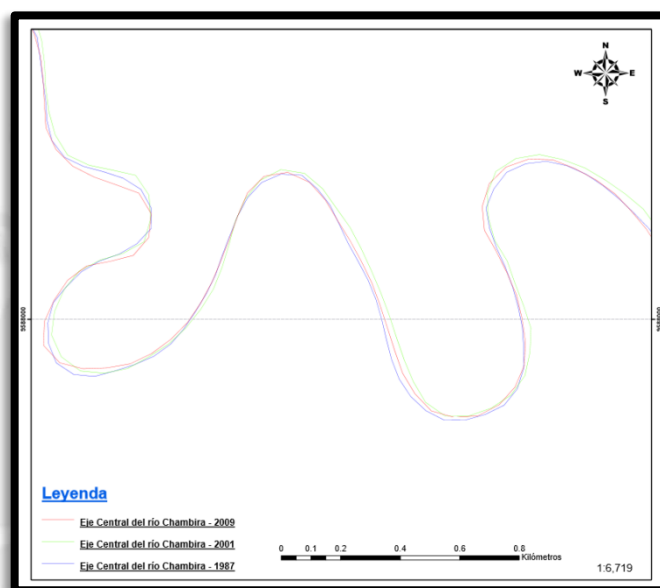




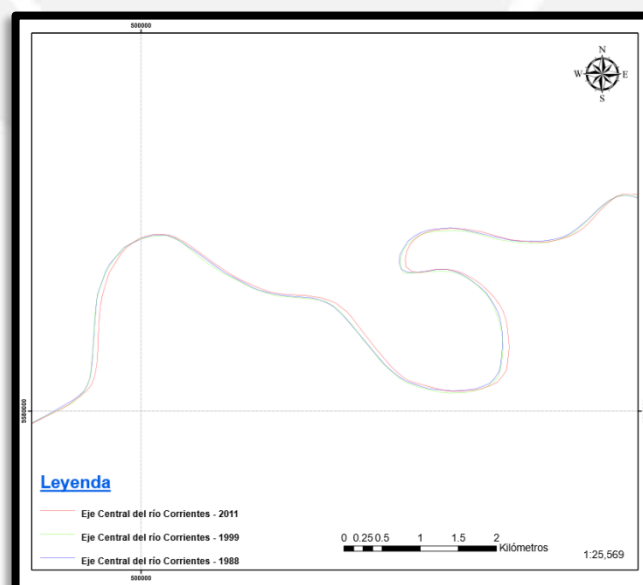
## CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Migración de Ríos

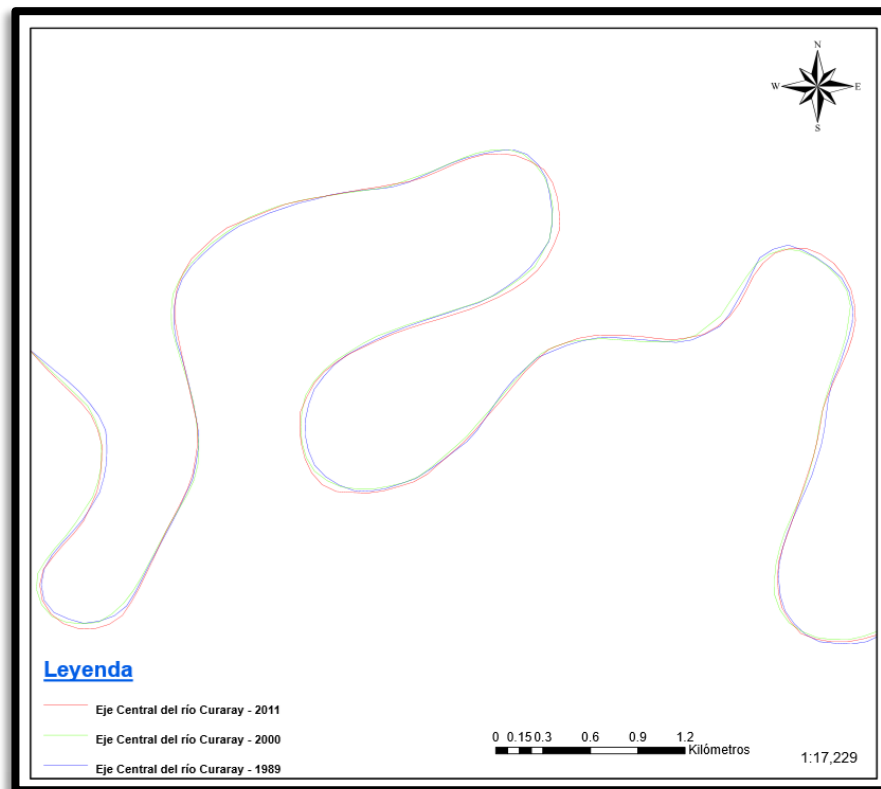
Para el análisis de migración de todos los ríos se utilizó un conjunto de imágenes satelitales, para elaborar un análisis multitemporal de evolución del río. Las imágenes utilizadas corresponden a los años 1990, 2000 y 2010. A continuación, se muestran las Figuras 3.1 a 3.13 que contienen el traslape de imágenes. Así mismo, en el Anexo C se muestran los planos completos.



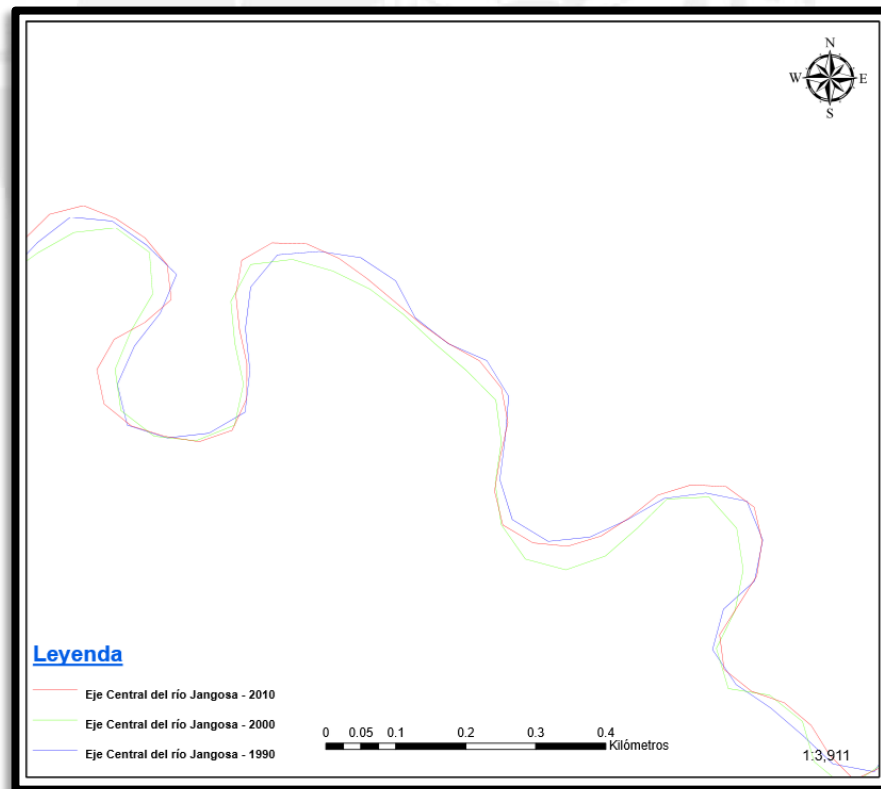
**Figura 3.1:** Evolución del río Chambira entre los años 1987 y 2009



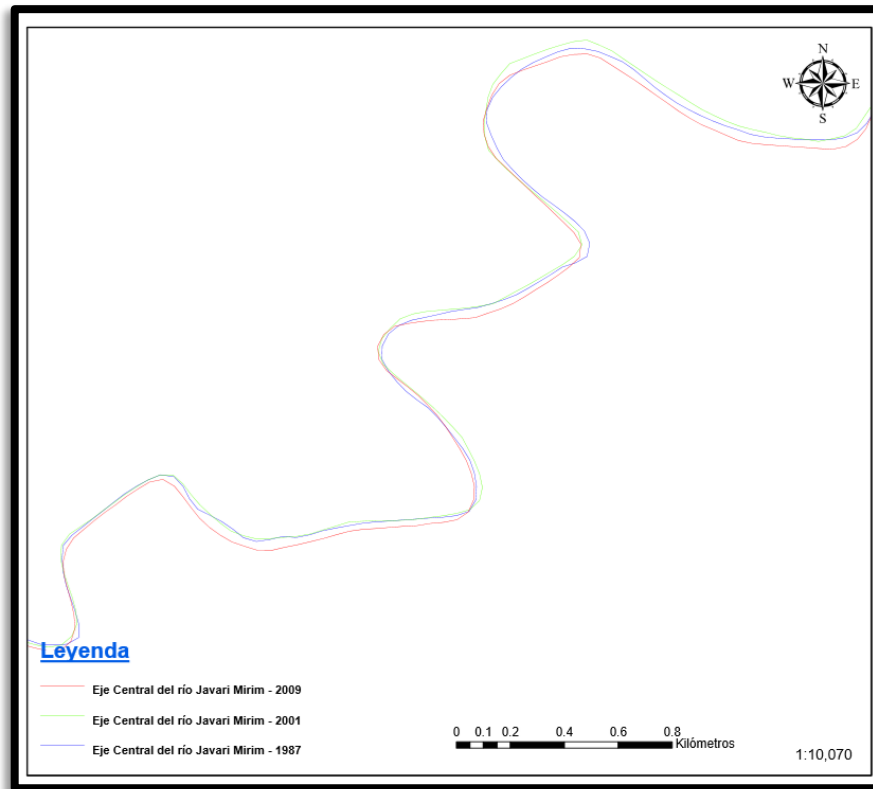
**Figura 3.2:** Evolución del río Corrientes entre los años 1988 y 2011



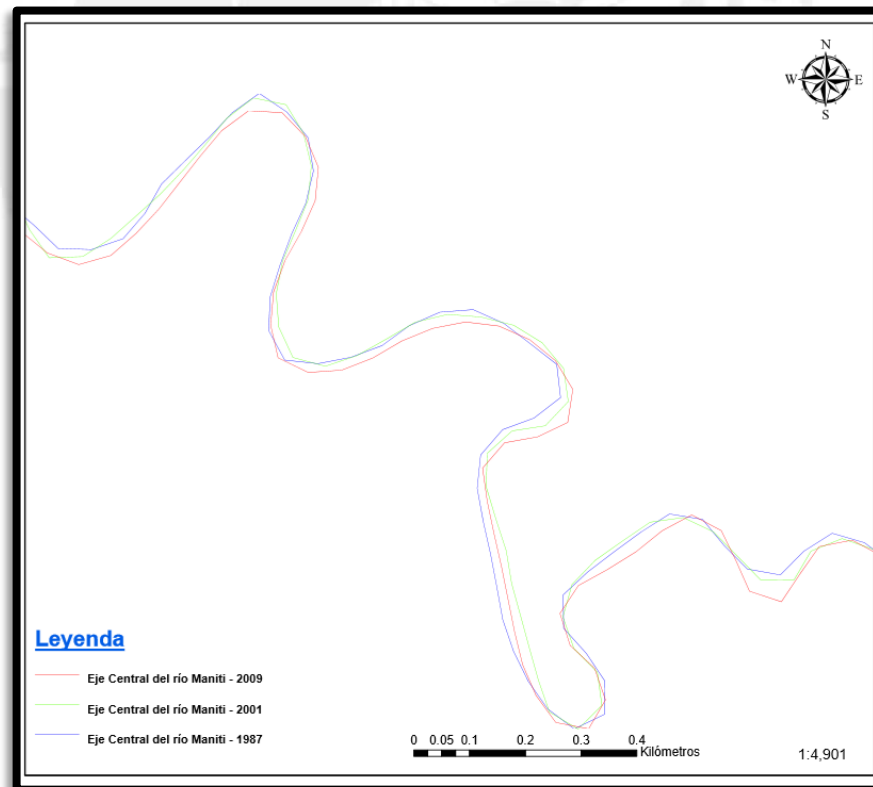
**Figura 3.3:** Evolución del río Curaray entre los años 1989 y 2011



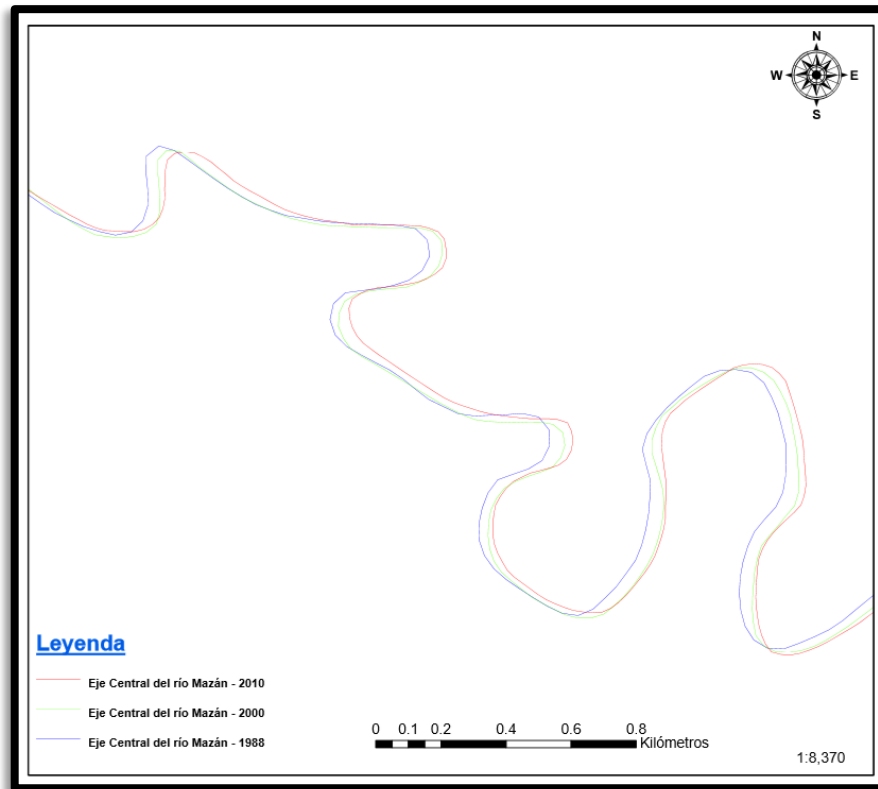
**Figura 3.4:** Evolución del río Jangosa entre los años 1990 y 2010



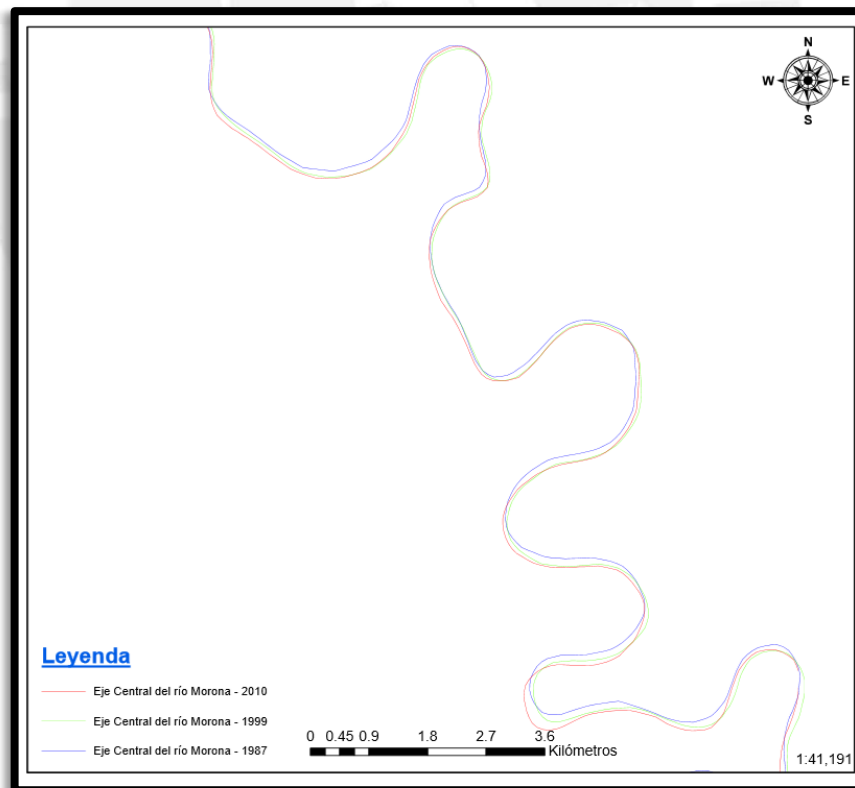
**Figura 3.5:** Evolución del río Javari Mirim entre los años 1987 y 2009



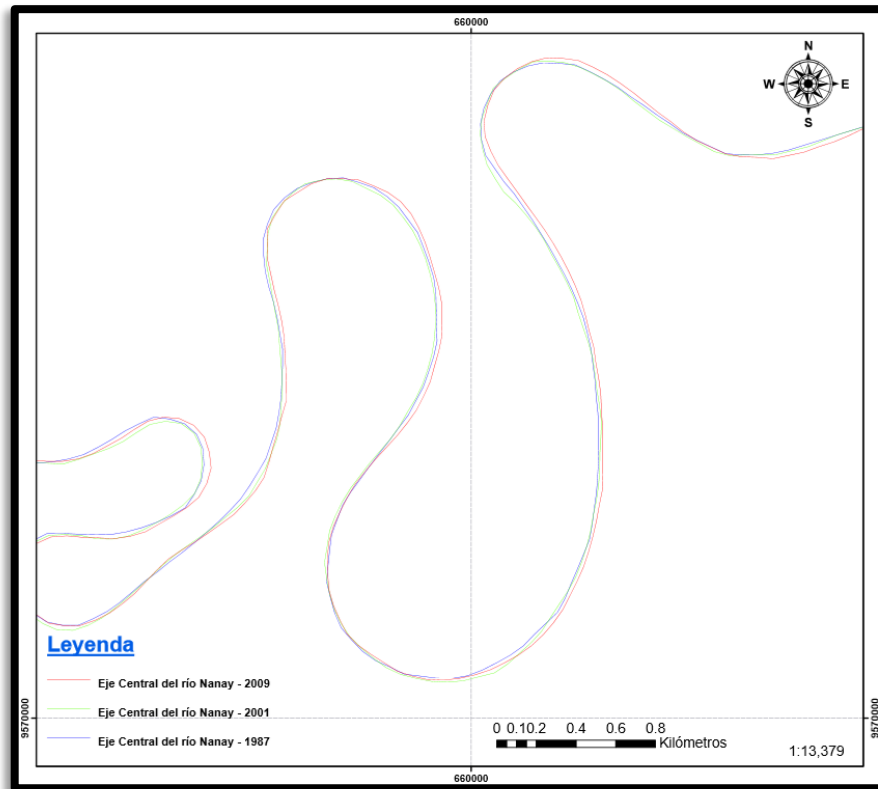
**Figura 3.6:** Evolución del río Maniti entre los años 1987 y 2009



**Figura 3.7:** Evolución del río Mazán entre los años 1988 y 2010



**Figura 3.8:** Evolución del río Morona entre los años 1987 y 2010

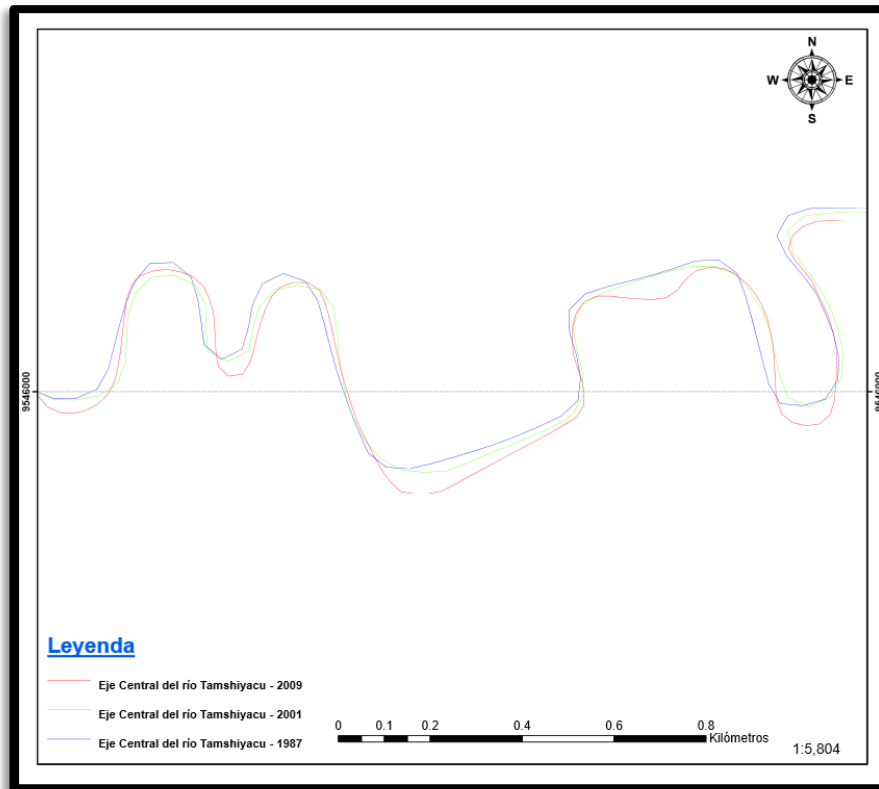


**Figura 3.9:** Evolución del río Nanay entre los años 1987 y 2009

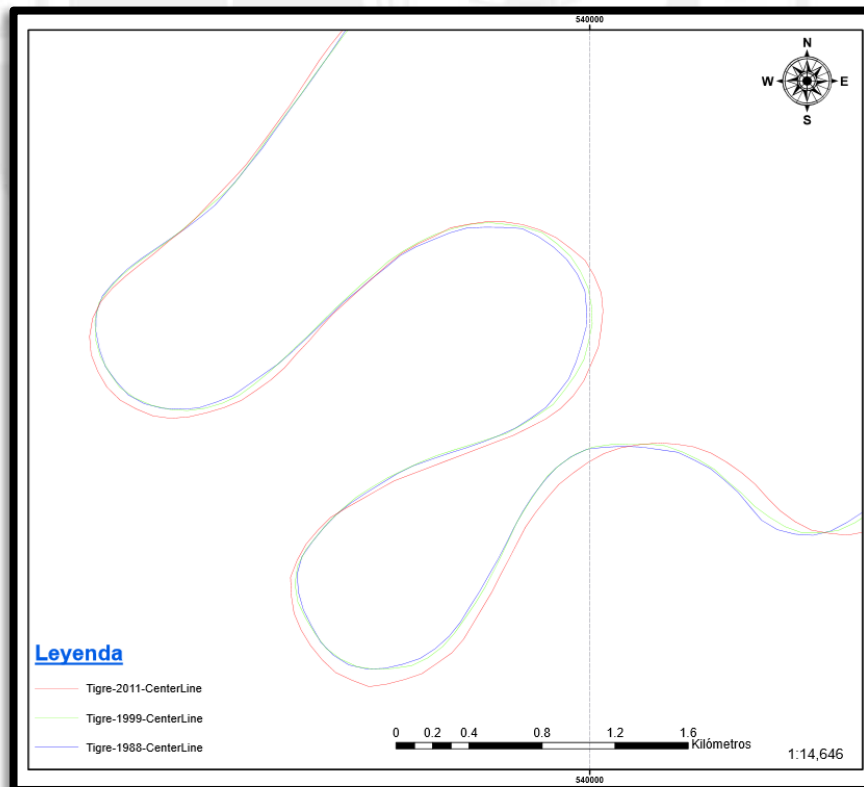


**Figura 3.10:** Evolución del río Tambo Yacu entre los años 1988 y 2010





**Figura 3.11:** Evolución del río Tamshiyacu entre los años 1987 y 2009



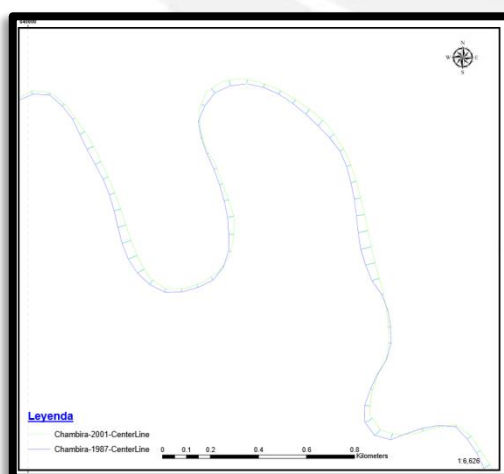
**Figura 3.12:** Evolución del río Tigre entre los años 1988 y 2011



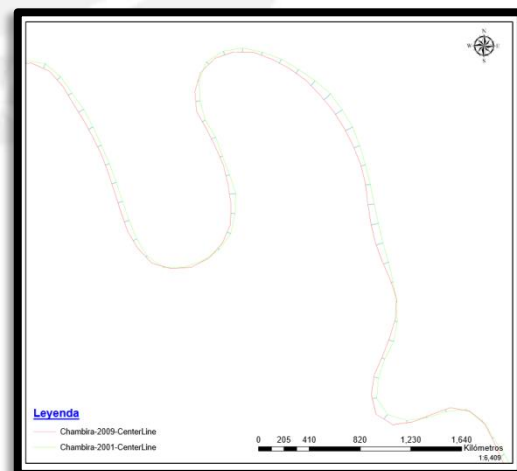
**Figura 3.13:** Evolución del río Yanu-Apaga los años 1987 y 2009

- Distancia de Migración

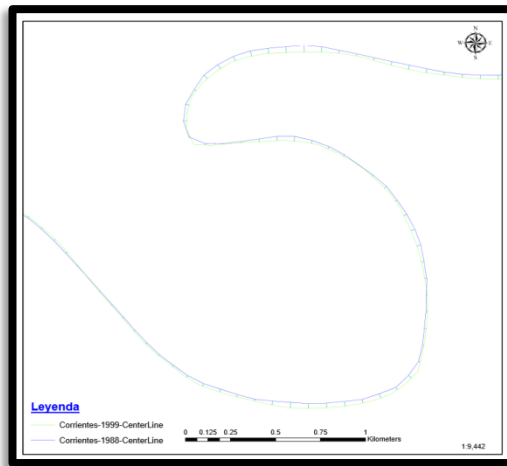
En las siguientes imágenes (Figuras 3.14 a 3.38) se muestra un tramo del río y cómo ha variado en el tiempo (vista ampliada). En el Anexo C se encuentran más detallados estos planos. En el Anexo C se muestran los planos completos.



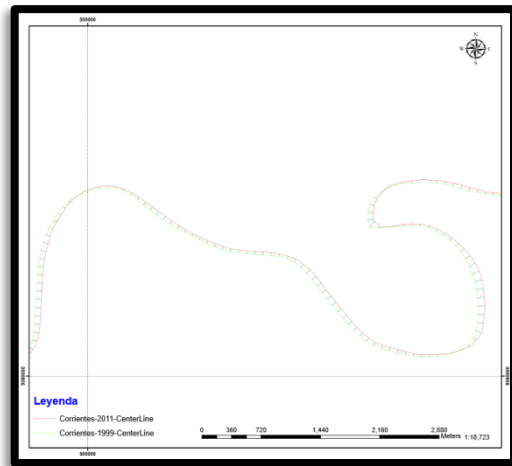
**Figura 3.14:** Migración del río Chambira entre los años 1987 y 2001



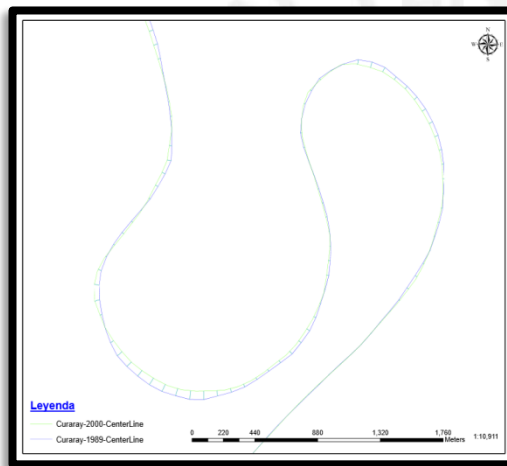
**Figura 3.15:** Migración del río Chambira entre los años 2001 y 2009



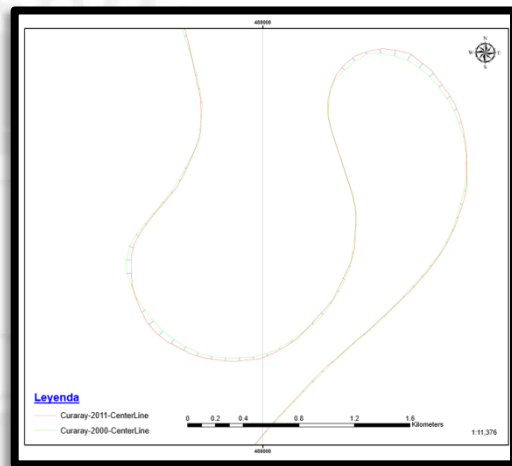
**Figura 3.16:** Migración del río Corrientes entre los años 1988 y 1999



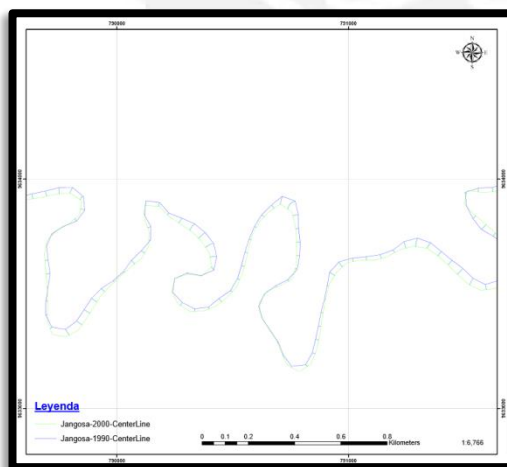
**Figura 3.17:** Migración del río Corrientes entre los años 1999 y 2011



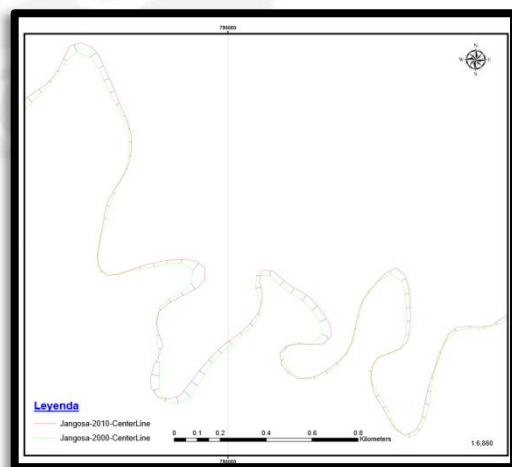
**Figura 3.18:** Migración del río Curaray entre los años 1989 y 2000



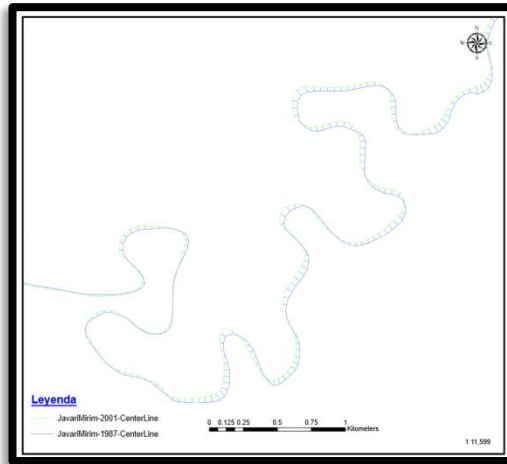
**Figura 3.19:** Migración del río Curaray entre los años 2000 y 2011



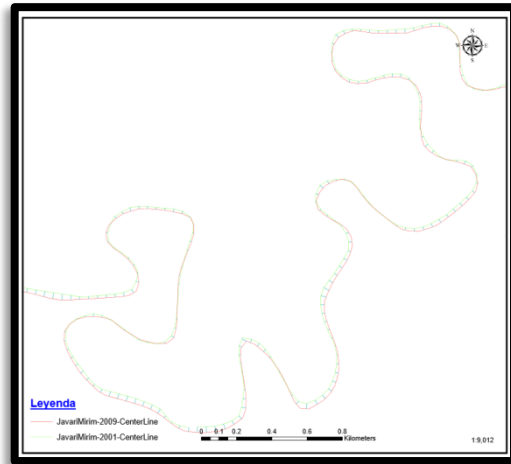
**Figura 3.20:** Migración del río Jangosa entre los años 1990 y 2000



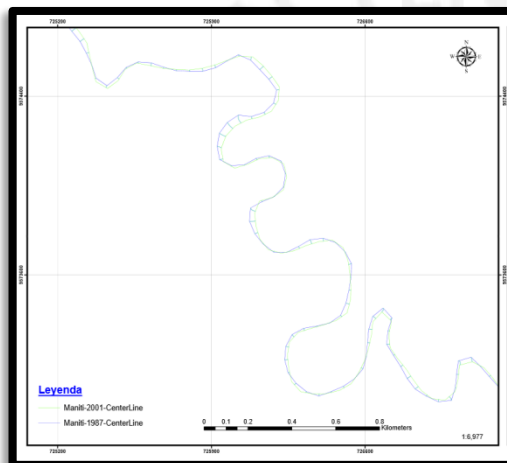
**Figura 3.21:** Migración del río Jangosa entre los años 2000 y 2010



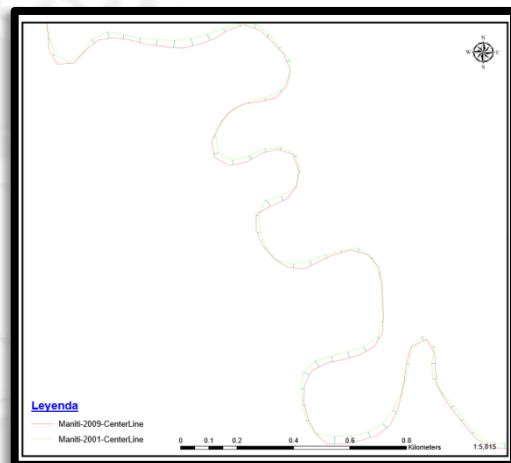
**Figura 3.22:** Migración del río Javari Mirim entre los años 1987 y 2001



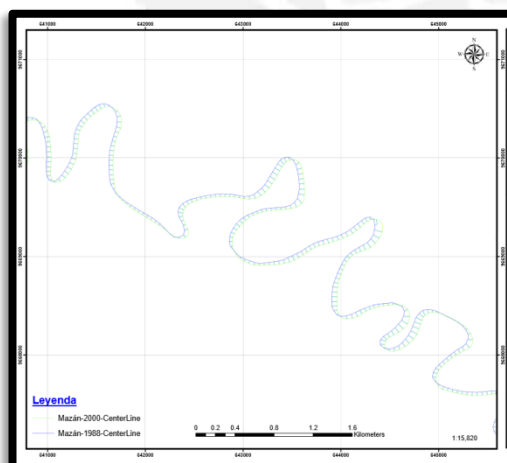
**Figura 3.23:** Migración del río Javari Mirim entre los años 2001 y 2009



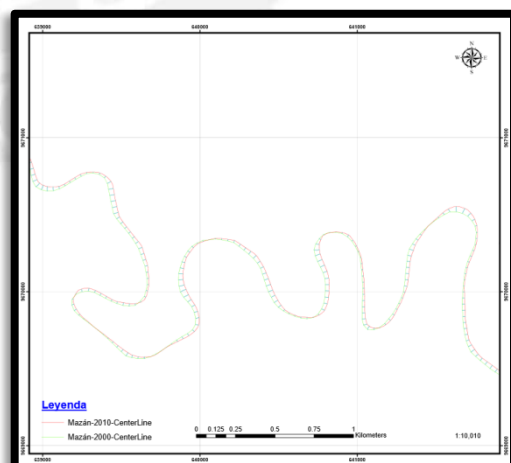
**Figura 3.24:** Migración del río Maniti entre los años 1987 y 2001



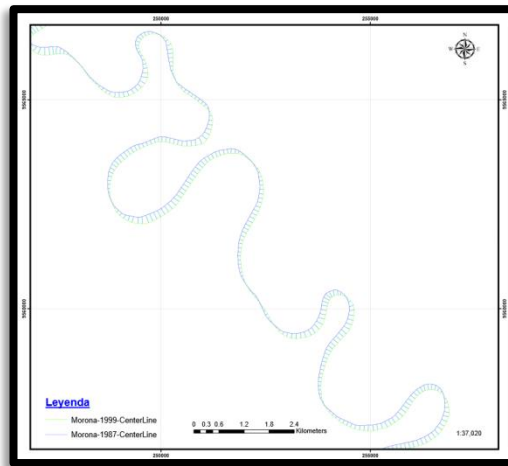
**Figura 3.25:** Migración del río Maniti entre los años 2001 y 2009



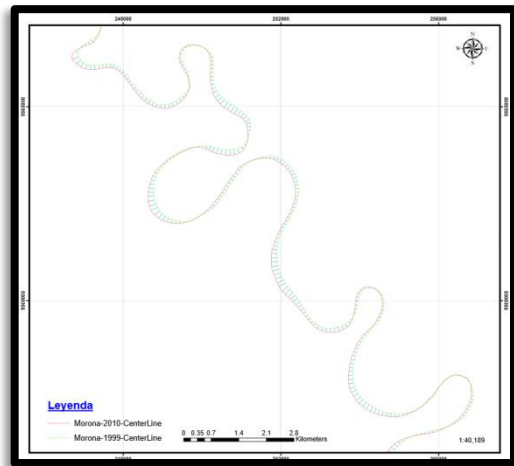
**Figura 3.26:** Migración del río Mazán entre los años 1988 y 2000



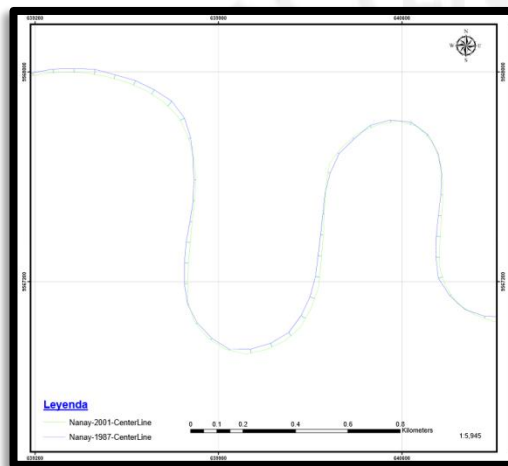
**Figura 3.27:** Migración del río Mazán entre los años 2000 y 2010



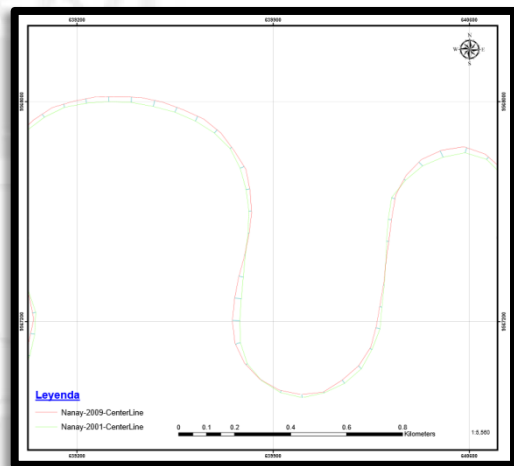
**Figura 3.28:** Migración del río Morona entre los años 1987 y 1999



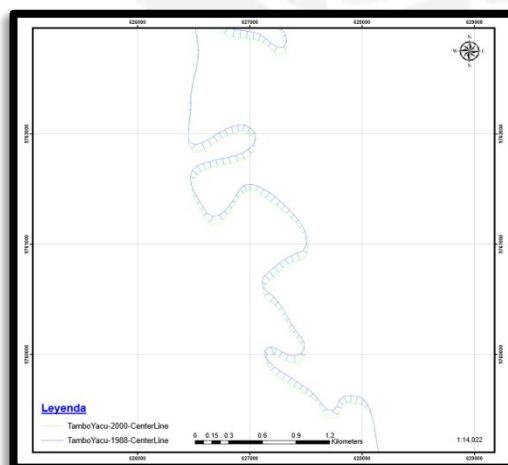
**Figura 3.29:** Migración del río Morona entre los años 1999 y 2010



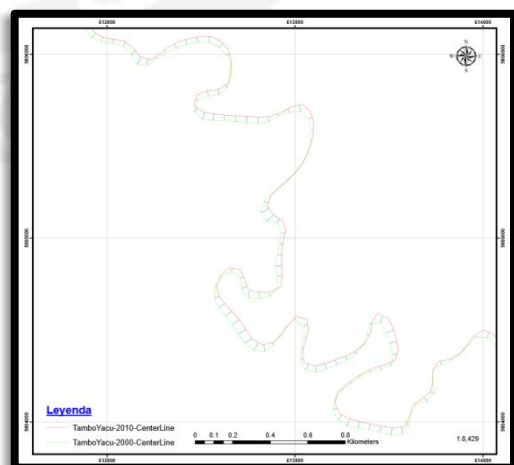
**Figura 3.30:** Migración del río Nanay entre los años 1987 y 2001



**Figura 3.31:** Migración del río Nanay entre los años 2001 y 2009

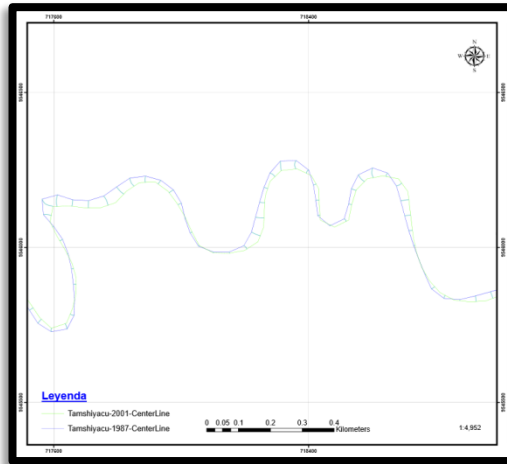


**Figura 3.32:** Migración del río Tambo Yacu entre los años 1988 y 2000

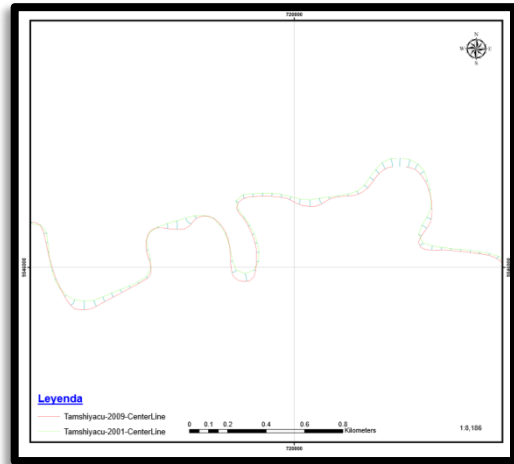


**Figura 3.33:** Migración del río Tambo Yacu entre los años 2000 y 2010

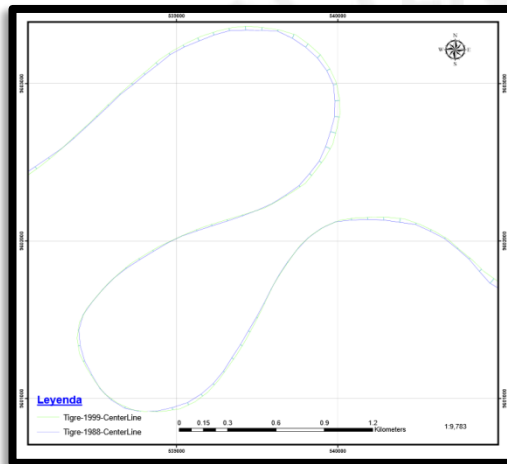




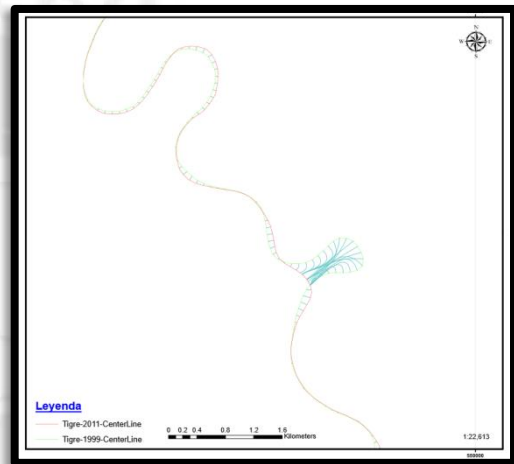
**Figura 3.34:** Migración del río Tamshiyacu entre los años 1987 y 2001



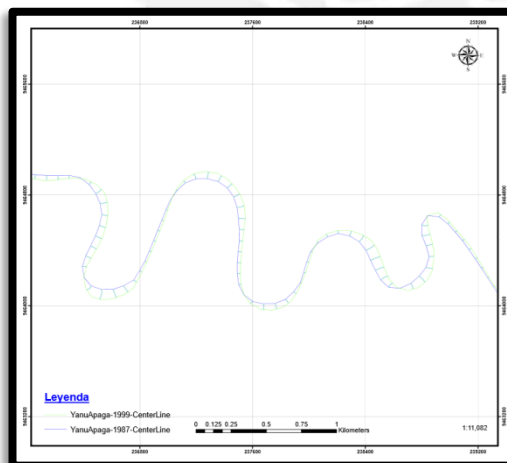
**Figura 3.35:** Migración del río Tamshiyacu entre los años 2001 y 2009



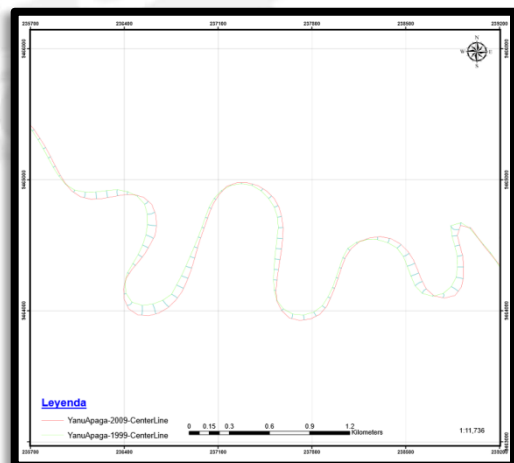
**Figura 3.36:** Migración del río Tigre entre los años 1988 y 1999



**Figura 3.37:** Migración del río Tigre entre los años 1999 y 2011



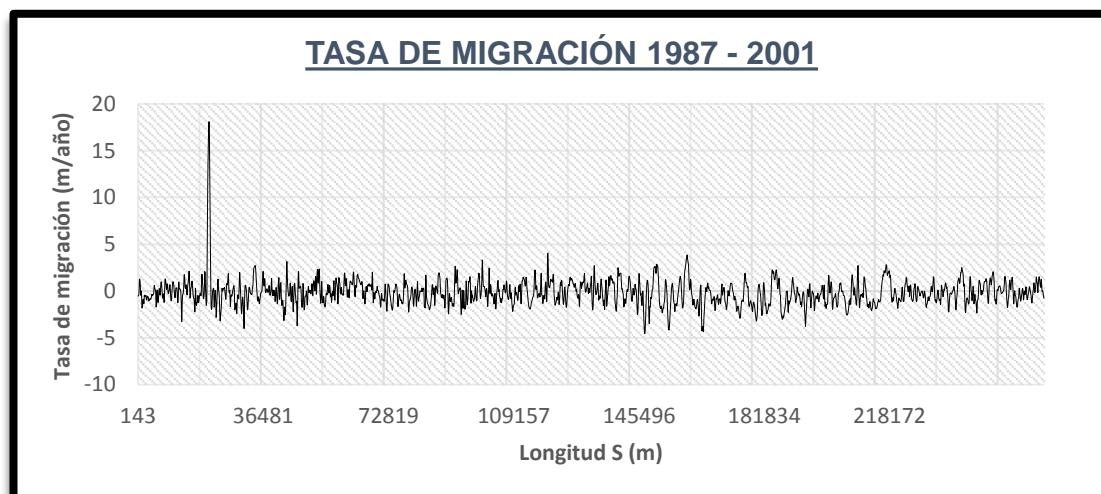
**Figura 3.38:** Migración del río Yanu Apaga entre los años 1987 y 1999



**Figura 3.39:** Migración del río Yanu Apaga entre los años 1999 y 2009

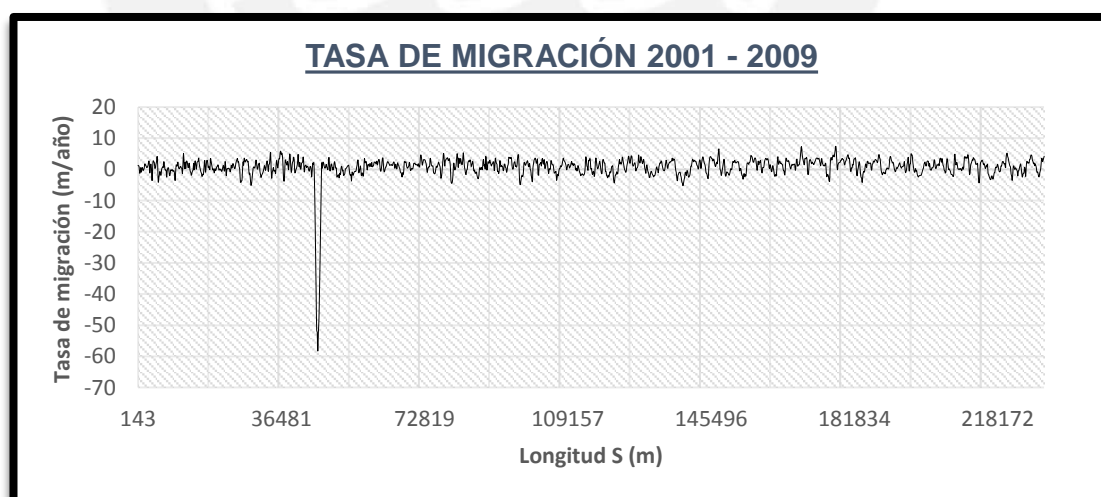
### 3.1.1. Migración Promedio del río Chambira

Haciendo uso del programa descrito en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Chambira. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.39:



**Figura 3.39:** Tasa de Migración del río Chambira de 1987 a 2011

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 0.94 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2001 y 2009, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.40):

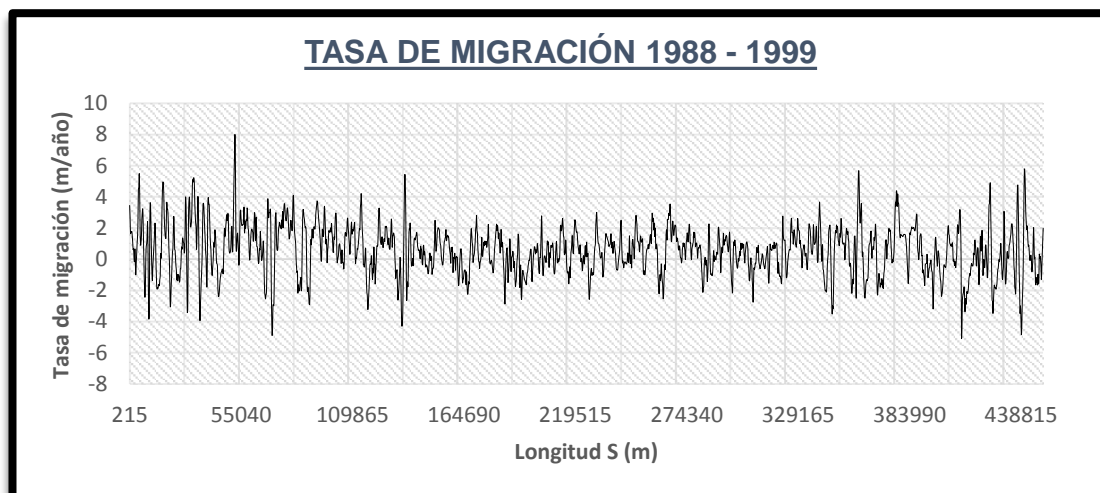


**Figura 3.40:** Tasa de Migración del río Chambira de 2001 al 2009

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.76 m/año.

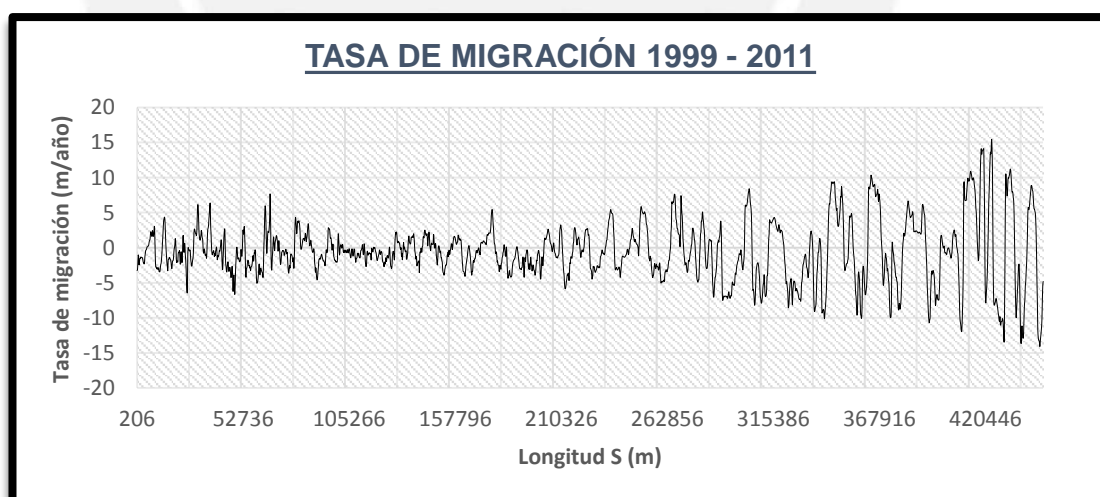
### 3.1.2. Migración Promedio del río Corrientes

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Corrientes. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.41:



**Figura 3.41:** Tasa de Migración del río Corrientes de 1988 a 1999

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.27 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 1999 y 2011, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.42):

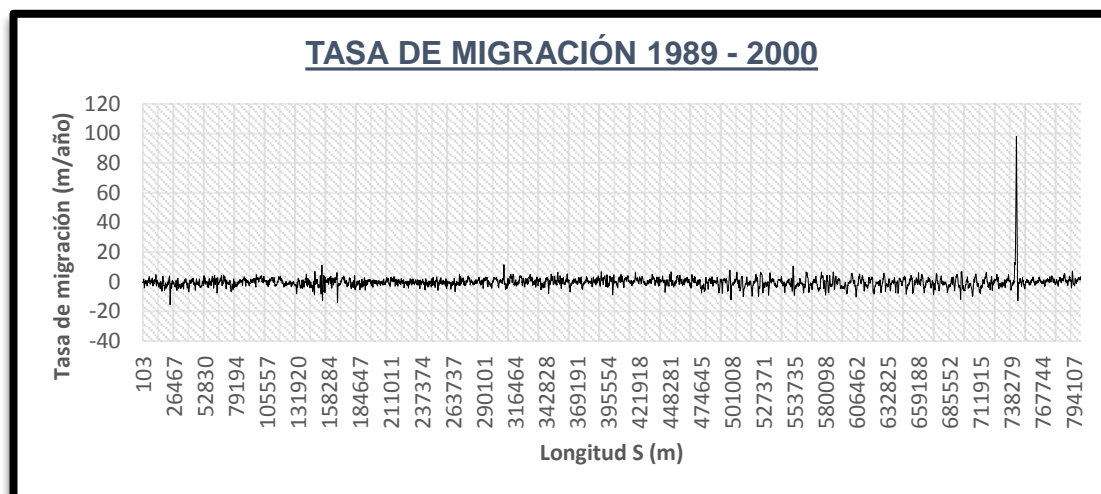


**Figura 3.42:** Tasa de Migración del río Corrientes de 1999 a 2011

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 3.1 m/año.

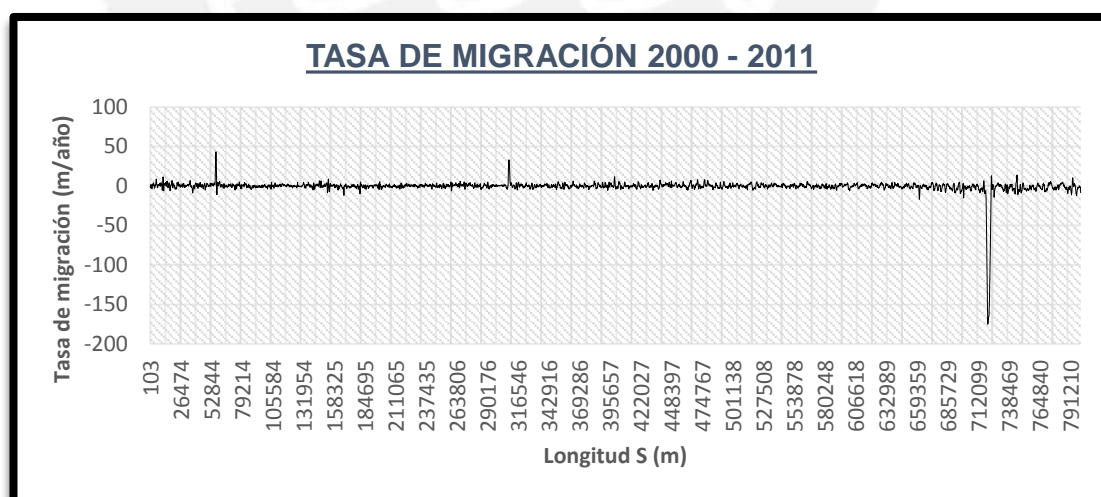
### 3.1.3. Migración Promedio del río Curaray

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Curaray. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.43:



**Figura 3.43:** Tasa de Migración del río Curaray de 1989 al 2000

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 2 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2000 y 2011, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.44):

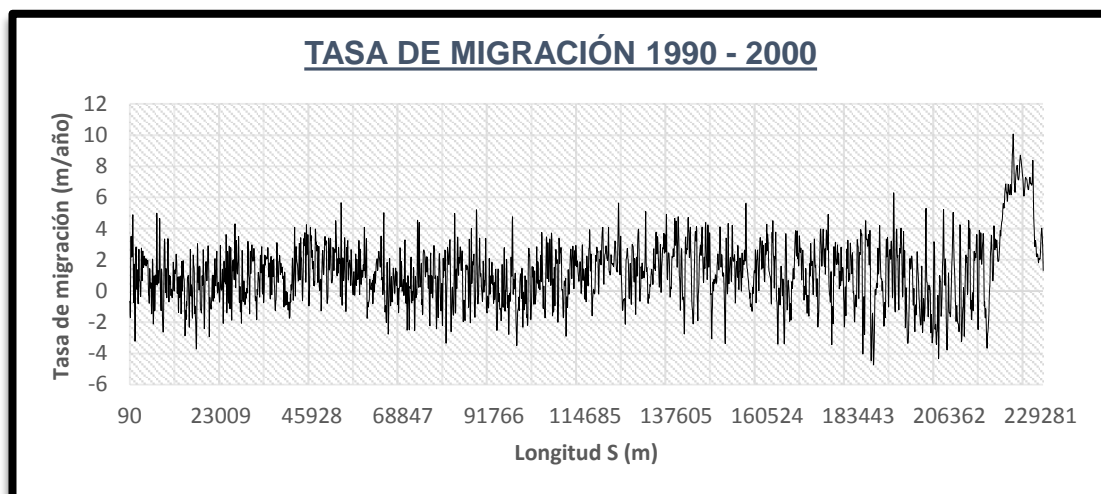


**Figura 3.44:** Tasa de Migración del río Curaray del 2000 al 2011

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.97 m/año.

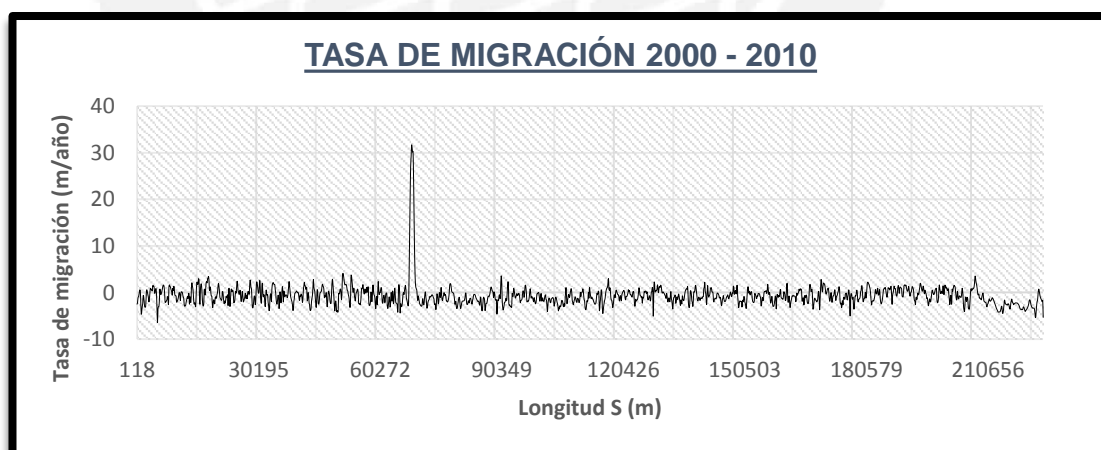
### 3.1.4. Migración Promedio del río Jangosa

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Jangosa. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.45:



**Figura 3.45:** Tasa de Migración del río Jangosa de 1990 al 2000

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.73 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2000 y 2010, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.46):

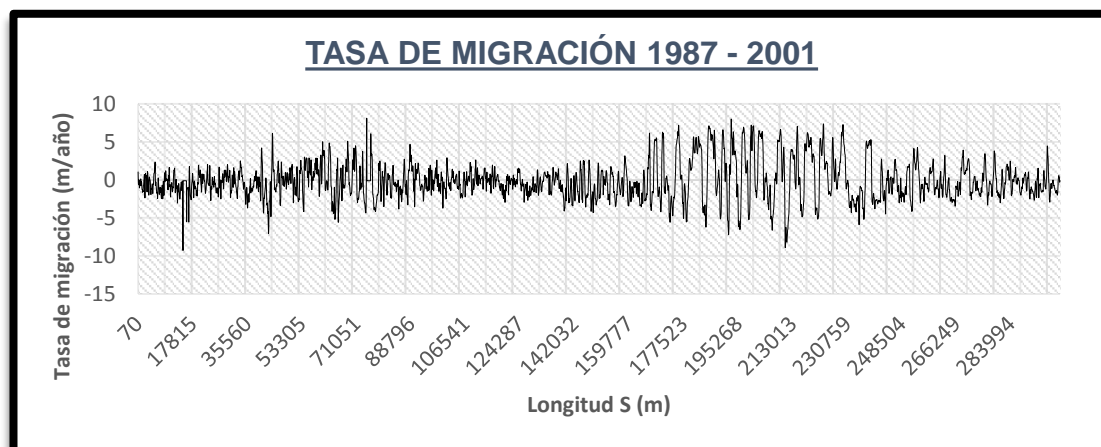


**Figura 3.46:** Tasa de Migración del río Jangosa del 2000 al 2010

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.79 m/año.

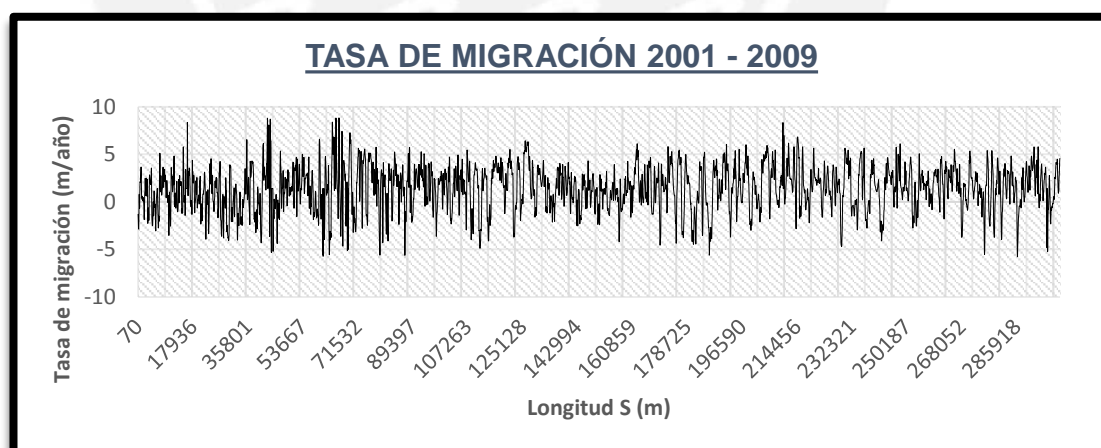
### 3.1.5. Migración Promedio del río Javari Mirim

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Javari Mirim. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.47:



**Figura 3.47:** Tasa de Migración del río Javari Mirim de 1987 al 2001

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.85 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2001 y 2009, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.48):



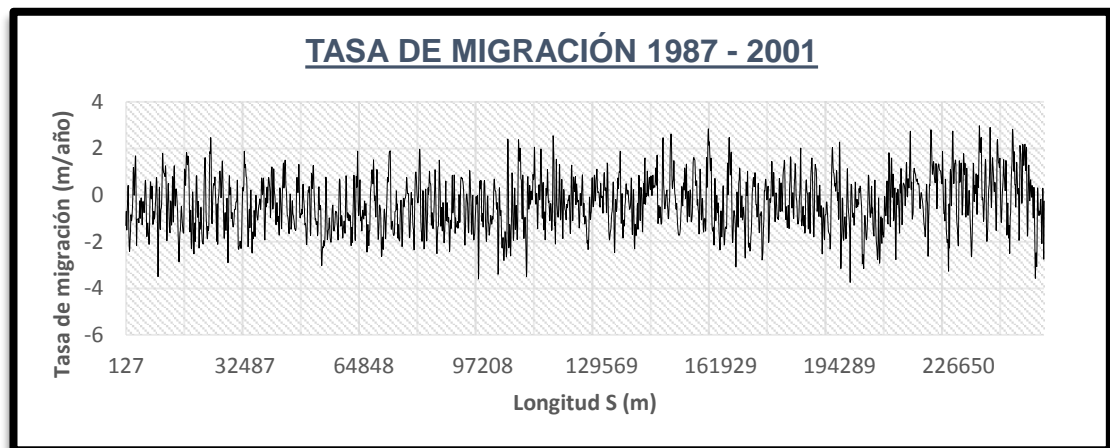
**Figura 3.48:** Tasa de Migración del río Javari Mirim de 2001 al 2009

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 2.22 m/año.



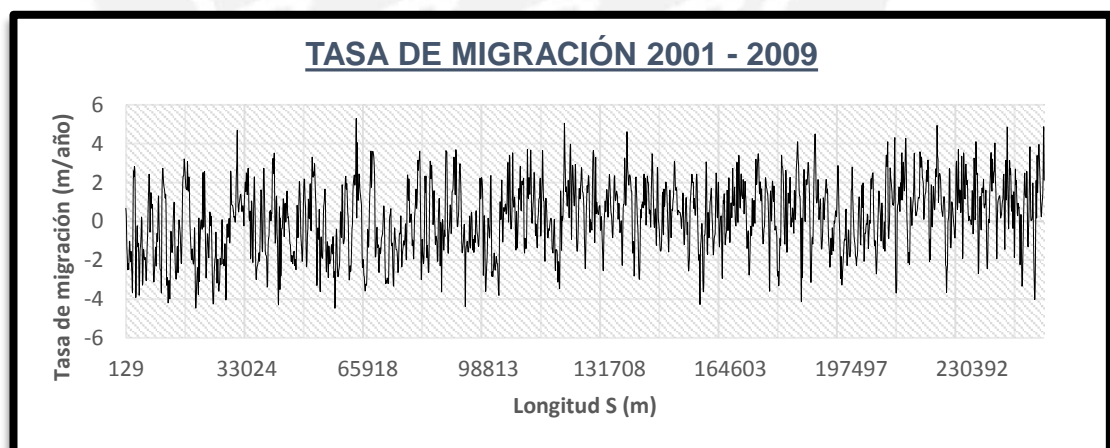
### 3.1.6. Migración Promedio del río Maniti

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Maniti. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.49:



**Figura 3.49:** Tasa de Migración del río Maniti de 1987 al 2001

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 0.96 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2001 y 2009, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.50):

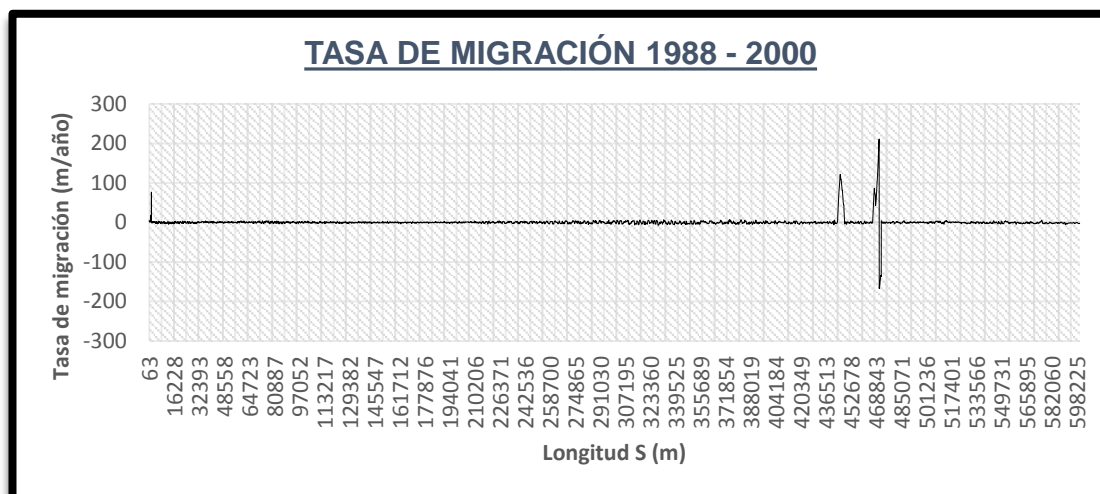


**Figura 3.50:** Tasa de Migración del río Maniti del 2001 al 2009

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.47 m/año.

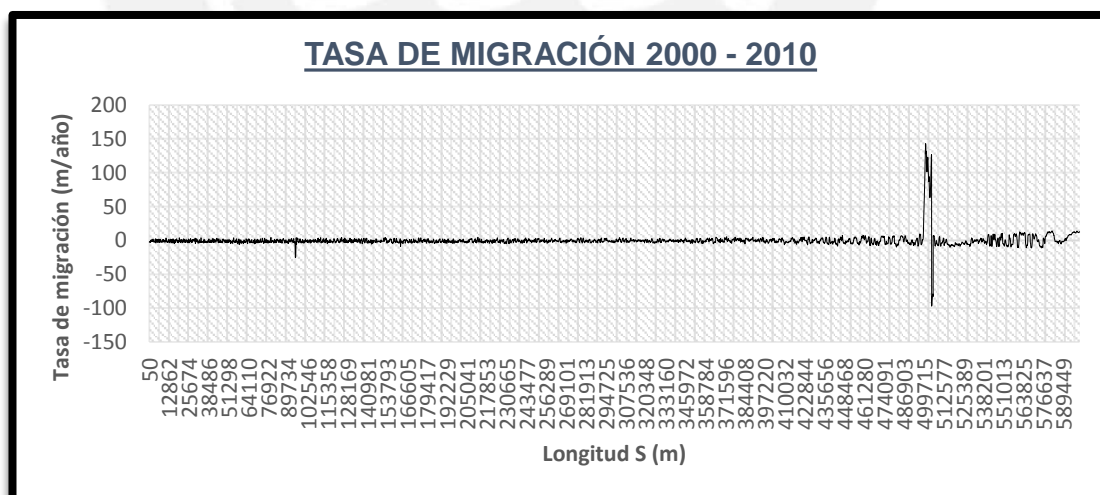
### 3.1.7. Migración Promedio del río Mazán

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Mazán. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.51:



**Figura 3.51:** Tasa de Migración del río Mazán de 1988 al 2000

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.59 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2000 y 2010, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.52):

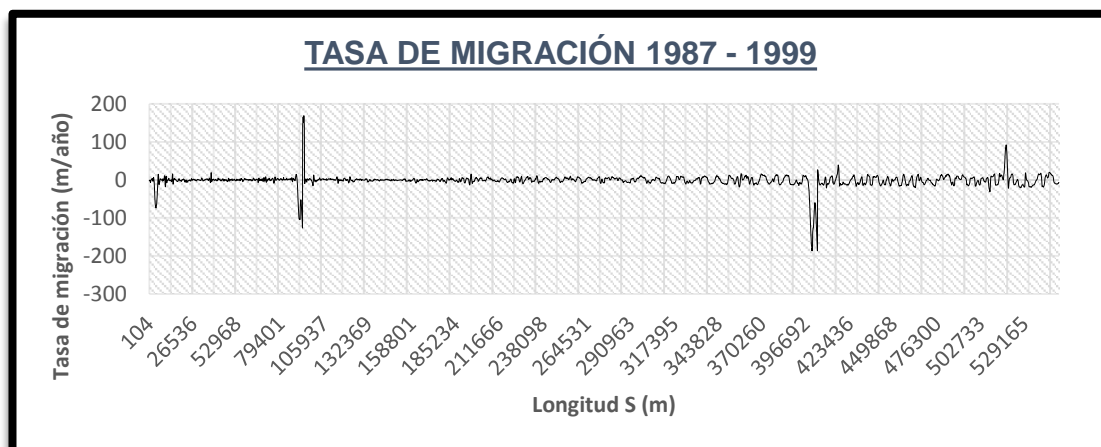


**Figura 3.52:** Tasa de Migración del río Mazán del 2000 al 2010

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 2.6 m/año.

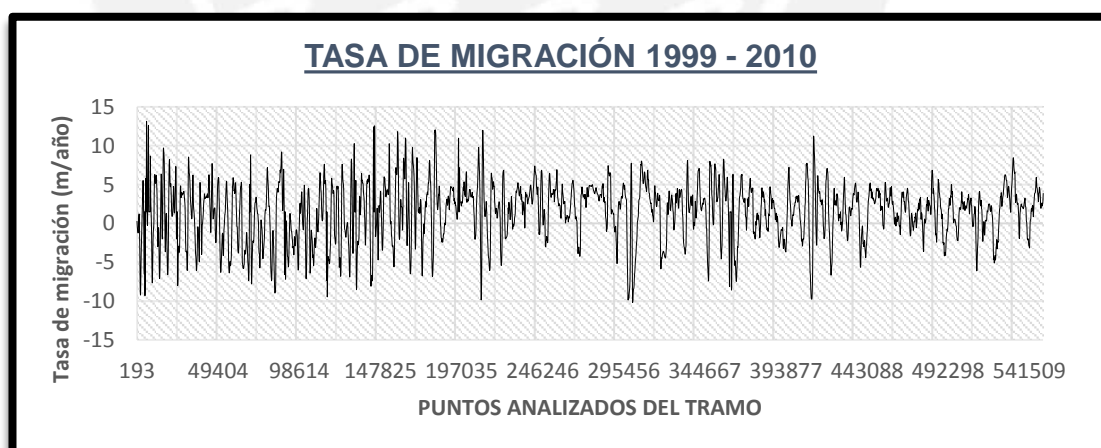
### 3.1.8. Migración Promedio del río Morona

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Morona. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.53:



**Figura 3.53:** Tasa de Migración del río Morona de 1987 a 1999

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 5.42 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 1999 y 2010, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.54):

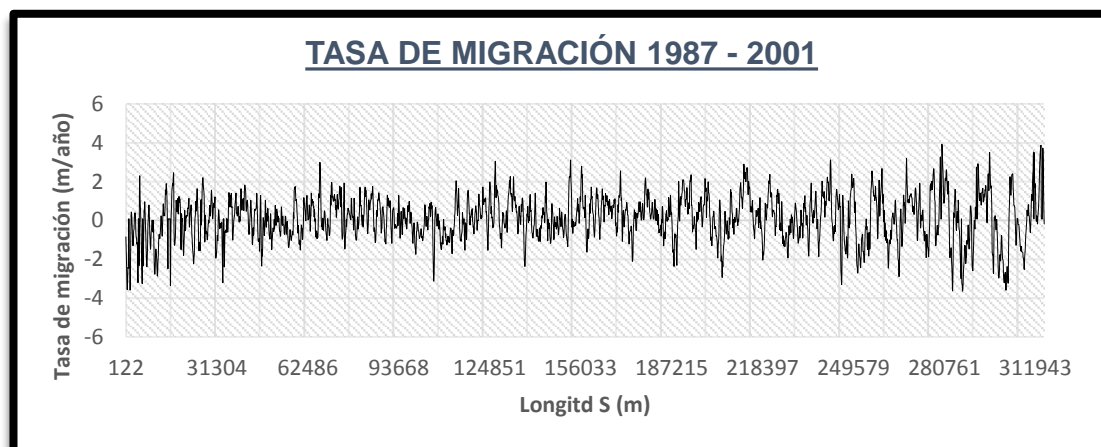


**Figura 3.54:** Tasa de Migración del río Morona de 1999 a 2010

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 3.26 m/año.

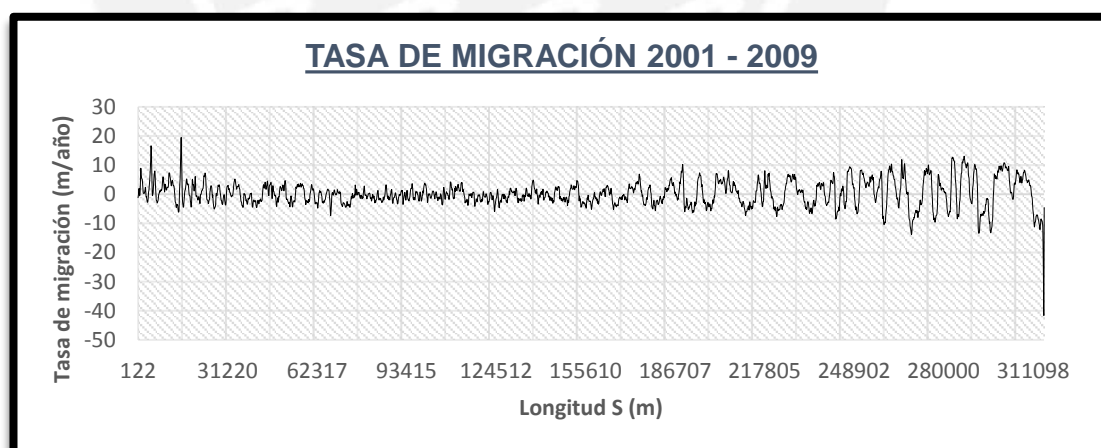
### 3.1.9. Migración Promedio del río Nanay

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Nanay. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.55:



**Figura 3.55:** Tasa de Migración del río Nanay de 1987 a 2001

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 0.91 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2001 y 2009, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.56):

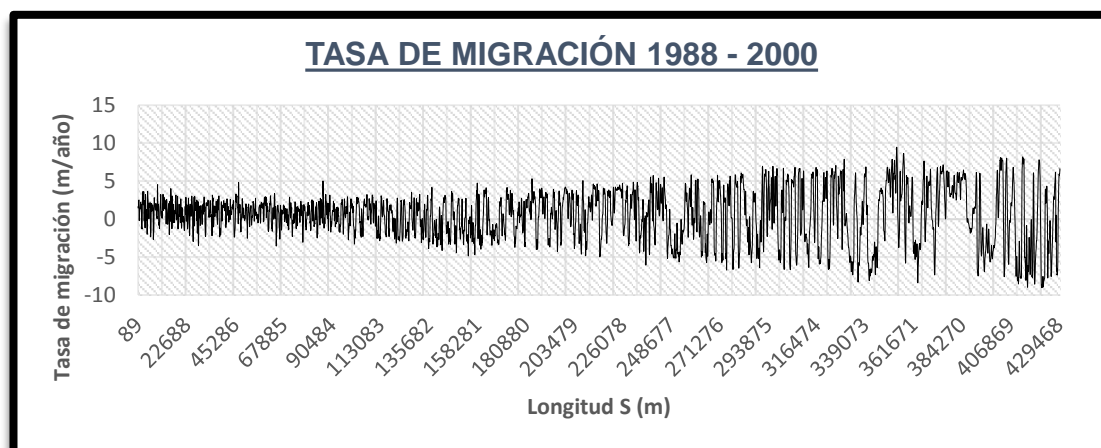


**Figura 3.56:** Tasa de Migración del río Nanay de 2001 a 2009

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 3.27 m/año.

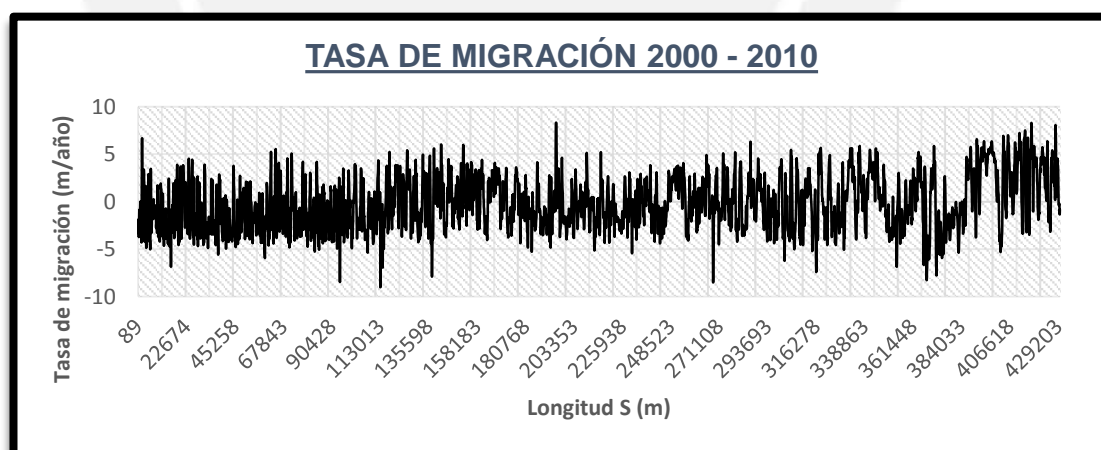
### 3.1.10. Migración Promedio del río Tambo Yacu

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Tambo Yacu. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.57:



**Figura 3.57:** Tasa de Migración del río Tambo Yacu de 1988 al 2000

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 2.65 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2000 y 2010, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.58):



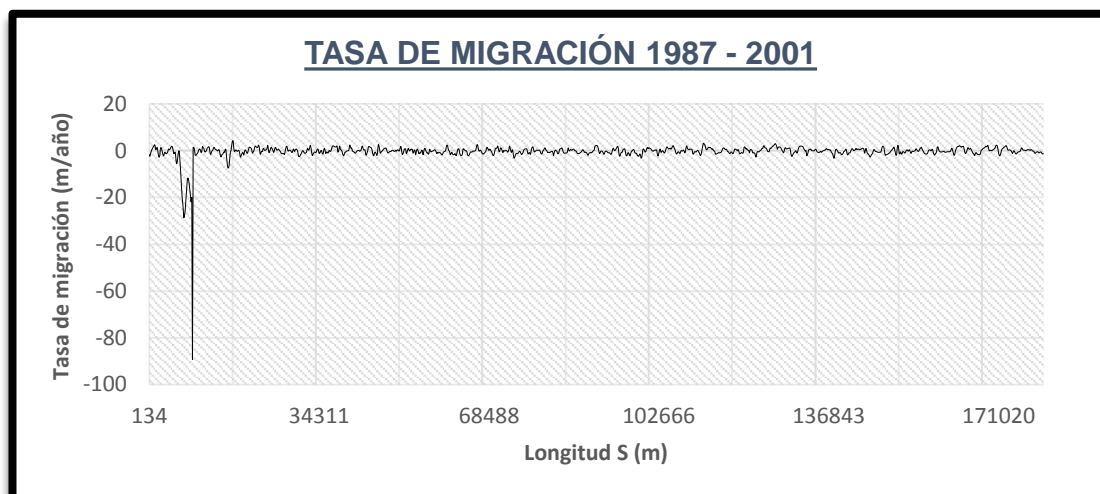
**Figura 3.58:** Tasa de Migración del río Tambo Yacu del 2000 al 2010

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 2.29 m/año.



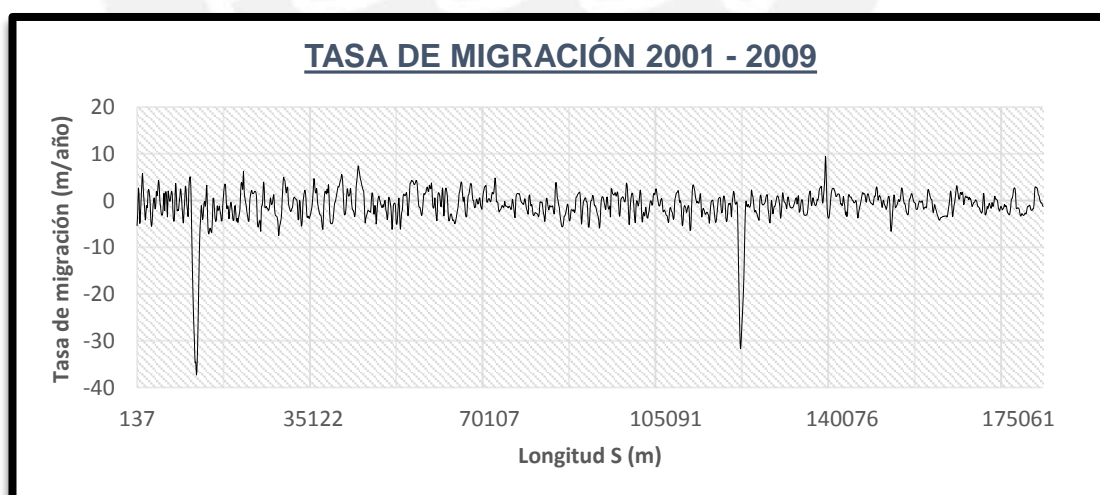
### 3.1.11. Migración Promedio del río Tamshiyacu

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Tamshiyacu. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.59:



**Figura 3.59:** Tasa de Migración del río Tamshiyacu de 1987 al 2001

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 0.91 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2001 y 2009, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.60):



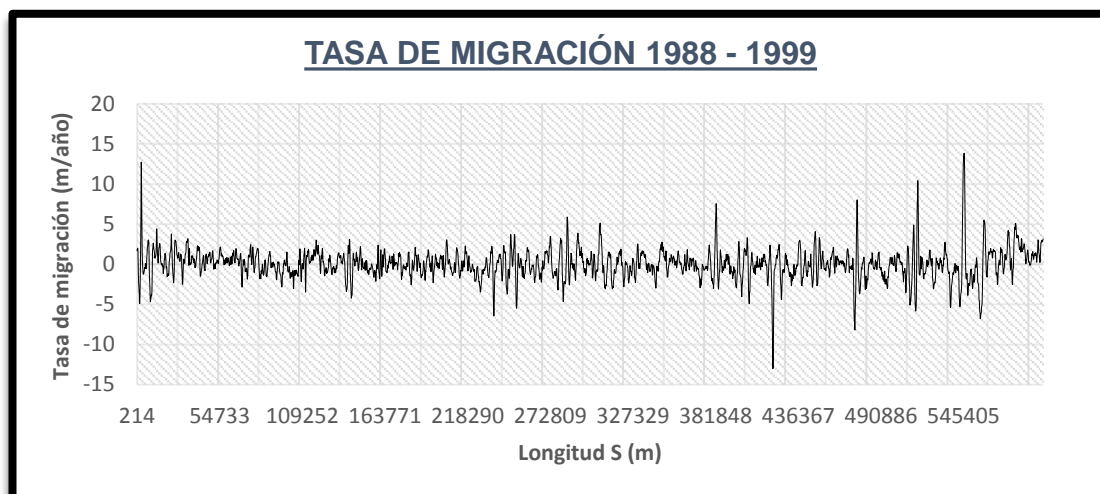
**Figura 3.60:** Tasa de Migración del río Tamshiyacu del 2001 al 2009

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.94 m/año.



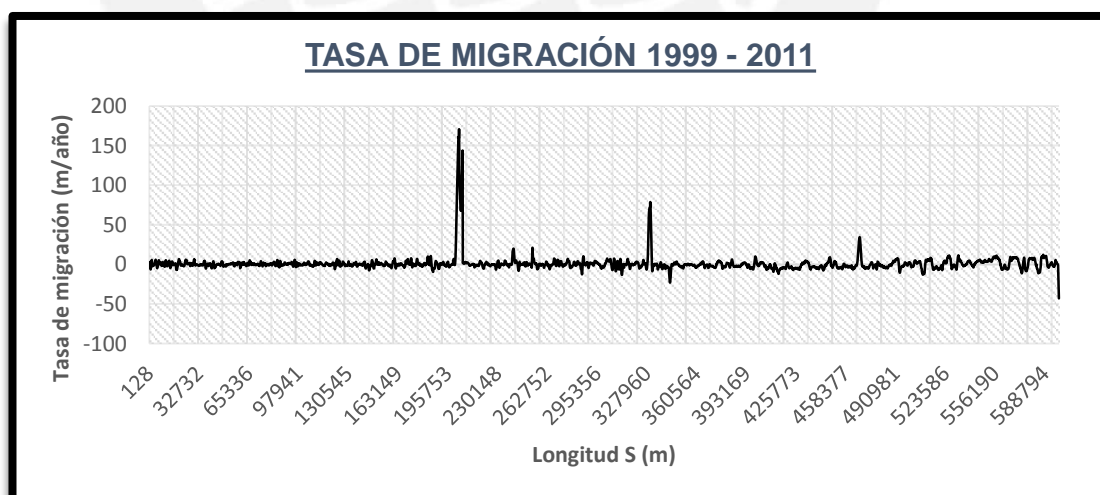
### 3.1.12. Migración Promedio del río Tigre

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Tigre. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.61:



**Figura 3.61:** Tasa de Migración del río Tigre de 1988 a 1999

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.17 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 1999 y 2011, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.62):

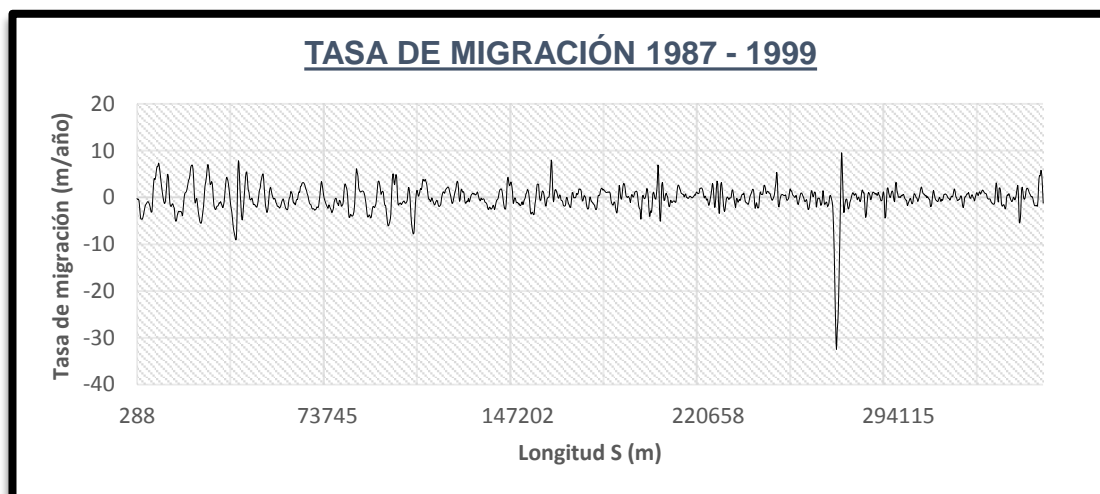


**Figura 3.62:** Tasa de Migración del río Tigre de 1999 al 2011

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 2.92 m/año.

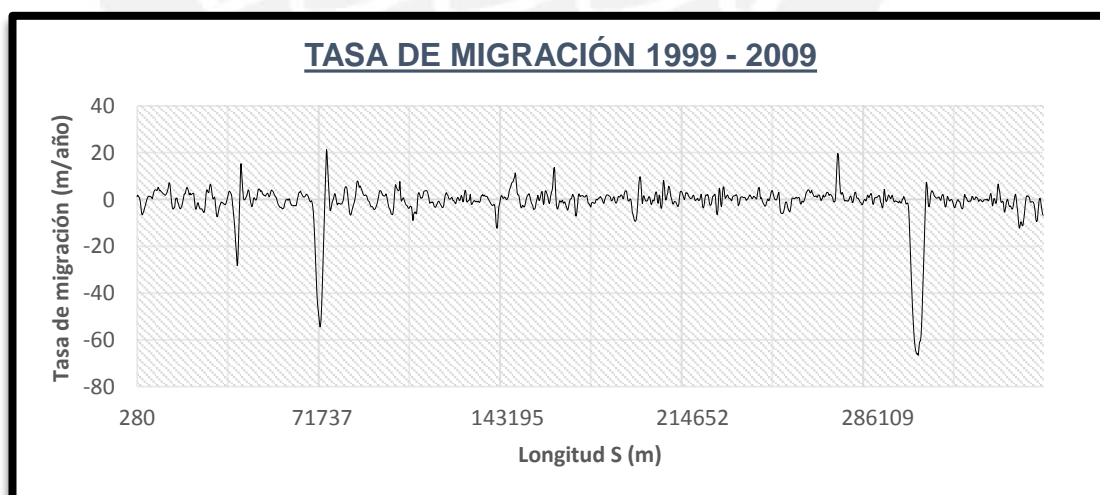
### 3.1.13. Migración Promedio del río Yanu-Apaga

Haciendo uso del programa en la sección 2.1.2, se encontró la tasa de migración del tramo seleccionado del río Yanu Apaga. Asimismo, se graficó la tasa por año a lo largo del río, como se observa en la Figura 3.63:



**Figura 3.63:** Tasa de Migración del río Yanu-Apaga de 1987 a 1999

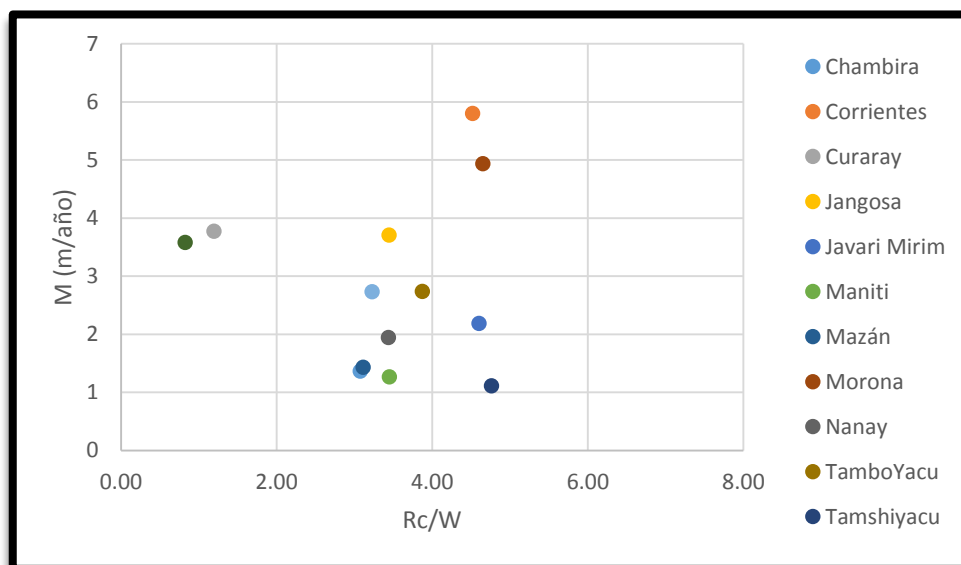
Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 1.56 m/año. Luego, para el rango de años comprendido entre los años 2001 y 2009, se tiene la siguiente tasa de migración (Figura 3.64):



**Figura 3.64:** Tasa Migración río Yanu-Apaga de 1999 a 2009

Aplicando los criterios estadísticos descritos en el capítulo 2, se obtiene la tasa de migración del río, el cual es 2.5 m/año.

Finalmente, se obtiene la Figura 3.65 con los ratios de migración de los ríos. Se observa que las migraciones en los ríos meándricos en la región hidrográfica del Amazonas ocurren, en su mayoría, cuando la relación Ancho Promedio / Radio del meandro ( $R_c/W$ ) es menor.



**Figura 3.65:** Migración vs Radio de curvatura en función del ancho de cauce

### 3.2. Discusión de Resultados

A partir de esta sección, se nombrarán a los años de estudio de cada río como Año 1, Año 2 y Año 3 (Tabla 3.1), que corresponden a los años de disponibilidad de las imágenes satelitales. A continuación, se describirá cada uno de ellos y, con esa salvedad, se trabajarán los distintos gráficos propuestos:

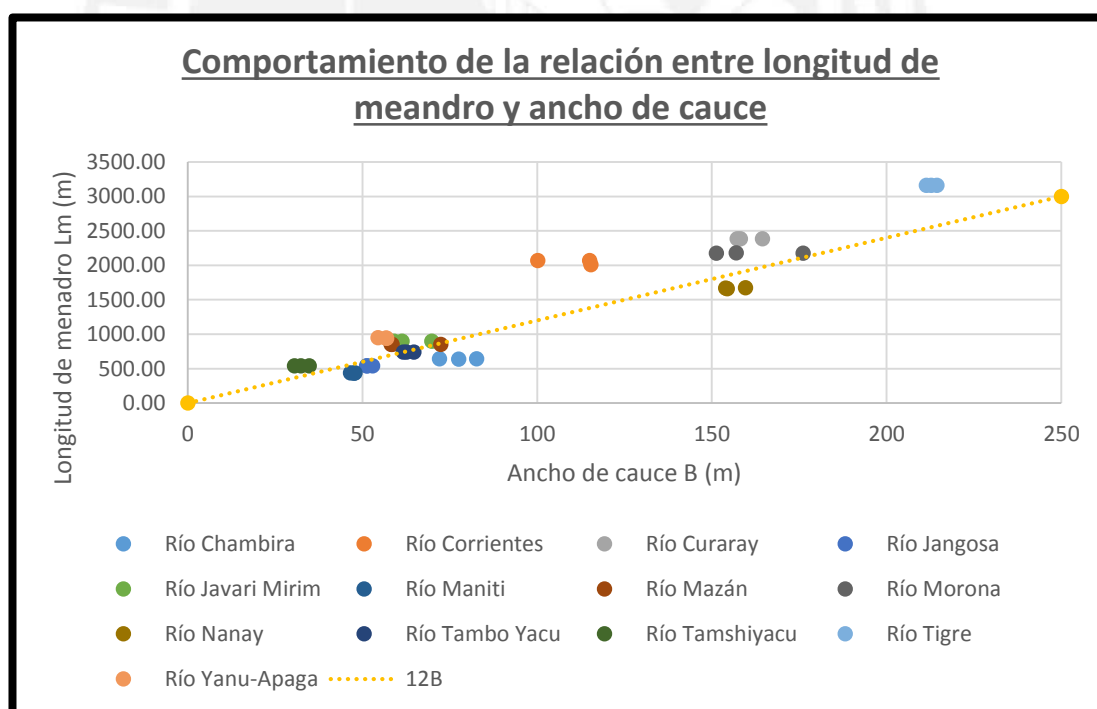
**Tabla 3.1:** Descripción de los años de análisis de cada río

	Río	Año 1	Año 2	Año 3
1	Chambira	1987	2001	2009
2	Corrientes	1988	1999	2011
3	Curaray	1989	2000	2011
4	Jangosa	1990	2000	2010
5	Javari Mirim	1987	2001	2009
6	Maniti	1987	2001	2009
7	Mazán	1988	2000	2010
8	Morona	1987	1999	2010
9	Nanay	1987	2001	2009
10	TamboYacu	1988	2000	2010
11	Tamshiyacu	1987	2001	2009
12	Tigre	1988	1999	2011
13	Yanu-Apaga	1987	1999	2009

En primer lugar, se observa que los 13 ríos analizados son meándricos de acuerdo a las características fluviomorfológicas que presentaron, las cuales se pusieron en evidencia en la tabla 3.2. Además, en la Figura 3.66 se puede ver la tendencia natural de los ríos respecto de la línea de comportamiento meandriforme que es  $12*B$  (Hickin y Nanson, 1986).

**Tabla 3.2:** Características fluviomorfológicas de los ríos

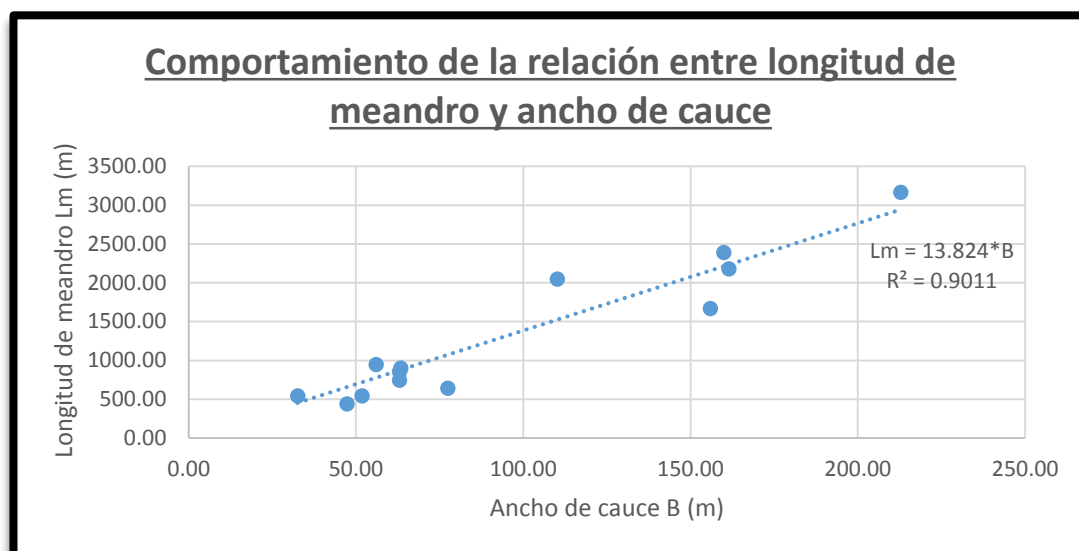
Río	Sinuosidad Promedio	Ancho de cauce/Profundidad	Barras	Tipo
Chambira	1.7	< 40	En espolón	Meándrico
Corrientes	1.57	< 40	En espolón	Meándrico
Curaray	2.26	< 40	En espolón	Meándrico
Jangosa	1.88	< 40	En espolón	Meándrico
Javari Mirim	1.84	< 40	En espolón	Meándrico
Maniti	2	< 40	En espolón	Meándrico
Mazán	2.02	< 40	En espolón	Meándrico
Morona	1.83	< 40	En espolón	Meándrico
Nanay	2.34	< 40	En espolón	Meándrico
TamboYacu	1.98	< 40	En espolón	Meándrico
Tamshiyacu	1.87	< 40	En espolón	Meándrico
Tigre	1.88	< 40	En espolón	Meándrico
Yanu-Apaga	2.09	< 40	En espolón	Meándrico



**Figura 3.66:** Comportamiento de la relación entre  $L_m$  y  $B - 1$

Se observa que la tendencia natural de los ríos sigue la recta meándrica propuesta por los autores Hickin y Nanson en su postulado ( $12B$ ). Sin embargo, hay que tener

presente que las condiciones de los ríos que ellos estudiaron en Canadá, es de una geología totalmente diferente a la de la selva peruana. En el contexto de la Región Hidrográfica del Amazonas no existen rocas que perturben el camino de los ríos y las condiciones de la vegetación y clima difieren. Es por ello, que se propone una nueva línea de tendencia meándrica para ríos pertenecientes a la Cuenca Hidrográfica del Amazonas, el cual se muestra en la Figura 3.67.



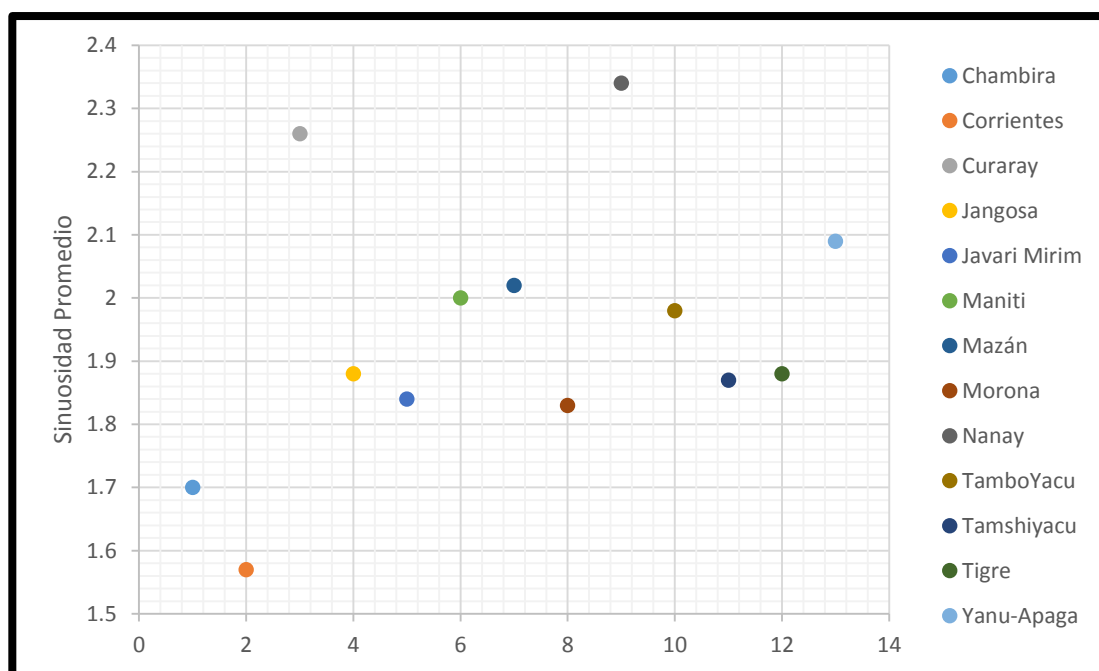
**Figura 3.67:** Comportamiento de la relación entre  $L_m$  y  $B - 2$

Se llegó a la conclusión que la Longitud de Meandro  $L_m$  es igual a 13.824 veces el ancho del cauce ( $B$ ). Ajustando este valor, se obtiene la ecuación 1 para describir la tendencia que deben seguir los ríos pertenecientes a esta región:

$$L_m = 13.8 * B \quad \dots \quad (1)$$

La sinuosidad que presentan los ríos estudiados varía entre los valores de 1.5 y 2.5, aproximadamente. Este valor sugiere que se debe a su naturaleza meándrica tortuosa, la cual es característica de esta región y, comparándola con la teoría mencionada anteriormente (Capítulo 1.3.3), indica que los resultados que se obtengan serán válidos para ríos de este tipo. Un cauce de tipo meándrico tiene una sinuosidad superior a 1.5 y consta de curvas alternantes, las cuales proporcionan su trazado serpenteante. Esta sinuosidad promedio del río se mantendrá a lo largo del tiempo mediante la migración natural y los cortes de sus meandros. A continuación, se muestra la Figura 3.68 con la tendencia de las sinuosidades calculadas y, la cual, da la idea que esta característica oscilará entre

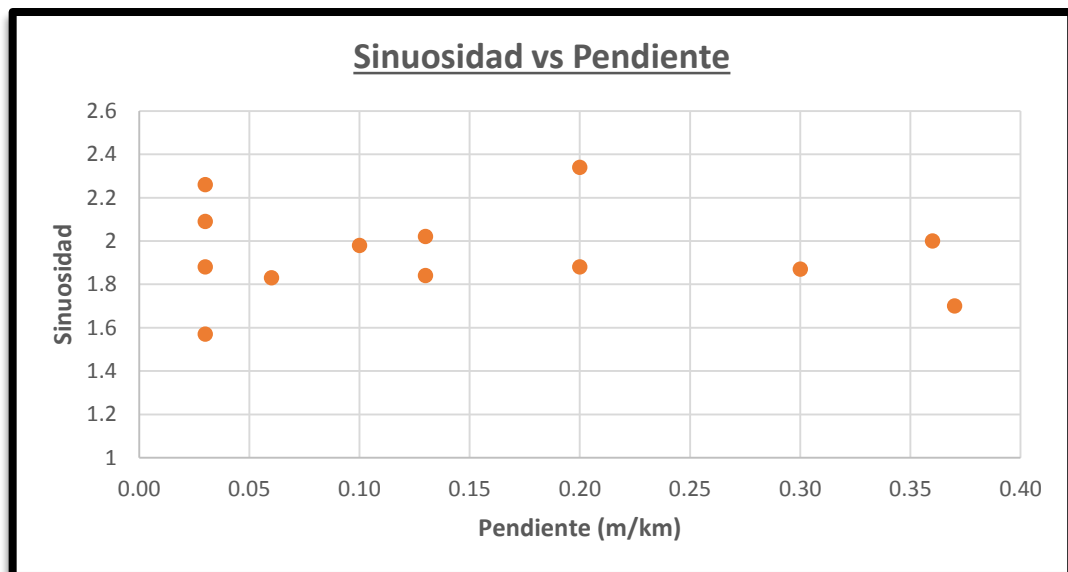
los valores mencionados para los ríos pertenecientes a la región hidrográfica del Amazonas (mayor a 1.5). La sinuosidad mayor es de 2.34 y la menor es de 1.57.



**Figura 3.68:** Sinuosidades de los ríos

Asimismo, se realizó la gráfica sinuosidad versus pendiente para ver el comportamiento de los ríos. Se observa que la sinuosidad es mayor en tramos cuya pendiente es menor y, a su vez, que cuando la pendiente es más fuerte, la tendencia es que el río tenga menor pendiente, como se muestra en la Figura 3.69. También, las sinuosidades de los ríos en esta Región Hidrográfica se agrupan, en su mayoría, en pendientes suaves, como se aprecia en la Figura 3.69, las cuales son menores a 0.5 m/km.





**Figura 3.69:** Sinuosidad vs Pendiente

Luego, en el caso de la curvatura de los meandros, se tienen los siguientes valores promediados de cada río estudiado, los cuales se muestran en la tabla 3.3. Los valores mayores de curvatura implican que los meandros son más susceptibles a la dinámica de la erosión y viceversa, valores menores de curvatura de meandro traen como consecuencia que exista menos erosión, y, más bien, haya mayor tendencia al fenómeno de la sedimentación, ya que el material tiene más lugar para asentarse en el lecho del cauce.

**Tabla 3.3:** Curvatura Promedio de los 13 ríos

	Río	Curvatura			Curvatura Promedio
		Año 1	Año 2	Año 3	
1	Chambira	0.0043	0.0041	0.0042	<b>0.0042</b>
2	Corrientes	0.0012	0.0012	0.0012	<b>0.0012</b>
3	Curaray	0.0014	0.0013	0.0013	<b>0.0013</b>
4	Jangosa	0.0059	0.0056	0.0053	<b>0.0056</b>
5	Javari Mirim	0.0036	0.0033	0.0034	<b>0.0034</b>
6	Maniti	0.0064	0.0059	0.0061	<b>0.0061</b>
7	Mazán	0.0038	0.0038	0.0038	<b>0.0038</b>
8	Morona	0.0014	0.0013	0.0013	<b>0.0013</b>
9	Nanay	0.0018	0.0019	0.0019	<b>0.0019</b>
10	TamboYacu	0.0041	0.0041	0.0041	<b>0.0041</b>
11	Tamshiyacu	0.0067	0.0065	0.0066	<b>0.0066</b>
12	Tigre	0.0012	0.0012	0.0012	<b>0.0012</b>
13	Yanu-Apaga	0.003	0.003	0.0029	<b>0.0030</b>

Respecto al radio de curvatura de los meandros en los ríos estudiados, se observa que, al disminuir el valor de los mismos en la mayoría de los casos, la tasa de migración se hace más grande y viceversa, como sugieren estudios propuestos anteriores (*Hickin y Nanson, 1986*) como se puede observar en la tabla 3.4. Este incremento de la tasa de migración afecta los márgenes del cauce y debe ser considerado para el diseño de obras civiles que puedan proyectarse en la zona de la Cuenca Hidrográfica del Amazonas.

**Tabla 3.4:** Comparativo Radio de Curvatura – Tasa de Migración

Río	Radio de Curvatura (m)					Tasa de Migración (m/año)	
	Año 1	Año 2	Año 3	Variación 1	Variación 2	Año 1 - Año 2	Año 2 - Año 3
<b>Chambira</b>	231.84	244.54	237.11	12.7	-7.43	0.94	1.76
<b>Corrientes</b>	857.21	832.96	831.48	-24.25	-1.48	1.27	3.10
<b>Curaray</b>	739.23	757.39	767.4	18.16	10.01	2.00	1.97
<b>Jangosa</b>	168.26	178.57	188.68	10.31	10.11	1.73	1.79
<b>Javari Mirim</b>	277.78	303.03	294.12	25.25	-8.91	1.85	2.22
<b>Maniti</b>	156.25	169.49	163.93	13.24	-5.56	0.96	1.47
<b>Mazán</b>	264.18	263.63	263.11	-0.55	-0.52	1.59	2.60
<b>Morona</b>	714.29	769.23	769.23	54.95	0.00	5.42	3.26
<b>Nanay</b>	555.56	526.32	526.32	-29.24	0.00	0.91	3.27
<b>TamboYacu</b>	243.90	243.90	243.90	0.00	0.00	2.65	2.29
<b>Tamshiyacu</b>	148.72	152.75	150.64	4.03	-2.11	0.91	1.94
<b>Tigre</b>	835.13	839.48	844.42	4.35	4.94	1.17	2.92
<b>Yanu-Apaga</b>	337.11	330.88	339.09	-6.23	8.21	1.56	2.50

Además, los ríos presentan un dinamismo constante, el cual se manifiesta como el movimiento de su cauce, generando procesos de erosión y sedimentación. A continuación, se muestra la tabla 3.5 con el resumen de los resultados que se obtuvieron. De dicha tabla, se puede observar que, en la mayoría de los casos, las tasas de migración van aumentando con el transcurso del tiempo. Las causas posibles de este incremento o decremento se dividen en causas naturales y externas. Dentro de las primeras, se tiene la mecánica de la erosión y el transporte de sedimentos y cortes de meandro. Respecto a las causas externas, se tiene la construcción de obras civiles, la contaminación del medio ambiente y el calentamiento global. Además, se observan las tendencias de crecimiento o decaimiento de la tasa de migración.

**Tabla 3.5:** Resumen de Tasa de Migración de ríos analizados

Ítem	Río	Tasa de Migración (m/año)			Tendencia
		Tasa de Migración de Año 1 a Año 2	Tasa de Migración del Año 2 a Año 3	Tasa de Migración Promedio	
1	Chambira	0.94	1.76	1.24	CRECIENTE
2	Corrientes	1.27	3.10	2.22	CRECIENTE
3	Curaray	2.00	1.97	1.99	DECRECIENTE
4	Jangosa	1.73	1.79	1.76	CRECIENTE
5	Javari Mirim	1.85	2.22	1.98	CRECIENTE
6	Maniti	0.96	1.47	1.15	CRECIENTE
7	Mazán	1.59	2.60	2.05	CRECIENTE
8	Morona	5.42	3.26	4.39	DECRECIENTE
9	Nanay	0.91	3.27	1.77	CRECIENTE
10	Tambo Yacu	2.65	2.29	2.49	DECRECIENTE
11	Tamshiyacu	0.91	1.94	1.28	CRECIENTE
12	Tigre	1.17	2.92	2.08	CRECIENTE
13	Yanu-Apaga	1.56	2.50	1.99	CRECIENTE

En la mayoría de casos se da un crecimiento en la tasa de migración, en uno se mantiene prácticamente constante y solo en dos hay un decremento. Ello se debe a la mayor presencia de cortes de meandro en los ríos analizados.

Del análisis multitemporal realizado, se obtuvieron dos gráficas (Figura 3.70 y Figura 3.71). La Figura 3.71 representa la Migración versus la normalización del radio de curvatura (Radio de curvatura entre ancho de cauce). Esta gráfica muestra que los resultados obtenidos se agrupan en una campana que sirve como envolvente y tienden a los valores entre 1 y 3 y las migraciones máximas se dan en el rango entre 3 y 5. La Figura 3.70 representa la relación M/B (Migración entre ancho de cauce) y se graficó con la relación R/B (radio de curvatura entre ancho de cauce), el cual es una recomendación de los autores *Hickin* y *Nanson* y *Leopold* y *Wolman* para medir el comportamiento de los meandros. Los puntos hallados tienen la forma y se encuentran dentro de la envolvente propuesta por *Hickin* y *Nanson*, lo cual da la idea que los resultados están dentro de lo previsto y siguen esa tendencia. Asimismo, los valores se encuentran, principalmente, en el rango entre 3 y 5 para los ríos estudiados en esta zona, en comparación de los ríos estudiados por *Hickin* y *Nanson* en Canadá, cuyos valores se encuentran en el rango entre 2 y 4 y los ratios de migración son menores, debido a la geología de la zona y a la medida de su ancho de cauce, lo cual genera que haya menos procesos de erosión y sedimentación en los ríos en estudio. Además, las tasas de migraciones en función del radio de curvatura y ancho del cauce más altas se encuentran en el río Tambo Yacu con un valor cercano a 4.5 m/año (ver Figura 3.70).



Para las características geométricas y fluviomorfológicas de los 13 ríos analizados, se obtuvieron las Ecuaciones 2, 3 y 4, las cuales son empíricas, realizando la respectiva regresión en los resultados hallados del análisis multitemporal.

$$L_M = 10.32 * B^{1.05} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$W_M = 25.96 * B^{0.69} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$L_M = 79.96 * R_C^{0.388} \quad \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

- L<sub>m</sub>: Longitud de onda meándrica
- W<sub>M</sub>: Amplitud de meandro o faja de meandro
- B: Ancho de cauce

Como se logra observar, estas fórmulas son diferentes a las propuestas por autores como *Zeller*, *Leopold* y *Wolman* e *Inglis*, debido, principalmente, a que cada región hidrográfica presenta características únicas que la distinguen como caudal, vegetación, velocidad de partículas, geología, clima, contaminación, entre otras, las cuales influyen de manera apreciable.

Sin embargo, se puede afirmar que hay cierta concordancia de resultados con las fórmulas de *Leopold* y *Wolman*, las cuales se presentan en la tabla 3.6. Se observa que los resultados son diferentes debido a las condiciones que presentaban los ríos que estudiaron dichos autores con los presentados en esta investigación (ecuaciones 3 y 4), por lo cual se decidió optar por nuevas ecuaciones, las cuales se mostraron anteriormente.

**Tabla 3.6:** Propiedades geométricas según diversos criterios

<u>Inglis (Ferguson data)</u>		<u>Inglis (Bates data)</u>	<u>Leopold y Wolman</u>			<u>Zeller</u>	
Lm (m)	A (m)	A (m)	Lm (m)	A (m)	Lm (m)	Lm (m)	A (m)
481.57	1363.20	1049.73	859.69	242.46	1155.55	948.94	348.21
683.05	1933.55	1515.45	1223.69	346.34	4135.87	1362.70	495.65
988.01	2796.81	2233.29	1776.64	504.71	3709.32	1996.98	719.61
323.65	916.17	691.48	575.46	161.65	864.81	628.86	233.09
395.16	1118.62	852.83	704.04	198.16	1419.90	773.26	285.17
295.78	837.28	629.07	525.43	147.46	790.08	572.88	212.82
392.78	1111.86	847.42	699.74	196.94	1282.27	768.42	283.43
997.22	2822.90	2255.18	1793.38	509.52	3690.67	2016.27	726.39
963.60	2727.72	2175.37	1732.31	492.00	2625.82	1945.93	701.66
392.67	1111.57	847.19	699.56	196.89	1185.35	768.21	283.35
204.25	578.19	426.36	361.48	101.07	728.89	390.46	146.42
1310.95	3710.99	3005.90	2364.10	673.52	4131.53	2676.35	957.56
349.68	989.86	750.02	622.23	174.92	1636.67	681.30	252.03

Una fórmula empírica calculada a partir de la Figura 3.71 para la tasa de migración, de acuerdo a los estudios realizados, es la siguiente:

$$M = B * (0.0068 * \ln(\frac{R_c}{B}) + 0.0157) \dots \quad (5)$$

Donde:

- M: Tasa de Migración por año
- B: Ancho de cauce del río
- R<sub>c</sub>: Radio de Curvatura promedio del río

Cabe señalar que esta fórmula solo se aplicaría para ríos que pertenecen a la zona de estudio y no puede extenderse a otro tipo de ecosistema y si se quiere un resultado más exacto, debe realizarse un estudio previo de la zona.

Además, se calculó el número de meandros que contiene cada tramo de los 13 ríos analizados en este trabajo de investigación, los cuales se muestran en la tabla 3.7.



**Tabla 3.7:** Número de meandros de cada tramo de río

Río	Número de meandros
Chambira	170
Corrientes	100
Curaray	246
Jangosa	256
Javari Mirim	224
Maniti	166
Mazán	454
Morona	218
Nanay	106
TamboYacu	304
Tamshiyacu	122
Tigre	136
Yanu-Apaga	74

Y, por último, se calculó el número de cortes de meandro que cada tramo de río presentó a lo largo de su recorrido, los cuales se presentan en la Tabla 3.8. Estos valores influyen para la obtención del valor promedio de migración de un río.

**Tabla 3.8:** Número de cortes meandros de cada tramo de río

Item	Río	Cortes de Meandro			Tendencia
		Número de Cortes de Meandro de Año 1 a Año 2	Número de Cortes de Meandro de Año 2 a Año 3	Número de Cortes de Meandro por año Promedio	
1	Chambira	2.00	1.00	0.14	DECRECIENTE
2	Corrientes	0.00	0.00	0.00	IGUAL
3	Curaray	1.00	2.00	0.14	CRECIENTE
4	Jangosa	0.00	1.00	0.05	CRECIENTE
5	Javari Mirim	2.00	1.00	0.14	DECRECIENTE
6	Maniti	0.00	0.00	0.00	IGUAL
7	Mazán	3.00	2.00	0.23	DECRECIENTE
8	Morona	4.00	0.00	0.17	DECRECIENTE
9	Nanay	0.00	0.00	0.00	IGUAL
10	Tambo Yacu	0.00	1.00	0.05	CRECIENTE
11	Tamshiyacu	2.00	2.00	0.18	IGUAL
12	Tigre	0.00	2.00	0.09	CRECIENTE
13	Yanu-Apaga	1.00	2.00	0.14	CRECIENTE

## **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- En la actualidad, existen varias descripciones de casos particulares de migración de ríos a lo largo del mundo pero, en su mayor parte, están restringidas a una o dos curvas por río. La falta de datos morfológicos, sedimentológicos y de hidráulica básica hace imposible combinar más de algunas de estas observaciones con el fin de obtener un modelo general de migración de ríos para una amplia gama de condiciones ambientales.
- Los resultados que se obtuvieron demuestran que el proceso de migración de las orillas y los canales son predecibles a partir de una metodología empírica como es el análisis multitemporal de imágenes y el cálculo de las sinuosidades de tramos considerables de ríos pertenecientes a una misma Zona Hidrológica gracias a la ayuda de programas especiales diseñados para trabajar con la plataforma GIS por organizaciones interesadas en el tema.
- Los 13 ríos analizados, que pertenecen a la Región Hidrográfica del Amazonas, son meándricos y los estudios de migración propuestos en esta investigación son válidos. Se realizaron las verificaciones necesarias para validar la forma en planta de los ríos en estudio para que los resultados sean válidos.
- La Cuenca del Amazonas tiene un área de 7050000 km<sup>2</sup>, cuenta con una pendiente media de 0.0003 m/m, un factor de forma de 0.141 e índice de compacidad de 8.66. Estos valores dan la idea, según teoría, que se trata de una cuenca alargada y que, en épocas de lluvia y crecidas, tardará en alcanzar caudales picos a comparación de una cuenca cuyo Índice de Capacidad (IC) es cercano a la unidad.
- Un parámetro importante que caracteriza a un río meándrico es la sinuosidad. Este índice representa cuánto el cauce de un río se aparta de ser una línea recta y brinda la idea de que el río es meándrico y su tendencia a migrar y sufrir los procesos de erosión y sedimentación. Los valores para los ríos pertenecientes a la Hidrografía Amazónica varía entre 1.5 y 2.5, aproximadamente. Ello se debe a su naturaleza meándrica tortuosa, la cual se puede afirmar, es característica de esta región. La sinuosidad promedio del río se mantendrá a lo largo del tiempo mediante la migración natural y los cortes de sus meandros.

- Respecto al radio de curvatura de los meandros en los ríos estudiados, se observó que, al aumentar el valor de los mismos, la tasa de migración se hace más grande. Este incremento de la tasa de migración afecta los márgenes del cauce y debe ser considerado para el potencial diseño de alguna obra civil en esta zona, puesto que dañaría los cimientos y terraplenes que sean utilizados para su construcción, lo cual generaría un costo adicional al proyecto.
- También, se analizaron las curvaturas de los tramos de ríos seleccionados. Se concluye que, a menor curvatura, el río tiende a los procesos naturales de sedimentación, puesto que los restos de materiales tienen mayor espacio para depositarse y que, a mayor curvatura, el río tiende a un mayor proceso de erosión, puesto que la fuerza del río hace que la zona cóncava se desgaste con el paso del tiempo.
- Los ríos se encuentran en una constante migración. Ello origina que se produzca erosión y sedimentación en el terreno. En casi todos los casos estudiados, las tasas de migración van aumentando con el transcurso del tiempo y la tendencia es que seguirá en alza. Las principales causas posibles de este incremento son la mecánica de la erosión, el transporte de sedimentos y cortes de meandro, la construcción de obras civiles, la contaminación del medio ambiente y el calentamiento global.
- Los ríos meándricos sufren un proceso de inestabilidad dinámica por el cual el meandro se mueve dentro de su área de inundación disponible. En este estudio se pudo observar que la forma en que migraron los ríos fueron de todas las maneras posibles a saber: extensión, ampliación, rotación, traslación y los denominados brazos o cortes de meandro. Todos estos cambios influyeron en parte, también, a la hora de calcular la tasa de migración de cada río, ya que determinan la estabilidad o no del cauce que sigue.
- Del análisis multitemporal realizado, se observa que para los ríos que pertenecen a la región Hidrográfica del Amazonas, los puntos hallados pertenecientes a los ratios de migración tienen la forma y se encuentran dentro de la envolvente propuesta por *Hickin* y *Nanson* y todos siguen una tendencia estándar en su comportamiento, lo cual brinda la idea que los resultados están dentro de lo previsto y siguen esa tendencia.

- Del análisis multitemporal se obtuvieron relaciones geométricas para el conjunto de ríos pertenecientes a la Región Hidrográfica del Amazonas realizando regresiones a los resultados encontrados. Dichas fórmulas mencionadas son de uso empírico y sirven para determinar las características aproximadas de cualquier río perteneciente a la zona de estudio. Asimismo, se obtuvo una fórmula para la tasa de migración en función del ancho de cauce y el radio de curvatura de un río, las cuales pueden ser usadas para cuantificar el movimiento de los ríos.
- Asimismo, se hizo un análisis de las sinuosidades que tienen cada uno de los tramos de ríos seleccionados. Con ello, se afirma que las sinuosidades son mayores cuando las pendientes son menores y, de manera recíproca, a la inversa, cuando la pendiente es mayor, las sinuosidades son menores en comparación con el otro grupo que se formó y son menores en cantidad.
- Para el análisis de tasas de migración de ríos meándricos, la metodología de *Hickin y Nanson*, a diferencia del análisis multitemporal, es una metodología de rápido cálculo si se posee la información necesaria. Sin embargo, el análisis multitemporal es de mayor dominio y precisión ya que con ella se puede estimar la tasa de migración para cualquier zona de interés. Es por ello que se decidió por utilizar con mayor detalle esta herramienta.
- Los estudios de fluviomorfología son de importante relevancia para el desarrollo de un país. Sus aplicaciones van más allá de los estudios para la construcción de puentes y carreteras, también se aplican para la navegabilidad y la calidad de vida de la población que vive cerca de estos ríos en la Región Hidrográfica del Amazonas. Dichos estudios sirven para predecir el comportamiento fluviomorfológico de los ríos y tomar las medidas necesarias para evitar problemas futuros.
- Se recomienda hacer estudios de cambios fluviomorfológicos mediante la metodología de análisis multitemporal para la construcción de obras civiles en las cercanías de ríos meándricos, sobre todo de los que no han sido estudiados en la presente investigación. Si bien es cierto que se llega a una precisión muy confiable, haciendo un estudio individual se estima mejor las tasas de migración y el tiempo en que las obras y la calidad de vida de las personas que pudiesen vivir cerca puedan verse afectadas para ese río.

- Para el análisis multitemporal se recomienda utilizar imágenes satelitales tomadas con una diferencia de tiempo de 8 a 10 años para el caso de contar con imágenes de mediana resolución (30m = 1pixel). Últimamente, se está contando con mayor resolución en la calidad de las imágenes satelitales, lo que beneficia el estudio de los ríos para nuestro campo.
- El presente estudio puede aplicarse para la construcción de obras civiles que crucen el río o se encuentren en las inmediaciones del mismo. Es necesario poder contar con un diseño previo que involucre los ratios de migración, erosión y sedimentación con la que cuentan los ríos para poder evitar problemas futuros en la ejecución y utilización de la infraestructura. Aquí, se pueden destacar obras civiles como ciudades, vías de transporte, hidrovías, puentes, muelles y puertos.
- La migración de ríos y la erosión y sedimentación asociada son algunos de los procesos geomorfológicos más dinámicos y, por lo tanto, de gran interés científico. Además, el uso intensivo de las personas que viven en las inmediaciones de los valles y la construcción de algunas obras civiles significa que una comprensión detallada de estos procesos es de considerable valor económico y de importancia para la ingeniería.
- El estudio realizado puede profundizarse y servir para futuras investigaciones del tema. Se puede ampliar el ámbito de ríos que se analicen a otras zonas del Perú, por ejemplo, para poder obtener las tendencias en los patrones fluviomorfológicos y meándricos y, de esta forma, obtener fórmulas empíricas más precisas que permitan ser introducidas en los cálculos estructurales de futuras obras civiles que puedan ser llevadas a cabo en la Región.
- Una última recomendación sería que, si se quieren resultados mucho más precisos, se deben conseguir imágenes con una resolución mayor a las presentadas en la presente investigación. Estas imágenes se caracterizan por presentar menor "ruido" o *pixeleo* en ciertas partes de la fotografía pero tienen un costo adicional que debe ser financiado por el Tesista o por alguna Organización que apoye y esté interesada en el tema propuesto.



## **BIBLIOGRAFÍA**

- ABAD, Jorge, GARCÍA, Marcelo, LANGENDOEN, Eddy y MOTTA Davide  
2011 "Review of Basic Theory of the Hydrodynamics and Morphodynamics of Meandering Rivers". *The 7th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. USA
- ABAD, Jorge, GARCÍA, Marcelo  
2005 "RVR Meander. A Toolbox for Re-Meandering of Channelized Streams", *Computer Geosciences*. USA
- HICKIN, Edwar y NANSON, Gerald.  
1986 "A Statistical Analysis of Bank Erosion and Channel Migration in Western Canada". *Geological Society of America Bulletin*. Vol 97.
- HICKIN, Edwar y NANSON, Gerald.  
1983 "Channel Migration and Incision on the Beatton River". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol 109.
- CONSTANTINE, José y DUNNE, Thomas  
2008 *Meander cutoff and the controls of the production of oxbow lakes*. USA, Geological Society of America, 2008
- ROCHA FELICES, Arturo  
1998 *Introducción a la Hidráulica Fluvial*, Primera Edición. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.
- FARÍAS, Héctor, DOMÍNGUEZ, Lucas y REUTER, Alfredo  
2011 "*Migraciones del curso y forma en planta observadas en ríos meandriformes de varias regiones argentinas*". Universidad Nacional de Santiago del Estero. Consulta: Noviembre y Diciembre 2015
- MAZA, José y GARCÍA, Manuel  
2011 Estabilización y rectificación de ríos.



CONESA GARCÍA, Carmelo

1992 "Trazados de baja y alta sinuosidad en ríos españoles". Papeles de Geografía. Universidad de Murcia, Departamento de Geografía.

SOLÓRZANO, Billy

2011 *Procesos Fluviomorfológicos de relevancia en el río Tahuamanu en el ámbito del Puente Tahuamanu*. Lima: UNI

LAGASEE, Peter, SPITZ, William y ZEVENBERGEN, Lyle

2005 A Methodology and ArcView Tools for Predicting Channel Migration. Consulta: Diciembre 2015

[citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.700&rep=rep1&type=pdf](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.700&rep=rep1&type=pdf)

GALLEGO, Sebastián, Moreno, Ramona y CAMPOS, Pablo

2014 Cambios en la geometría de los meandros de la cuenca media del río Arias por efecto de la construcción del embalse Gral. Belgrano. Salta: Universidad Nacional de Salta - Facultad de Ciencias Naturales.

MORALES, Rosario

2009 *Diagnóstico del comportamiento histórico del río Ichilo en el área de Puerto Villarroel (Tesis de Maestría)*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón. Consulta: Diciembre 2015

FARÍAS, Héctor

2005 *Forma en planta de ríos de llanura. Conciliación de criterios empíricos y analíticos para la identificación de umbrales morfológicos*. Buenos Aires: Instituto de Recursos Hídricos.

PAZ SOLDÁN, Mateo y PAZ SOLDÁN, Mariano

1862 *Geografía del Perú*. Vol 1. Paris: Instituto de Francia

SENAMHI

2008 Monitoreo Hidrológico de la calidad de agua en la cuenca amazónica.

MINISTERIO DEL AMBIENTE y MINISTERIO DE AGRICULTURA

2011 El Perú de los Bosques. Lima: Gobierno del Perú

MEDINA, Lucio, SANTISTEBAN, Carlos, OCHOA, Magdie

2012 *Variaciones morfológicas del río Amazonas y susceptibilidad a inundaciones en los alrededores de la ciudad de Iquitos*

SUAREZ, Jaime

2001 *Control de Erosión*. Bogotá: Universidad de Santander

VIDE, Martin

2001 *Ingeniería de ríos*. España: Editorial Alfaomega.

GUTIERREZ, Ronald

2011 *Instructions for Finding and Digitalizing Satellite Images*. Lima.

