



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**ESTUDIO MULTITEMPORAL DE LA MORFODINÁMICA DE LA CUENCA DEL RÍO  
ANDALIÉN ANTE EFECTOS DEL CAMBIO DEL USO DE LA TIERRA Y OBRAS  
HIDRÁULICAS**

POR

**Constanza Sofía González Sanhueza**

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al Grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil

Profesores Guía  
José Vargas Baecheler  
Santiago Yépez Figueroa

Diciembre 2023  
Concepción (Chile)

© 2023 Constanza Sofía González Sanhueza

© 2023 Constanza Sofía González Sanhueza

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## **DEDICATORIA**

*Esta tesis va dedicada a mi familia.*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco el financiamiento otorgado para realizar esta Tesis al proyecto Innova Chile-CORFO para Bienes Públicos de Adaptación al Cambio Climático, titulado SOUTH RIVERS TOOLBOX (19BP-117424): Modelo predictor de la morfodinámica fluvial para apoyar la gestión de cauces (2020-2023), patrocinado por la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas de Chile.

Agradezco a mis profesores guía, Dr. José Vargas y Dr. Santiago Yépez por darme la oportunidad de participar en este proyecto y confiar en mis conocimientos y habilidades, además por su disposición constante a ayudar y a enseñar.

Agradezco al profesor Dr. Rolando Rodríguez por aportar con su conocimiento para llevar a cabo parte de este estudio.

Agradezco al profesor Dr. Octavio Rojas por aportar con su conocimiento y datos necesarios para llevar a cabo este estudio.

Agradezco a la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas por aportar con datos necesarios para llevar a cabo este estudio.

## RESUMEN

En las últimas décadas, Chile, al igual que el resto del mundo, ha experimentado un impacto significativo como consecuencia del cambio climático. La interacción del calentamiento global y el crecimiento demográfico ha resultado en un aumento de las temperaturas y alteraciones en los patrones de precipitación, impulsados predominantemente por el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). La cuenca del río Andalién ubicada en la región del Biobío, se ha visto afectada por el efecto antrópico y por inundaciones causadas por eventos de precipitaciones extremas, el más importante ocurrido en julio del 2006. Por esto, surge la necesidad de investigar los ríos, utilizando nuevas herramientas computacionales y datos históricos, para así contribuir a la planificación y gestión de cauces.

Este estudio tiene como objetivo evaluar las variaciones morfológicas y la evolución del río Andalién en respuesta a cambios en el uso del suelo e intervenciones antropogénicas. Para lograr este objetivo, se emplearon imágenes satelitales temporales del área de estudio, modelos de elevación digitales (datos LiDAR y TamDEM-X) e imágenes aéreas históricas (1945-2020). Estos conjuntos de datos, junto con la herramienta SIG - South River Toolbox (SRT) en QGIS, permiten la extracción de características geomorfológicas clave de un río, facilitando el análisis estático (aplicación del Marco Rivers Styles) y multitemporal de la geomorfología fluvial. Las características esenciales obtenidas del análisis estático abarcan el canal activo, la llanura aluvial, las unidades geomórficas (barras, islas y humedales), el confinamiento y la causa, la sinuosidad, la forma en planta, la pendiente, el área de captación y la potencia específica de la corriente. Además, podemos construir la envolvente del canal activo y su línea central a partir de imágenes del planeta de alta resolución y fotografías aéreas, para evaluar la dinámica natural de migración de los ríos. En este estudio, se desarrolló un método innovador para medir la migración en forma de planta y lo integramos en nuestra herramienta SRT como una característica SIG para el análisis dinámico del río. El análisis multitemporal ha revelado una alta migración lateral del río Andalien entre 1945 y 2020, con dos períodos importantes: (1) de 1945 a 1955, durante la expansión urbana de Concepción hacia el río, con una tasa máxima promedio anual de 17,9 m/ año; y (2) de 2010 a 2020, cuando la canalización y construcción de defensas fluviales promovió la expansión del área urbana hacia el fondo del valle. Esta nueva herramienta SIG abre nuevas perspectivas en el estudio de la dinámica fluvial para evaluar con precisión los cambios retrospectivos en la forma del río.

## ABSTRACT

In recent decades, Chile, like the rest of the world, has experienced a significant impact as result of climate change. The interplay of global warming and population growth has resulted in the increase of temperatures and alterations in precipitation patterns, predominantly driven by the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomenon. The Andalien River basin located in the Biobío region, has been affected by the anthropic effect and by floods caused by extreme rainfall events, the most recent in July 2006. For this reason, the need arises to investigate the rivers, using new computational tools, in order to help the planning and management of watercourses.

The Andalien River basin has been impacted by anthropogenic factors and flooding events resulting from extreme precipitation, with a notable incident occurring in July 2006. Hence, there arises a need to study the behavior of rivers combining novel computational tools and historical data to contribute to the planning and management of watercourses. This study aims to assess the morphological variations and evolution of the Andalien River in response to changes in land use and anthropogenic interventions. To achieve this objective, we employ temporal satellite imagery of the study area, digital elevation models (LiDAR & TamDEM-X data), and historical aerial images (1945-2020). These datasets, in conjunction with the GIS tool - South River Toolbox (SRT) in QGIS, enable the extraction of key geomorphological features of a river, facilitating both static and multi-temporal analysis of fluvial geomorphology. Essential features obtained from the static analysis encompass the active channel, floodplain, geomorphic units (bars, islands, and wetlands), confinement and its cause, sinuosity, planform, slope, catchment area, and specific stream power. Additionally, we can build the active channel's envelope and its centerline from high-resolution Planet images and aerial photographs, to assess the natural river migration dynamics. In this study, we developed an innovative method to measure planform migration and integrated it into our SRT tool as a GIS feature for river's dynamic analysis. Multitemporal analysis has revealed a high lateral migration of the Andalien River between 1945 and 2020, with two important periods: (1) from 1945 to 1955, during the urban expansion of Concepcion towards the river, with a maximum average annual rate of 17.9 m/year; and (2) from 2010 to 2020, when the canalization and construction of river defenses promoted the expansion of the urban area into the valley bottom. This new GIS tool opens new perspectives in the study of the fluvial dynamics to accurately assess retrospective changes in river planform.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Hipótesis .....	2
1.3 Objetivo general .....	2
1.4 Objetivos específicos .....	2
1.5 Metodología de trabajo.....	3
1.6 Principales resultados y conclusiones.....	3
1.7 Organización de la tesis.....	4
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA .....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Teledetección.....	5
2.3 Geomorfología fluvial .....	6
2.3.1 Características de un paisaje fluvial.....	6
2.3.2 Herramientas para caracterizar sistemas fluviales .....	11
2.4 Marco <i>River Styles</i> .....	11
2.5 Estudios realizados en la Cuenca del río Andalién.....	12
2.6 Conclusiones.....	14
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA .....	15
3.1 Introducción.....	15
3.2 Área de estudio .....	15
3.3 Procesamiento de imágenes satelitales y modelos de elevación digital (DEM).....	17
3.3.1 Extracción imágenes satelitales .....	17
3.3.2 Corrección radiométrica imágenes satelitales.....	17
3.3.3 Vuelos Históricos y Georreferenciación.....	18

3.3.4 DEM.....	18
3.3.5 Corrección altimétrica del DEM.....	19
3.4 Análisis Estático de la morfología del río Andalién.....	20
3.4.1 Metodología de desagregación y agregación.....	20
3.4.2 Marco River Styles .....	31
3.5 Análisis Multitemporal de la morfodinámica del río Andalién.....	34
3.5.1 Historial del río desde 1945 al 2020.....	34
3.5.2 Cambio en el uso de la tierra.....	36
3.6 Conclusión.....	37
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	38
4.1 Introducción.....	38
4.2 Análisis Estático de la Morfología .....	38
4.1.1 Desagregación y Agregación de Objetos Geográficos .....	38
4.1.2 Marco River Styles .....	59
4.4 Análisis Multitemporal de la Morfodinámica .....	62
4.4.1 Historial del río Andalién desde 1945 al 2020.....	62
4.4.2 Cambio en el uso de la tierra.....	83
4.5 Conclusiones.....	91
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	92
REFERENCIAS .....	94
ANEXO 3.1 SOUTH RIVERS TOOLBOX: MODELO PREDICTOR DE LA MORFODINAMICA FLUVIAL .....	99
ANEXO 3.2 CÓDIGOS DE LA CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS ESTILOS DE RÍOS .....	101
ANEXO 4.1 CORRECCIÓN ALTIMÉTRICA DEL TanDEM-X.....	104
ANEXO 4.2 MÉTRICAS DE LOS ESTILOS DE RÍOS .....	105



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución de la superficie urbana y pérdida de la naturalidad de unidades geomorfológicas susceptibles a inundación fluvial 1943-2011 .....	2
Figura 2.1 Definición las principales características geomorfológicas de un sistema fluvial.....	7
Figura 2.2 Conceptualización de la llanura de inundación de un tramo del río Villestrup, Dinamarca (Foto de la Agencia de la Naturaleza de Dinamarca).....	8
Figura 2.3 Ilustración del grado de confinamiento de un río .....	9
Figura 2.4 Explicación grafica del transporte de sedimentos desde zona confinadas a no confinadas .....	9
Figura 2.5 Explicación grafica del transporte de sedimentos y magnitud del potencia de corriente ( <i>stream power</i> ) desde zona confinadas a no confinadas .....	10
Figura 2.6 Riesgo de inundación para T=10 y T=500. En T=500 se indica límite máximo alcanzado por la gran inundación del año 2006 .....	13
Figura 2.7 Expansión urbana en el Gran Concepción entre 1955 y 2007 .....	14
Figura 3.1 Ubicación de la cuenca del río Andalién .....	16
Figura 3.2. Metodología de desagregación y agregación de objetos unitarios geográficos .....	20
Figura 3.3 Diagrama de los pasos que sigue el algoritmo del V-BET para la extracción de la llanura de inundación .....	22
Figura 3.4. Esquema para calcular sinuosidad .....	27
Figura 3.5 Árbol procedimental de River Styles.....	33
Figura 3.6 Árbol procedimental <i>River Styles</i> utilizado en la cuenca del río Magdalena, Colombia..	33
Figura 3.7. Transectos para calcular tasas de migración entre los años 1945 (línea morada) y 1955 (línea naranja) .....	36
Figura 4.1 (a) Canal activo río Andalién, (b) Envoltente canal activo.....	39
Figura 4.2 Llanura de inundación a lo largo del río Andalién y zonas características.....	40
Figura 4.3 Llanura de inundación a lo largo del río Andalién .....	41

Figura 4.4 Inundación en la Universidad del Biobío, Estero Nonguén.....	41
Figura 4.5 Mapa a lo largo del río Andalién, desde aguas arriba (a) hacia aguas abajo (h), con las unidades geomórficas delimitadas .....	42
Figura 4.6 Llanura de inundación y canal activo segmentados (a) zona baja del río, (b) zona alta del río .....	43
Figura 4.7 Ancho llanura de inundación por lado desde aguas arriba hacia aguas abajo .....	44
Figura 4.8 Ancho del canal activo y de su envolvente.....	45
Figura 4.9 Área captante a lo largo del río desde aguas arriba hacia aguas abajo, perfil de elevaciones y puntos donde confluyen los esteros al río Andalién .....	46
Figura 4.10 Pendiente cada 20 metros a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo .....	47
Figura 4.11 Localización estaciones fluviométricas y aforos .....	48
Figura 4.12 Relación entre caudal y área de estaciones y aforos realizados en la cuenca del río Andalién .....	48
Figura 4.13 Potencia de la corriente específica y potencia de la corriente específica suavizada cada 20 metros a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo.....	49
Figura 4.14 Comparación de potencia de corriente y potencia de corriente específica cada 20 metros a lo largo del río .....	49
Figura 4.15 Tramo del río que muestra el grado de sinuosidad local .....	50
Figura 4.16 Tramo del río que muestra el grado de confinamiento local .....	51
Figura 4.17 Tipos de forma en planta a lo largo del río .....	52
Figura 4.18 Tipos de forma en planta de un tramo de la parte alta del río (a) .....	52
Figura 4.19 Tipos de forma en planta de un tramo de la parte media del río (b).....	53
Figura 4.20 Tipos de forma en planta de un tramo de la parte baja del río (c) .....	53
Figura 4.21 Tramos generados por <i>Hubert test</i> , por tipo de forma en planta y la intersección entre ellos (tramos) .....	55
Figura 4.22 Gráfico de tramos generados por <i>Hubert test</i> y tramos a lo largo de la llanura de inundación, desde aguas arriba hacia aguas abajo .....	56

Figura 4.23 Gráfico del grado de confinamiento de los tramos a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo .....	57
Figura 4.24 Tipo de sinuosidad en cada tramo a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo .....	58
Figura 4.25 Fotos en terreno a: en el puente Traquecura; b: en el puente Montesol .....	58
Figura 4.26 Mapa de los <i>River Styles</i> identificados en el río Andalién .....	62
Figura 4.27 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 1945.....	64
Figura 4.28 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 1945 .....	64
Figura 4.29 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 1945 .....	65
Figura 4.30 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 1945 .....	65
Figura 4.31 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 1955.....	66
Figura 4.32 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 1955 .....	66
Figura 4.33 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 1955 .....	67
Figura 4.34 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 1955 .....	67
Figura 4.35 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 1978.....	68
Figura 4.36 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 1978.....	68
Figura 4.37 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 1978 .....	69
Figura 4.38 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 1978 .....	69
Figura 4.39 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 1992.....	70
Figura 4.40 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 1992 .....	71
Figura 4.41 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 1992 .....	71
Figura 4.42 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 1992 .....	72
Figura 4.43 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 2010.....	73
Figura 4.44 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 2010 .....	73
Figura 4.45 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 2010 .....	74
Figura 4.46 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 2010 .....	74

Figura 4.47 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 2020.....	75
Figura 4.48 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 2020.....	75
Figura 4.49 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 2020.....	76
Figura 4.50 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 2020.....	76
Figura 4.51 Variación de la línea central entra los años 1945 y 2020.....	77
Figura 4.52 Gráfico de las Tasas Anuales Promedio de migración desde aguas arriba hacia abajo entre los años 1945 y 2020.....	78
Figura 4.53 Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 1945 y 1955.....	79
Figura 4.54 Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 1955 y 1978.....	80
Figura 4.55 Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 1978 y 1992.....	81
Figura 4.56 Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 1992 y 2010.....	82
Figura 4.57 Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 2010 y 2020.....	83
Figura 4.58 Mapa de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 1997.....	84
Figura 4.59 Gráfico del porcentaje de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 1997.....	84
Figura 4.60 Mapa de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 2008.....	85
Figura 4.61 Gráfico del porcentaje de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 2008.....	86
Figura 4.62 Mapa de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 2015.....	87
Figura 4.63 Gráfico del porcentaje de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 2015.....	87
Figura 4.64 Mapa de uso de la tierra en la parte baja de la cuenca del río Andalién en 1997 comparando el canal activo del río Andalién en 1992.....	89
Figura 4.65 Mapa de uso de la tierra en la parte baja de la cuenca del río Andalién en 2008 comparando el canal activo del río Andalién en 2010.....	90
Figura 4.66 Mapa de uso de la tierra en la parte baja de la cuenca del río Andalién en 2015 comparando el canal activo del río Andalién en 2020.....	91
Figura A3.1 Módulos y herramienta del South Rivers Toolbox.....	99
Figura A3.2 Esquema de las principales herramientas del SRT utilizadas en la caracterización del río Andalién	100

---

Figura A4.1 Elevaciones del río aplicando corrección altimétrica ..... 104

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Algunas herramientas existentes para la delimitación de la llanura de inundación, sus datos de entrada y funcionamiento del algoritmo .....	8
Tabla 3.1 Tipos de sinuosidades .....	27
Tabla 3.2. Tipos de forma en planta cuando el río es monocanal .....	28
Tabla 3.3. Tipos de forma en planta cuando el río de transición .....	28
Tabla 3.4. Tipos de forma en planta cuando el río es multicanal (3 o más canales).....	29
Tabla 4.1 Caudales y áreas de estaciones y aforos en la cuenca del río Andalién.....	47
Tabla 4.3 Porcentaje de ocurrencia del confinamiento y su causa con respecto al número total de tramos .....	59
Tabla 4.4 Porcentaje de ocurrencia del número de canales, tipo de planform y material del lecho con respecto al número total de tramos.....	60
Tabla 4.5 Porcentaje de presencia y ausencia de humedales, barras laterales, barras medias e islas con respecto al número total de tramos.....	60
Tabla 4.6 Comparación del uso de la tierra de los años 1997, 2008 y 2015.....	88
Tabla A3.1 Códigos de las características geomorfológicas.....	102
Tabla A3.2 Códigos de las características geomorfológicas (Continuación).....	103
Tabla 4.1 Estilo de río ( <i>River Styles</i> ) de cada tramo y sus atributos más relevantes para la clasificación. ....	105

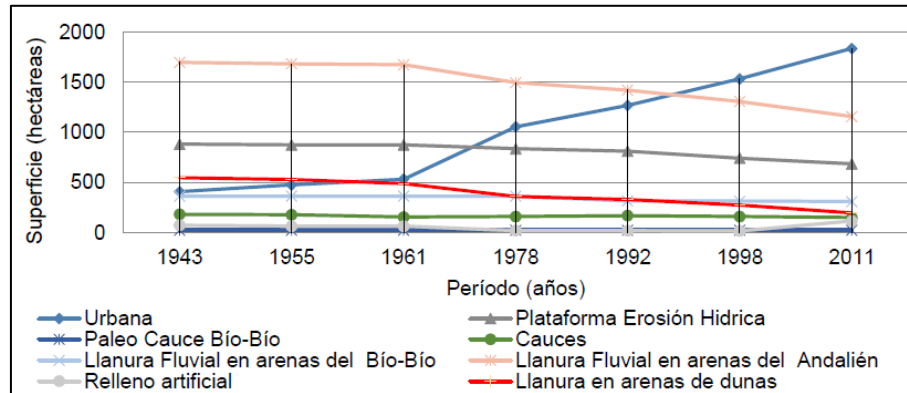
# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

En los últimos años, en el mundo y particularmente en Chile, se han producido cambios importantes en el clima por efectos del calentamiento global, del crecimiento poblacional y la contaminación ambiental provocando el aumento de las temperaturas del aire y el océano, incremento de las mareas, derretimiento de los glaciares y cambios en el patrón de precipitaciones (Intergovernmental Panel of Climate Change, 2014). En el caso particular de las precipitaciones, se han producido cambios importantes en el comportamiento de los ríos, como el aumento de caudales extremos que resultan en crecidas con consecuencias catastróficas para las personas que viven en sectores aledaños o dentro de la planicie de inundación de los ríos. Estos eventos extremos producen un mayor impacto por la rápida expansión urbana en los corredores fluviales, provocando cambios en los sistemas hídricos producto de la impermeabilización del suelo y reducción de la infiltración (Miller *et al.*, 2014)

En Chile, uno de los eventos de precipitación extrema más grandes de los últimos años ocurrió en 2006, donde se vieron afectadas la V, VI, VII y VIII región. La consecuencia social fue devastadora, con 18 muertos, 62 416 damnificados y 95 862 afectados (Rojas *et al.*, 2014). Una de las cuencas que se vio comprometida por este evento extremo fue la cuenca del río Andalién, que se localiza en la latitud 36.5°S y la longitud 73°O en la VIII región, la cual concentra el 90 % de su población en la zona inferior (cercana a su desembocadura), y donde se produjo el mayor daño en los sectores aledaños al corredor fluvial producto de las inundaciones provocadas por este evento. La superficie urbana de la cuenca del río Andalién se incrementó en 1458 ha en 68 años, lo que ha provocado cambios en la red hídrica, como la disminución de la llanura de inundación y longitud del río (Figura 1.1), lo cual ha tenido como consecuencia 21 eventos de inundaciones entre 1960-2010, así como el aumento de la zona de peligrosidad de la cuenca (Rojas *et al.*, 2016).

En este contexto, es necesario realizar estudios implementando nuevas tecnologías e información histórica que permitan determinar cuál será el comportamiento del río en caso de que se produzca un evento de crecida extrema similar a la del 2006 y también conocer su geomorfología fluvial. Esto permitirá a la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y otros organismos responsables, realizar una mejor planificación y gestión de cauces y sus sectores aledaños.



**Figura 1.1. Evolución de la superficie urbana y pérdida de la naturalidad de unidades geomorfológicas susceptibles a inundación fluvial 1943-2011**

Fuente: Rojas *et al.* (2016)

## 1.2 Hipótesis

La modificación del patrón geomorfológico del río Andalién afectado por el cambio del uso de la tierra y la presión antrópica en las últimas décadas, dificultando la gestión de su cauce ante un evento de crecida extrema.

## 1.3 Objetivo general

Evaluar los procesos de ajuste y evolución morfológica de la cuenca del río Andalién, ante cambios en el uso de la tierra y la intervención antrópica.

## 1.4 Objetivos específicos

1. Desarrollar un análisis estático (actual) de la morfología de la cuenca del río Andalién.
2. Desarrollar un análisis multitemporal sobre la evolución de la morfología de la cuenca del río Andalién.
3. Analizar los efectos del cambio del uso de la tierra por la intervención antrópica
4. Proponer medidas para ayudar a la planificación y gestión de la cuenca del río Andalién.



## 1.5 Metodología de trabajo

Este trabajo se divide en dos etapas, la primera consiste en el análisis estático de la geomorfología de la cuenca del río Andalién y la segunda en el análisis multitemporal del río Andalién. La primera etapa se divide en 4 fases, donde la primera fase consiste en la obtención y descarga de los datos de entrada, los cuales son imágenes satelitales para diferentes fechas de adquisición y modelos de elevación digital (por sus siglas en inglés DEM). La segunda fase corresponde a la digitalización de imágenes satelitales. En esta parte se aplica una corrección atmosférica a las imágenes satelitales para clasificar y delimitar posteriormente los cuerpos de agua y seguidamente se digitalizan elementos como: el canal activo, las unidades geomórficas, cuerpos de agua, envolvente del canal activo y llanura de inundación dentro de una interfaz SIG (Sistema de Información Geográfica). En la tercera fase se aplica la metodología de desagregación y agregación espacial para obtener los atributos y métricas a lo largo del río Andalién utilizando la herramienta *South Rivers Toolbox* en QGIS. En la última fase se realiza la caracterización geomorfológica del río, mediante la clasificación de los estilos de río, para luego finalizar con el análisis y propuestas para una mejor planificación y gestión del río Andalién. La segunda etapa se divide en 3 fases, donde la primera fase consiste en construir un historial del río Andalién entre los años 1945 y 2020 utilizando imágenes historias, las cuales se georreferencian y luego digitalizan. En la segunda fase se analiza el cambio que ha tenido la cuenca respecto cambio en el uso del suelo y el efecto que ha tenido la intervención antrópica. Finalmente, en la tercera fase se proponen medidas para ayudar a la planificación y gestión de la cuenca del río Andalién.

## 1.6 Principales resultados y conclusiones

Los principales resultados obtenidos de este estudio son la caracterización geomorfológica del río Andalién y la clasificación de los estilos de ríos a lo largo del cauce. Estos resultados finales permiten obtener otros resultados como métricas geomorfológicas del río, de su llanura de inundación y de sus unidades geomorfológicas en toda su extensión, además de conocer su grado y causa de confinamiento, su configuración en planta y sinuosidad. Son precisamente estas características las que permiten conocer la morfología del río Andalién de forma sinóptica. Las principales conclusiones son que el río Andalién presenta mayoritariamente un patrón monocal, se encuentra confinado y es más sinuoso en la parte alta. Además, tiene una alta capacidad de arrastre de sedimentos en la parte alta,

los cuales son depositados en la zona de la desembocadura, producto de su baja pendiente. El río Andalién presenta 12 estilos fluviales, los cuales se pueden agrupar en tres secciones con características geomorfológicas similares. Los principales resultados del análisis multitemporal arroja luz una alta migración lateral del río Andalién entre 1945 y 2020, con dos períodos importantes: (1) de 1945 a 1955, durante la expansión urbana de Concepción hacia el río, con una tasa máxima promedio anual de 17,9 m/ año; y (2) de 2010 a 2020, cuando la canalización y construcción de defensas fluviales promovió la expansión del área urbana hacia el fondo del valle.

### **1.7 Organización de la tesis**

El capítulo 2 presenta los antecedentes generales de la morfología fluvial, caracterización geomorfológica y estudios realizados en el río Andalién. El tercer capítulo presenta las metodologías utilizadas, la desagregación y agregación espacial, la clasificación de los estilos de ríos basada en el marco *River Styles* y el análisis multitemporal. El cuarto capítulo presenta los resultados de las métricas y características geomorfológicas obtenidas a lo largo del río Andalién, la clasificación no supervisada (*Método Cluster*) de los estilos de ríos, el historial del río Andalién entre 1945 y 2020 y la variación del cambio en el uso de la tierra. Finalmente, el quinto capítulo corresponde a las conclusiones y discusión de los resultados obtenidos, además de un análisis de éstos y futuras líneas de investigación

## CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

### 2.1 Introducción

En el presente capítulo se describen los principales conceptos y definiciones sobre teledetección y su influencia en los estudios sobre geomorfología fluvial. Se describe la caracterización geomorfológica y se explican y muestran las características que componen el paisaje fluvial. Por otro lado, se explica y describe el marco *River Style* y cuál ha sido su impacto en el mundo. Finalmente, se muestran los estudios realizados en la cuenca del río Andalién posterior al evento de crecida del 2006.

### 2.2 Teledetección

La teledetección es la técnica que permite recoger información de un objeto o fenómeno a partir de sensores remotos para luego realizar un análisis e interpretación de los datos captados. Los sensores remotos se clasifican como pasivos y activos. Los sensores pasivos son los que registran la luz solar reflejada (ópticos) y la temperatura emitida (térmicos) de la superficie de la tierra. Los sensores pasivos captan la información a través de pulsos de energía, a los cuales se les mide el tiempo de propagación y la intensidad (Chuvieco, 1996).

Actualmente, se tiene información de imágenes satelitales y modelos de elevación digital captados por diferentes sensores a varias resoluciones. Algunas de las imágenes satelitales disponibles para estudiar paisajes fluviales con las imágenes *Planet Scope*, *Rapid Eye*, MODIS y LANDSAT-8, las cuales son de diferentes resoluciones y captan imágenes a diferentes escalas temporales. Para los análisis topográficos se utilizaron modelos de elevación digital con datos asociados a la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*), TanDEM-X y LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Este último sensor permite obtener la topografía de un paisaje a alta resolución espacial (a nivel centimétrico), además de distinguir de mejor forma la vegetación, agua y tierra (Bailly *et al.*, 2012).

En la actualidad, según Piégay *et al.* (2020) se están utilizando herramientas de teledetección para obtener datos temporales de los comportamientos de los ríos e información topográfica para luego,

mediante el uso de un sistema de información geográfica (SIG) y series de fotografías aéreas históricas, determinar características geomorfológicas claves como el ancho del canal activo o la sinuosidad del río, así como también para analizar los cambios producidos por el efecto antrópico.

## **2.3 Geomorfología fluvial**

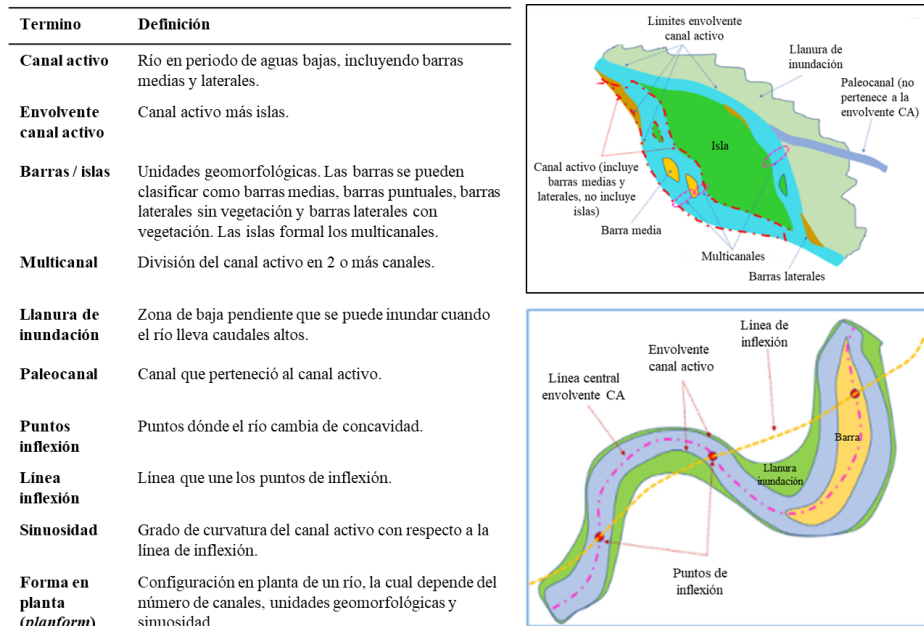
La caracterización geomorfológica de un paisaje fluvial consiste en la explicación y descripción de unidades geomorfológicas y su historia. Wheaton *et al.* (2015) explican los elementos y accidentes geográficos que componen el paisaje fluvial y que son importantes para la caracterización de un río, clasificándose según sus características topográficas como la elevación, pendiente, formación rocosa, estratificación y tipo de suelo; algunos ejemplos de accidentes geográficos son montañas, valles, dunas, meandros, cascadas, entre otros. Las características geomorfológicas de un río permiten diferenciarlo de otro y obtener información histórica de este, como su llanura de inundación y trayectorias pasada o futuras. Otras características de los ríos son la sinuosidad, forma en planta (monocanal, multicanal o trenzado), la composición del material del lecho o llanura de inundación, así como el tipo de confinamiento y su causa.

### **2.3.1 Características de un paisaje fluvial**

Los paisajes fluviales se componen de un conjunto de unidades geomorfológicas que emergen en diferentes escalas espaciales y temporales. Las unidades de paisaje fluvial se pueden describir (i) longitudinalmente, considerando patrones hidráulicos, geomorfológicos y ecológicos, (ii) transversalmente, para enfocarse en las interacciones biomorfológicas entre canales y llanuras de inundación o laderas a través de la red de drenaje, (iii) verticalmente, enfocándose en los intercambios entre las aguas superficiales y aguas subterráneas y (iv) en el tiempo, para resaltar las influencias de las presiones antropogénicas o los cambios en los eventos de inundación a una escala de 1 a 100 años (Roux *et al.*, 2015).

Los principales elementos geomorfológicos que componen un sistema fluvial son el canal activo, la llanura de inundación, las unidades geomórficas del río (barras e islas), unidades geomórficas de la

llanura de inundación (humedales, diques, arcos, paleo canales y crestas) y cuerpos de agua (Figura 2.1). Además, según el comportamiento y métricas que tengan estos elementos geomorfológicos se pueden clasificar según su grado de confinamiento, sinuosidad, forma en planta (*planform*) y potencia de corriente (*stream power*).



**Figura 2.1 Definición las principales características geomorfológicas de un sistema fluvial**

Fuente: Adaptado de: Nardini y Brierley (2021)

### 2.3.1.1 Llanura de inundación (*Valley Bottom*)

La llanura de inundación (*Valley Bottom*) (Figura 2.2) tiene importancia hidrológica, geomorfológica y ecológica y son amortiguadores para proteger el río de la carga de nutrientes de las tierras altas provenientes de la agricultura y otras fuentes. Son áreas relativamente planas y bajas del terreno adyacente al río y delimitado por pendientes crecientes en la transición a las tierras altas (Sechu *et al.*, 2020).

La correcta delimitación del *Valley Bottom* (VB) para estudiar el comportamiento de un paisaje fluvial es esencial, por esto, existen diversas herramientas de delimitación en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Entre ellas se diferencian según el algoritmo que utilizan, algunas funcionan por inundación (*flooding*) y otras por pendiente (*slope*), este último tipo se itera varias veces hasta

encontrar la pendiente correcta. Además, algunos utilizan solo un DEM como parámetro de entrada y otras requiera también la red de drenaje (*Stream network*). La Tabla 2.1 muestra algunas de las herramientas más recientes utilizadas en SIG.



**Figura 2.2** Conceptualización de la llanura de inundación de un tramo del río Villestrup, Dinamarca (Foto de la Agencia de la Naturaleza de Dinamarca)

Fuente: Sechu *et al.* (2020)

**Tabla 2.1** Algunas herramientas existentes para la delimitación de la llanura de inundación, sus datos de entrada y funcionamiento del algoritmo

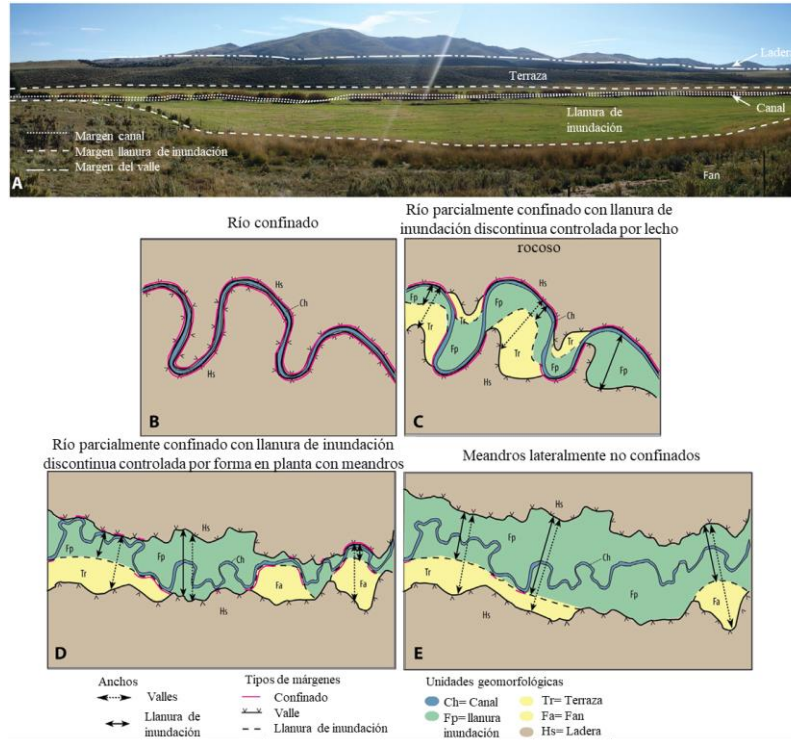
Herramienta	Datos de entrada	Funcionamiento Algoritmo	Referencia
Height Above River (HAR)	DEM, red de drenaje	Inundación	Dilts <i>et al.</i> (2010)
River Bathymetry Toolkit (RBT)	DEM	Inundación	McKean <i>et al.</i> (2009)
Multi-resolution Valley Bottom Flatness (MR VBF)	DEM	Pendiente	Gallant and Dowling (2003)
Fluvial Corridor Toolbox	DEM	Pendiente	Roux <i>et al.</i> (2015)
Valley Bottom Extraction Toolbox (V-BET)	DEM, red de drenaje	Pendiente	Gilbert <i>et al.</i> (2016)

Fuente: Sechu *et al.* (2020)

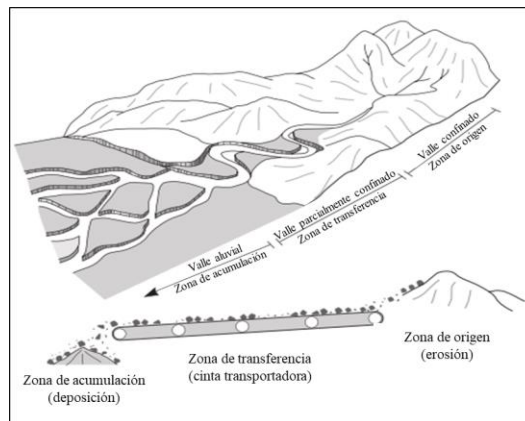
### 2.3.1.2 Confinamiento

La llanura de inundación se puede clasificar como confinada, parcialmente confinada o no confinada (Brierley y Fryirs, 2005), analizando el porcentaje del borde del canal activo que coincide con el borde de la llanura de inundación, la Figura 2.3 muestra la imagen de un paisaje fluvial y cuatro casos de confinamiento. Las causas de confinamiento pueden ser variadas, pero las más comunes son la forma en planta (*planform*), valle o infraestructura, que se explican por intervención antrópica de los ríos.

La causa de confinamiento está directamente relacionada con el transporte de sedimentos (Figura 2.4). La zona mayormente confinada de un río no permite deposición de sedimentos en la llanura de inundación producto del confinamiento, lo que implica que esta sea una zona de erosión y fuente de sedimentos que son transportados aguas abajo. A medida que el río se desconfinan y la pendiente disminuye, se depositan los sedimentos en la llanura de inundación.



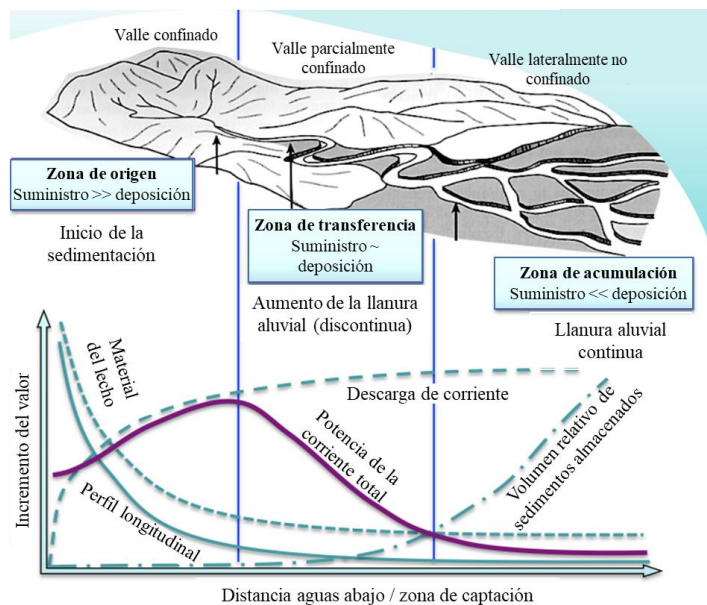
**Figura 2.3 Ilustración del grado de confinamiento de un río**  
 Fuente: Weathon *et al.* (2015)



**Figura 2.4 Explicación grafica del transporte de sedimentos desde zona confinadas a no confinadas**  
 Fuente: Brierley y Fryirs (2005)

### 2.3.1.3 Potencia de corriente

La potencia de la corriente (*stream power*) es la tasa de energía del flujo en un lecho por unidad de longitud de corriente (Gartner, 2016), su cálculo es utilizado en el estudio del comportamiento de los ríos ya que permite determinar las zonas más susceptibles a peligros de erosión, sedimentación y deterioro de la calidad de agua. El transporte de sedimentos y la potencia de la corriente tienen relación directa, ya que mientras mayor sea su valor, mayor será la capacidad del río de transportar sedimentos. En cambio, mientras menor sea su valor, se produce deposición de sedimentos. La Figura 2.5 muestra esquematizada la relación que tiene el valor de la potencia de la corriente, el transporte de sedimentos y la pendiente. En nuestro estudio utilizamos también la potencia de la corriente específica (*specific stream power*) es una medida normalizada que considera el área de la sección transversal para comparar el poder de flujo entre diferentes cuerpos de agua. Ambos conceptos son importantes en la geomorfología fluvial y en el estudio de la dinámica de los ríos.



**Figura 2.5 Explicación grafica del transporte de sedimentos y magnitud del potencia de corriente (*stream power*) desde zona confinadas a no confinadas**

Fuente: Adaptado de: Center for agriculture, Food, and the Environment (2014)



### 2.3.2 Herramientas para caracterizar sistemas fluviales

Los Sistemas de Información Geográficas (SIG) han sido herramientas esenciales para caracterizar paisajes fluviales y entender procesos biogeomorfológicos. En la actualidad existen varias cajas de herramientas SIG y complementos, que permiten realizar caracterizaciones de los corredores fluviales. Sin embargo, la mayoría no permite realizar una caracterización planimétrica y longitudinal a escalas variables. Se muestran algunas de estas herramientas:

- a) *ArcHydroTools*: conjunto de herramientas para realizar una caracterización hidrológica y de la cuenca.
- b) GRASS: herramienta de caracterización morfométrica de la cuenca.
- c) Saga GIS: herramienta de delimitación de cuencas múltiples
- d) *River Bathymetric Toolkit* (RBT): herramienta para acceder a unidades fluviales y métricas hidromórficas (secciones transversales).
- e) *Fluvial Corridor Toolbox* (FCT): diseñada para extraer y caracterizar sistemas fluviales a gran escala a lo largo de la red de flujo.
- f) *South Rivers Toolbox* (SRT): diseñada para extraer, caracterizar y predecir la morfología de un sistema fluvial a diferentes escalas. Esta herramienta innovadora es la más reciente, y se trata de un Plugin programado en Python e integrado a la interfaz QGIS, desarrollado en el contexto de nuestro estudio.

### 2.4 Marco *River Styles*

Brierley y Fryirs (2005) establecieron el marco “*River Styles*” que tiene por objetivo la interpretación, comportamiento, condición y potencial de recuperación de un río. Además, permite realizar un análisis integrado de la morfodinámica fluvial a nivel de cuenca. El marco “*River Styles*” se ha utilizado en varias cuencas del mundo con diferentes objetivos. Como ejemplo, se muestran algunas cuencas en que se ha aplicado y su objetivo.

- Cuenca del río Magdalena, Colombia (Nardini, Yépez y Bejarano, 2020): En esta cuenca se aplicó el marco “*Rivers Styles*” con el objetivo de monitorear y predecir el comportamiento

del río. El río Magdalena al ser uno de los ríos más grandes de Colombia cuenta con intervención antrópica, en este caso represas importantes.

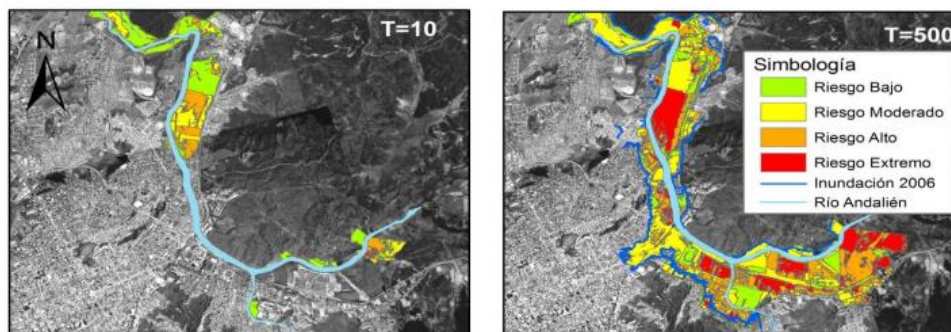
- Cuenca de Bega, New South Wales, Australia (Brierley y Kistie, 2000): En esta cuenca la aplicación de “*River Styles*” tuvo como objetivo la restauración de un río, caracterizado por grados altos de erosión y sedimentación.
- Cuenca del río Macae, Rio de Janeiro, Brasil (Brierley *et al.*, 2019): En esta cuenca el objetivo de la aplicación del marco “*River Styles*” fue apoyar la gestión de agua y tierra. Esta es una cuenca con intervención antrópica donde se proyectan restauraciones de cauces en algunos sectores.
- Cuencas de Europa (Bizzi *et al.*, 2014): en estas cuencas se ha aplicado el marco “*River Styles*” con el objetivo de restaurar los ríos intervenidos antrópicamente.

Las cuencas nombradas anteriormente tienen como objetivo de la aplicación del marco “*River Styles*” enfocado en la restauración de ríos y el monitoreo de grandes ríos con presencia de grandes obras hidráulicas, principalmente asociadas a represas.

## 2.5 Estudios realizados en la Cuenca del río Andalién

La cuenca del río Andalién es una cuenca costera que se ha visto afectada en las últimas décadas por el cambio del uso de suelo. El cambio del uso de suelo se ha producido por el crecimiento de las zonas urbanas, al encontrarse en el centro de la región del Biobío. La segunda región más importante en población en Chile, lo que ha producido el aumento de la urbanización de humedales, riberas y lechos de los ríos, lo que ha modificado la red hídrica. Producto de la urbanización en zonas aledañas al río, este perdió 50,3 ha de cauce en su tramo inferior y aumentó 20,2 ha en su tramo superior, ha tenido una pérdida neta del -18,4 % de la superficie del cauce (Rojas, 2015). Desde el evento de crecida extrema del 2006, varios autores han decidido estudiar con mayor profundidad la hidráulica, hidrología, así como el uso del suelo del río Andalién, para entender y tomar medidas preventivas de cómo se comporta el río. Rojas *et al.* (2016) realiza un estudio en la parte baja del río Andalién sobre las zonas con mayor riesgo de inundaciones para diferentes periodos de retorno, además realiza una comparación de los resultados obtenidos con la zona inundada en julio del 2006 (Figura 2.6). Vidal y Romero (2007), realizaron un estudio en la parte baja de la cuenca sobre los cambios del uso de suelo

donde se pudo concluir que hubo un incremento de 700 % de la superficie urbanizada entre 1955 y 2007 (Figura 2.7), es decir, hubo un cambio en uso de la tierra lo que provoca una impermeabilización del suelo y en consecuencia, un mayor riesgo de inundación. Debido al cambio del uso de la tierra y urbanización sobre paisajes ambientalmente sensibles, Link *et al.* (2019) realizan una evaluación de riesgo por inundaciones en la parte baja de la cuenca, donde se realiza un estudio multidisciplinario que combina la paleohidrogeomorfología, hidráulica y planificación urbana, lo que permitió entender y realizar una reconstrucción de la geomorfología del río.



**Figura 2.6 Riesgo de inundación para T=10 y T=500. En T=500 se indica límite máximo alcanzado por la gran inundación del año 2006**

Fuente: Rojas *et al.* (2016)

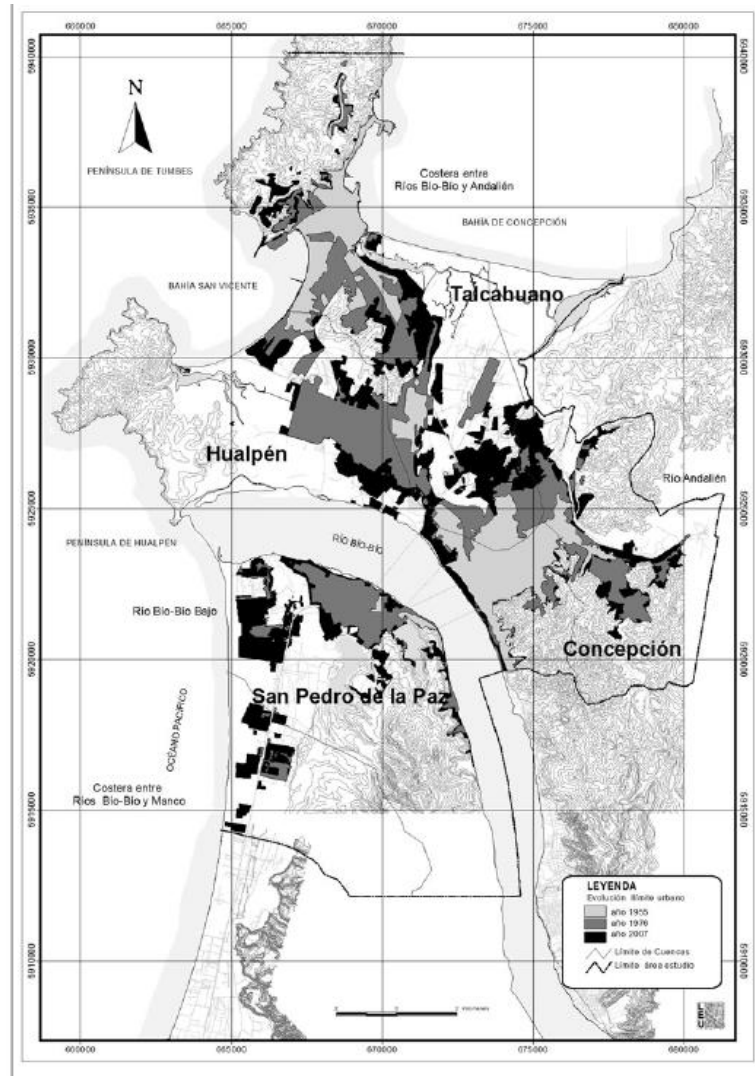


Figura 2.7 Expansión urbana en el Gran Concepción entre 1955 y 2007

Fuente: Vidal y Romero (2007)

## 2.6 Conclusiones

En este capítulo se muestran y explican las principales características geomorfológicas que componen un sistema fluvial. Se describe la teledetección y cuál es su rol en el estudio de la morfología de los ríos. Luego se muestran algunas herramientas disponibles para extraer las componentes morfológicas de una cuenca. También, se describe el Marco *River Style* y las cuencas del mundo donde se ha aplicado. Finalmente, se realiza una revisión bibliográfica de los estudios realizados en la cuenca del Río Andalién.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo se presenta el área de estudio, los datos de entrada y las metodologías utilizadas.

Para realizar la caracterización geomorfológica del río Andalién se aplicaron dos metodologías, la primera aborda la de desagregación y agregación de objetos geográficos, basado en el trabajo de Alber y Piégay (2011), la cual se desarrolló utilizando la herramienta *South Rivers Toolbox* (SRT) en QGIS (<https://vosores.github.io/SouthRiversToolbox/web/plugins.xml>). SRT es un complemento desarrollado por el proyecto Innova Chile-CORFO para Bienes Públicos de Adaptación al Cambio Climático, titulado SOUTH RIVERS TOOLBOX: Modelo predictor de la morfodinámica fluvial para apoyar la gestión de cauces (Anexo A3.1), el cual se utiliza para extraer las métricas y principales características en un sistema fluvial de forma semiautomática. La segunda metodología aplicada es el marco *River Styles* (Brierley y Fryirs, 2005), el cual toma como datos de entrada los obtenidos con el SRT para luego realizar una clasificación de estilos de ríos mediante un árbol procedimental y una herramienta de agrupamiento o clasificación según sus características y métricas más relevantes.

### 3.2 Área de estudio

La zona de estudio es el río Andalién, el drenaje principal de la cuenca que lleva su nombre. La cuenca del río Andalién está ubicada en la octava región de Chile, en la latitud 36.5°S y longitud 73°O (Figura 3.1), la cual es la segunda con más población en el país. Es una cuenca costera de aproximadamente 790 km<sup>2</sup> de régimen pluvial que nace en la cordillera de la costa hasta desembocar en el Océano Pacífico.

El río Andalién nace de la unión de los esteros Poñén y Curapalihue hasta desembocar en el océano Pacífico, zona donde se encuentra el humedal Rocuant (Dirección General de Aguas [DGA], 2021). El río tiene aproximadamente 35 km de largo y confluyen a él los esteros Nonguén, Palomares, Queule y Chaimávida. El régimen del río es natural pero aun así presenta importantes intervenciones

antrópicas que permiten mitigar las inundaciones generadas por la ocurrencia de eventos extremos de precipitación, como es el encauzamiento realizado, por parte de la Dirección de Obras Hidráulicas, en el 2015, en la parte baja del río.

La geomorfología de la cuenca se destaca por tener relieves de erosión (cordones y plataformas) y relieves de acumulación (valles, terrazas fluviales, llanuras idiomorfas, cordones litorales, marismas y dunas) (Jaque, 2008).

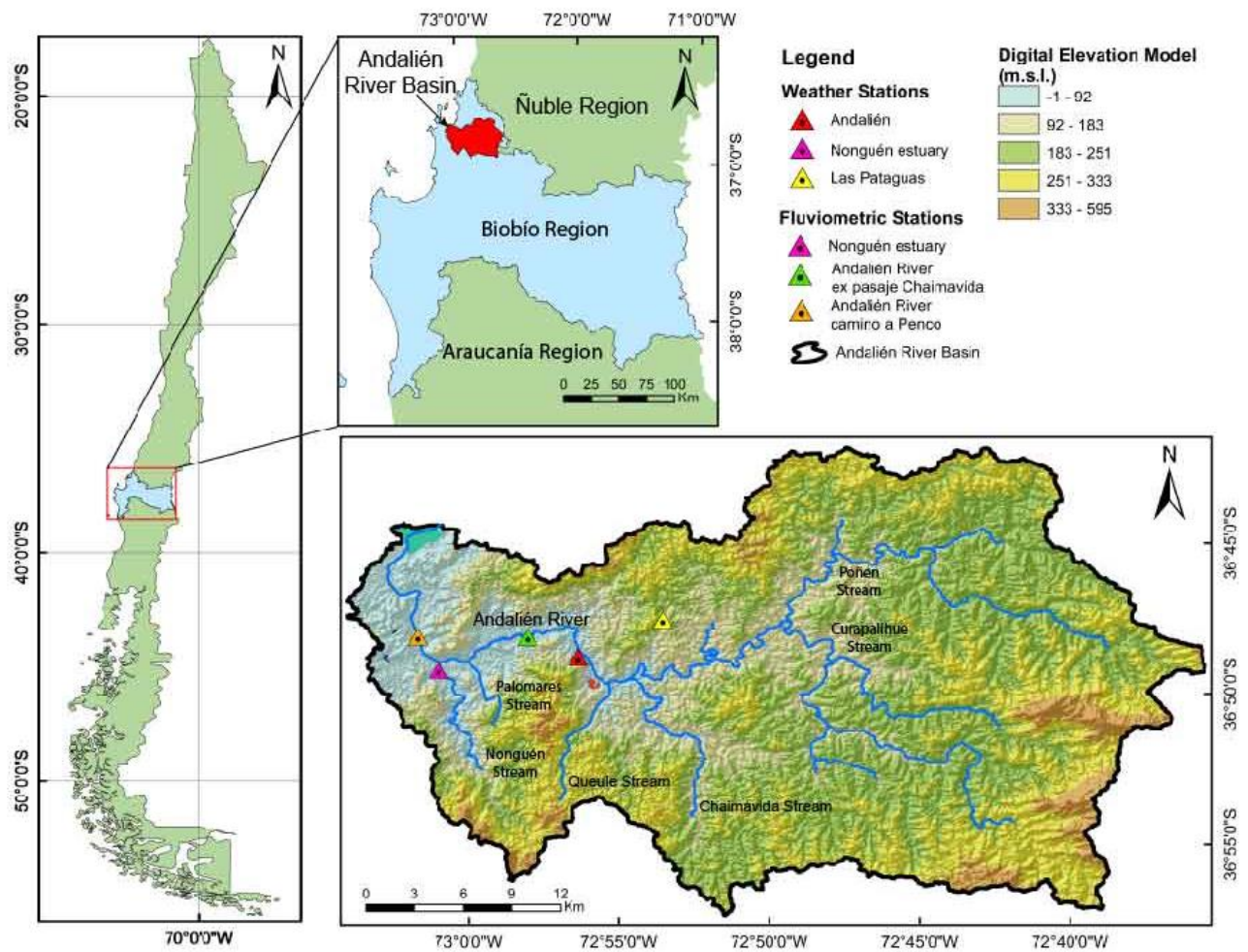


Figura 3.1 Ubicación de la cuenca del río Andalién

### 3.3 Procesamiento de imágenes satelitales y modelos de elevación digital (DEM)

Para la extracción de las características geomorfológicas se utilizaron tres datos de entrada, imágenes satelitales temporales, seis vuelos aerofotogramétricos históricos y tres DEM (LIDAR, TanDEM-x y AlosWord3D), combinando toda la información disponible para abarcar la zona de estudio.

#### 3.3.1 Extracción imágenes satelitales

Las imágenes satelitales permiten delimitar el canal activo y la presencia de unidades geomorfológicas en la zona de estudio. Para obtener resultados adecuados, es necesario contar con imágenes satelitales extraídas para diferentes periodos del régimen hidrológico, es decir, imágenes captadas en días de mayor y menor caudal del mismo año hidrológico. Para este estudio se extrajeron imágenes *Planet* captadas por la constelación de nanosatélites *PlanetScope* de 3 metros de resolución espacial en periodos de aguas altas y aguas bajas. Se utilizaron imágenes de la plataforma ESRI de alta resolución del mismo año hidrológico, debido a la gran presencia de vegetación alta aguas arriba del río Andalién y la necesidad de imágenes con mayor resolución espacial, para una mejor digitalización de los elementos.

#### 3.3.2 Corrección radiométrica imágenes satelitales

Las imágenes satelitales descargadas fueron corregidas mediante el software ENVI-IDL, comenzando con la corrección atmosférica de los datos en radiancia para calibrarlos a valores de reflectancia; es decir se calibran los datos digitales a datos de Reflectancia mediante la herramienta *Radiometric Calibration*. Luego se unen las imágenes mediante la herramienta *Seamless Mosaic* para obtener un solo mosaico de imagen de la zona de estudio. En la imagen mosaico se verificó si los valores de Reflectancia superan el valor 1, se realizó una normalización mediante la herramienta *Band Math* utilizando la Ecuación 3.1.

$$(B1 \leq 0) * 0 + (B1 \geq 1) * 1 + (B1 > 0 \text{ and } B1 < 1) * \text{float}(b1) / 1 \quad (3.1)$$

Dónde, B1 corresponde a las cuatro bandas de la imagen.

Corregida la imagen satelital se crea una nueva capa *raster* usando el índice normalizado de agua (NDWI), el cual se calcula con la herramienta *Band Math* para lo cual se utilizó la Ecuación 3.2.

$$NDWI = \frac{(b1-b2)}{(b1+b2)} \quad (3.2)$$

Dónde, b1 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR) y b2 a la banda verde (GREEN). Los resultados del índice pueden oscilar entre -1 y +1. Las superficies con vegetación tienden a tener valores positivos, el suelo desnudo puede tener cerca de cero y las características de agua abierta tienen valores negativos (McFeeters, 1996). Los valores menores a cero se transformaron a formato vectorial y se guardó la información como un archivo *shapefile* para posteriormente ser editado y depurado dentro de una plataforma SIG.

### 3.3.3 Vuelos Históricos y Georreferenciación

Para el análisis multitemporal del comportamiento del río Andalién, se dispusieron de seis vuelos aerofotogramétricos de los años 1945, 1955, 1961, 1978, 1992 y 1998. Las imágenes disponibles fueron georreferenciadas utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcGIS y una imagen base del año 2022. Para determinar si el ajuste de la imagen georreferenciada es correcto se utilizaron dos métodos, por polinomio de 1er orden o por *spline*. El polinomio de primer orden utiliza 4 o 5 puntos de control que generan un envolvente en sentido horario u antihorario y se calibra según el valor obtenido del error cuadrático medio (RMSE). Para el caso de la *spline*, se utilizan más de 10 puntos de control que obligan a que el RMSE tienda a ser igual 0, lo que implica que la imagen se distorsione para calzar con los puntos de control.

### 3.3.4 DEM

Los modelos de elevación digital son una representación altimétrica de una zona, lo que permite realizar caracterización de terrenos y conocer la altura con respecto al nivel del mar. Estos son utilizados en hidrología con el fin de calcular y extraer métricas y características de las cuencas mediante técnicas SIG (Sistema de Información Geográfica). Existen DEMs de diferente resolución



espacial, mientras menor sea el tamaño del píxel, mejor será el nivel de detalle de la representación del terreno.

Para este estudio se utilizaron tres datos de DEM, un LIDAR de resolución espacial 5 metros de octubre del 2012 (Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo [SEREMI MINVU], 2012), el DEM de la agencia espacial alemana TanDEM-x de resolución espacial 10 metros y el DEM de *Alos World 3D-30m* (AW3D30). El DEM LIDAR abarca solo la zona baja del río Andalién, el TanDEM-X abarca el 80 % de la cuenca y el DEM de 30 metros abarca el 100 % de la cuenca. Sin embargo, este último es el de menor resolución espacial, por lo que se generaron nuevos DEMs a partir de un mosaico con los datos de mayor resolución espacial

### 3.3.5 Corrección altimétrica del DEM

La información altimétrica captada por los sensores remotos para construir un modelo de elevación de digital (DEM) son medidas sobre el modelo elipsoidal de la tierra (alturas elipsoidales) o sobre un modelo ortométrico (alturas ortométricas). Para transformar un DEM con alturas elipsoidales a ortométricas se realiza una corrección usando la ondulación geoidal a nivel regional aplicando la Ecuación 3.3.

$$h = H + N \quad (3.3)$$

Dónde,  $h$  es la altura elipsoidal,  $H$  es la altura ortométrica y  $N$  es la ondulación geoidal que depende de la ubicación de la zona de estudio. La corrección altimétrica se realizó al TanDEM-X para combinar los datos de la elevación del río con los del DEM LIDAR. Este último, no necesita corrección altimétrica ya que sus alturas son ortométricas con alta precisión.

### 3.4 Análisis Estático de la morfología del río Andalién

#### 3.4.1 Metodología de desagregación y agregación

La metodología de desagregación y agregación de objetos unitarios geográficos que se utilizó en este trabajo es la descrita por Albert y Piegay (2011). Esta permite extraer las principales características geomorfológicas de una cuenca para luego realizar una clasificación de estas. Esta metodología se encuentra esquematizada en la Figura 3.2, la cual consiste en extraer Objetos Geográficos Unitarios (UGO) a partir de imágenes satelitales temporales, combinando este análisis con uno o más DEM para construir el esqueleto del río, los cuales son desagregados espacialmente para obtener los Objetos Geográficos Desagregados (DGO). Una vez obtenidos los DGO, se calculan las métricas y se determina su configuración en planta, confinamiento local y sinuosidad para luego realizar un agrupamiento (por segmentos homogéneos) utilizando una prueba estadística (*Hubert test*) que permita obtener los objetos geográficos agregados. Este análisis se realizó sobre un SIG, particularmente para este paso fue que se utilizaron de forma combinada los programas ArcGIS y QGIS.

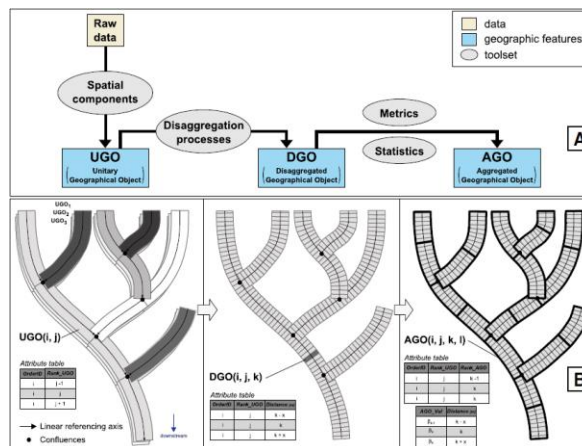


Figura 3.2. Metodología de desagregación y agregación de objetos unitarios geográficos

Fuente: Albert y Piegay (2011)

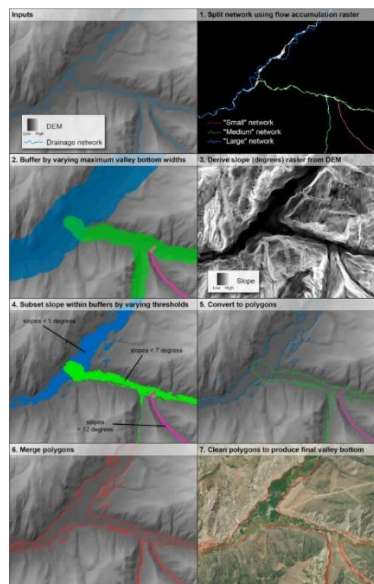
### 3.4.1.1 Objetos unitarios geográficos (UGO)

Los objetos unitarios geográficos de una cuenca son básicamente: el canal activo, envolvente del canal activo, unidades geomórficas y la llanura de inundación. Se describen cada uno de los UGO y la metodología detallada para extraerlos.

- Canal activo y envolvente: el canal activo corresponde al conjunto de canales conectados incluyendo barras laterales y medias, sin incluir islas, en caso de que existan. La envolvente del canal activo corresponde al cauce activo más las barras laterales. Para extraer estos dos UGO, se usaron imágenes satelitales en periodos de aguas altas y bajas. En primer lugar, se delimita la envolvente del canal activo para el período de aguas altas mediante la digitalización manual usando herramientas SIG o de forma semiautomática (sección 3.3.2.). Este análisis se realizó para obtener un polígono único que delimite la envolvente a lo largo de todo el río o del tramo que se quiera analizar. Luego, con las imágenes de aguas bajas se delimitan las barras laterales, barras medias e islas. Así de esta manera es posible obtener el canal activo que corresponde a la envolvente menos las islas y barras medias que siguen presentes en periodos de aguas altas.
- Unidades geomorfológicas: son objetos geográficos característicos de un paisaje fluvial en una cuenca. Algunas unidades geomórficas presentes en la llanura de inundación comprenden: diques naturales, crestas, cimas, paleocanales, humedales y lagunas. Aquellas que dominan la ribera de los ríos se asocian con barras laterales con vegetación, barras laterales sin vegetación, barras medias sin vegetación, islas y afloramientos rocosos. Las unidades geomorfológicas de la ribera se deben delimitar en periodos de aguas bajas y altas para la correcta delimitación del canal activo, siendo interpretadas en base a las imágenes satelitales mediante polígonos en una interfaz SIG.
- Llanura de inundación: es uno de los accidentes geográficos fluviales más importante de una cuenca, debido a que delimita las zonas donde se produce la máxima inundación en periodos de aguas altas, la que depende de la topografía de la zona, es decir, mientras menor sean las pendientes en las zonas aledañas al río, más extenso será el polígono de la llanura de

inundación. Además, esta delimitación permite obtener características importantes del paisaje fluvial, como el grado de confinamiento y la sinuosidad.

La delimitación de la llanura de inundación se puede realizar con diferentes métodos y herramientas. Para este trabajo se utilizó el complemento de ArcGIS V-BET desarrollado por Gilbert *et al.* (2016). La herramienta V-BET requiere como datos de entrada un DEM, que abarque toda la cuenca y la línea central de la envolvente del canal activo-segmentada. La Figura 3.3 esquematiza los siete pasos con los que opera el algoritmo del V-BET. En primer lugar, la herramienta genera un *raster* de flujos acumulados y una red de drenaje, la cual no siempre coincide exactamente con la línea central de la envolvente del canal activo. Luego, se debe dividir la cuenca en tres zonas, donde se delimita una llanura de inundación de talla grande, mediana y pequeña, para así estimar el ancho máximo de la llanura de inundación por zona y a su vez relacionarlo con el área captante. A cada zona se le debe asignar una pendiente promedio en grados. Para el caso de la cuenca del río Andalién la zona aguas arriba tiene una pendiente mucho mayor que la zona de aguas abajo, donde es aproximadamente cero. Teniendo todos los datos de entrada y los umbrales descritos se calcula la llanura de inundación, este procedimiento se debe iterar varias veces hasta obtener la delimitación correcta. Una vez obtenido el polígono que delimita la llanura de inundación se procedió a depurar manualmente, validando la delimitación con el DEM e imágenes satelitales.



**Figura 3.3 Diagrama de los pasos que sigue el algoritmo del V-BET para la extracción de la llanura de inundación**

Fuente: Gilbert *et al.* (2016)

Para este estudio se cuenta con una llanura de inundación delimitada con el software HEC-RAS (ARRAU INGENIERÍA E.I.R.L., 2011) en la parte baja del río. Este polígono sirvió de guía para la correcta delimitación y su validación, para lo cual se utilizaron imágenes aéreas del evento de precipitaciones extremas del 2006. La delimitación y validación fue particularmente relevante en la zona de Collao, donde se utilizó como referencia el estudio realizado por Rojas *et al.* (2016), en el cual se delimita la zona afectada para el evento del 2006.

### 3.4.1.2 Objetos geográficos desagregados (DGO)

Los objetos geográficos desagregados son el resultado de la segmentación de un objeto geográfico unitario, que se realiza cada cierta longitud, lo que depende del largo y ancho del río. La desagregación es realizada al elemento UGO correspondiente a la llanura de inundación y a partir de esa segmentación se intersectan los demás UGO, canal activo, envolvente canal activo, línea central y objetos geográficos.

La segmentación corresponde a la discretización espacial de los UGO de acuerdo con un tamaño de segmentación, en que se corta el polígono del UGO en porciones de largos iguales, con respecto a su línea central. La segmentación se realiza con la herramienta *Segmentation* en SRT, la cual utiliza como parámetros de entrada el polígono de la llanura de inundación, su línea central y un tamaño de paso en metros para discretizar. Como resultado se obtiene el UGO segmentado, es decir todos los DGOs ordenados en la tabla de atributos donde se muestra el número o código y la distancia acumulada, ordenados o secuenciados desde aguas abajo a aguas arriba.

Para segmentar los otros UGO, es decir el canal activo, envolvente del canal activo, línea central y unidades geomórficas; es necesario intersectar el polígono segmentado de la llanura de inundación con los polígonos pertenecientes a los otros UGO. Esto se realizó para tener una única segmentación y continuar con el mismo número de DGOs.

### 3.4.1.3 Métricas

Se muestran y explican las métricas calculadas para la caracterización a lo largo del río.

- Ancho de la llanura de inundación (*Valley Bottom*): se mide con la herramienta *Width Valley Bottom* del SRT cada 100 metros, la cual utiliza como datos de entrada el polígono de la llanura de inundación (Valley Bottom - VB), el VB segmentado y su línea central. Esta herramienta calcula el ancho promedio a lo largo de cada segmento del VB, es decir, entrega un valor de ancho por cada DGO del VB segmentado.

Para calcular el ancho de cada lado de la llanura de inundación, se separaron los polígonos del VB y del VB segmentado por la línea central de este. Obtenidos los polígonos separados, se calculó la línea central de cada uno con la herramienta *Valley Centerline* del SRT, para luego aplicar a cada uno la herramienta *Width Valley Bottom* del SRT y obtener así su ancho por separado.

- Ancho del canal activo y envolvente: se calculan con la misma herramienta *Width Valley Bottom* del SRT, la cual utiliza como datos de entrada el polígono del canal activo o de la envolvente, su línea central y largo de desagregación. Para este estudio se utiliza un paso de 20 metros para tener resultados más detallados. Como el análisis de este trabajo es a nivel de DGO y cada DGO es de 100 metros de largo, se debió realizar una interpolación y promediar los anchos obtenidos a cada 20 metros, obteniéndose el ancho promedio de cada segmento. *Fluvial Corridor Toolbox* en ArcGIS es utilizado para secuenciar la línea central o Centerline del polígono correspondiente al canal activo (y envolvente), aspecto crítico para segmentar correctamente y de forma sistemática este elemento.
- Pendiente y elevación: para calcular la pendiente es necesario tener el dato de la elevación a lo largo de la línea central del canal activo y así calcular el valor aproximado de la pendiente. La elevación se calculó utilizando las herramientas de Hidrología del *Spatial Analyst Tool* de ArcGIS, el cual mediante varios pasos y un DEM como parámetro de entrada, lo que permitió genera una red de puntos con la información de la elevación y distancia acumulada desde aguas arriba hacia aguas abajo. Como se detalla en la sección 3.3.3, para este estudio se tuvieron varios DEM de diferentes resoluciones. Para obtener resultados más precisos se combinaron

dos DEMs. Para obtener las elevaciones de la parte media y baja del río Andalién se utilizan los DEMs LIDAR, los cuales tienen una alta resolución y no presentan interferencia por árboles o edificios. Luego, para determinar las elevaciones de la parte alta del río se utiliza el TanDEM-X, que a diferencia del DEM LIDAR está referido a la una altura elipsoidal, por lo que se debe aplicar una corrección ortométrica, descrita en la sección 3.3.4. Los puntos, con los datos de elevación y distancia acumulada se traspan a Excel para corregir los valores de altimetría que excedan a los valores de aguas arriba.

El cálculo de la pendiente a lo largo del río se realiza con los datos corregidos de elevación mediante la Ecuación 3.4 en una hoja de Excel.

$$S = \frac{y_1 - y_2}{L} \quad (3.4)$$

Dónde, S es la pendiente en el tramo,  $y_1$  es la elevación aguas arriba,  $y_2$  es la elevación aguas abajo y L es la distancia entre los puntos (1) y (2).

Como a lo largo del río se encuentran zonas planas y las elevaciones pueden presentar errores en los datos DEM se debió aplicar un suavizado para disminuir distorsiones y generar así una pendiente más coherente a la realidad del río. Para realizar esta corrección se utilizó la función *ReachAverage* de *Hydrotool* en Excel descrita por Garthner (2016). Esta herramienta utiliza como datos de entrada la pendiente calculada con: las elevaciones, la distancia acumulada, un valor de distancia de suavizado y un valor de suavizado. Estos últimos valores son únicos y se deben iterar para obtener los resultados que mejor se ajustan.

- Área de captación: es un parámetro que permite calcular el área total de la cuenca y el área captante (aportante) a lo largo del río. Este dato es calculado para obtener posteriormente la potencia de corriente y la potencia de corriente específica. Para calcular el área de captación se utilizan las herramientas de Hidrología del *Spatial Analyst Tool* de ArcGIS, el cual utiliza como dato de entrada un DEM. Para este análisis es necesario que el DEM utilizado abarque en su totalidad a la cuenca y que la red de flujos acumulados que genere se aproxime a la línea central del canal activo, por lo cual este análisis se utiliza el DEM a 30 metros descrito en la

sección 3.3.3. Para obtener las elevaciones, se genera una red de puntos espaciados cada 20 metros a lo largo de toda la red de drenaje, a los cuales también se les asocia la información del área captante. Los datos obtenidos se corrigen en Excel revisando que los datos de área aguas abajo no superen a los datos de aguas arriba.

- **Potencia de corriente:** es la potencia de disipación de energía en un lecho y es utilizado para cuantificar la tasa de suministros de energía en una longitud unitaria de corriente, es además utilizado para estudiar el transporte de sedimentos en un río o canal (Gartner, 2016). La Ecuación 3.5 muestra como calcular la potencia de corriente.

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot S \cdot Q \quad (3.5)$$

Dónde,  $\Omega$  es la potencia de corriente,  $\rho$  es la densidad del agua ( $1 \text{ kg/m}^3$  a  $4^\circ\text{C}$ ),  $g$  es la aceleración de gravedad ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ),  $S$  es la pendiente del canal y  $Q$  es el caudal formativo (*Bankfull*). El caudal formativo se calcula buscando una relación entre el caudal (basado en el valor para un periodo de retorno de 2.5 años) y área captante de varias cuencas homogéneas, es decir que tengan el mismo régimen de caudales.

- **Potencia de corriente específica:** es el producto entre la potencia de corriente y el ancho del canal, en este trabajo el ancho utilizado fue el ancho del canal activo correspondiente al periodo de aguas altas. La Ecuación 3.6 muestra como calcular la potencia de corriente específica.

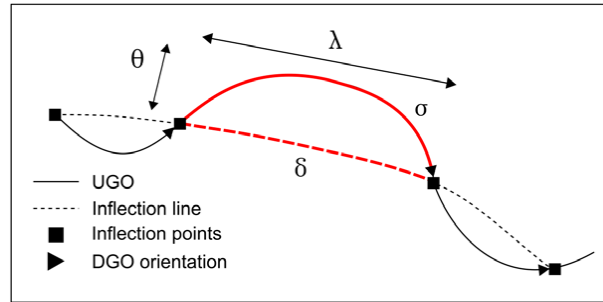
$$\omega = \Omega/W \quad (3.6)$$

Dónde,  $\omega$  es la potencia de corriente específica,  $\Omega$  es la potencia de corriente total y  $W$  es el ancho del canal activo.

- **Sinuosidad:** es el cociente entre la longitud de la curvatura ( $\sigma$ ) y la longitud del segmento ( $\delta$ ) correspondiente a la línea de inflexión, el cual se muestra esquematizado en la Figura 3.4. La sinuosidad local se calcula a lo largo de la línea central del canal activo con la herramienta *Planform Metrics* del SRT, la cual utiliza como dato de entrada la polilínea de la línea central



del canal activo y tres parámetros que son la amplitud máxima ( $\theta$ ), la distancia máxima entre puntos de inflexión ( $\lambda$ ) y el ángulo máximo en grados. Esta herramienta determina los puntos de inflexión, puntos donde la polilínea cambia de concavidad. La información obtenida se le aplicó un control de calidad en caso de que puntos de inflexión se encuentren muy próximos. Los resultados finales son promediados en cada DGO para así obtener la sinuosidad local en cada uno.



**Figura 3.4. Esquema para calcular sinuosidad**

Fuente: Nardini *et al.* (2019)

La sinuosidad es clasificada según rangos de valores como se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Tipos de sinuosidades**

Tipo de sinuosidad	Rango de valores
Rectilíneo	$S \leq 1.05$
Baja sinuosidad	$1.05 < S < 1.3$
Sinuoso	$1.3 \leq S \leq 1.5$
Meandrico	$1.5 < S \leq 2$
Tortuoso	$S > 2$
Sinuosidad restringida	Si el canal está confinado a la llanura de inundación

Fuente: Nardini y Brierley (2021)

- Confinamiento local: es calculado para la determinación de los DGO que poseen sinuosidad restringida. El cálculo del confinamiento local se realiza utilizando un algoritmo en QGIS que utiliza como parámetros de entrada la envolvente del canal activo, la línea central del canal activo, la llanura de inundación, una línea que divide en dos la llanura de inundación (*close line*) y el parámetro *buffer*, este último corresponde a la distancia máxima que hay entre el borde del canal activo y la llanura de inundación para ser considerado confinado.

- Forma en planta es uno de los 4 atributos más importantes de la clasificación *River Style* y permite clasificar los tramos del río según su número de canales, islas, barras laterales, barras puntuales, barras medias, humedales, ancho del canal activo y sinuosidad. El tipo de forma en planta se clasifica utilizando una hoja Excel diseñada por Nardini y Brierley (2021), la cual funciona con una ventana móvil que va clasificando conjuntos de DGO, según los arquetipos establecidos.

Una de las métricas esenciales para determinar la forma en planta es la clasificación del patrón mono o multicanal para cada tramo. Para clasificar si cada DGO a lo largo del río tiene uno o más canales, se utiliza la herramienta Mono-Multi-canal del SRT, la cual utiliza como datos de entrada la envolvente del canal activo-segmentada y una capa que contenga todos los objetos geográficos medios segmentados (islas y barras medias). El algoritmo determina si el DGO es mono o multicanal si el porcentaje de una barra media o isla es mayor al 10 % del área del DGO.

Los tipos de forma en planta se dividen en tres clasificaciones, mono canal, transicional y multicanal. Clasificaciones que se subdividen para determinar la forma en planta del canal. La Tabla 3.2 muestra cómo se clasifica si es mono canal, la Tabla 3.3 si es de transición y la Tabla 3.4 si es multicanal.

**Tabla 3.2. Tipos de forma en planta cuando el río es monocal**

Tipo de forma en planta	Características
Sinuosidad confinada	Se encuentra confinado
Rectilíneo	$S \leq 1.05$
Baja sinuosidad	$1.05 < S < 1.3$
Sinuoso	$1.3 \leq S \leq 1.5$
Meándrico	$1.5 < S \leq 2$ + presencia de barras puntuales (+60 %)
Tortuoso	$S > 2$ + ausencia de barras laterales (-10 %)

Fuente: Nardini y Brierley (2021)

**Tabla 3.3. Tipos de forma en planta cuando el río de transición**

Tipo de forma en planta	Características
Wandering (errante)	+90 % de barras laterales

	-15 % barras medias
Rectilíneo	+60 % de barras alternas Ausencia de islas, barras medias y puntuales (-10 %)
Swallowing (serpenteante)	Presencia de una isla

Fuente: Nardini y Brierley (2021)

**Tabla 3.4. Tipos de forma en planta cuando el río es multicanal (3 o más canales)**

Tipo de forma en planta	Características
Trenzado	-Separado por barras medias (+90 %) y ausencia de islas -No existe un canal dominante -Ancho de la envolvente es mucho mayor que el ancho del canal activo
Trenzado por isla	-Separado por islas (+50 %) -Distancia entre canales no exagerada
Anabranching	-Separado por islas (+50 %) -Existe un canal dominante -Distancia entre canales adyacentes significativa
Anastomosado	-Separado por islas o humedales (+80 %) -Ausencia de barras -No existe un canal dominante -Ancho de la envolvente es mucho mayor que el ancho del canal activo

Fuente: Nardini y Brierley (2021)

#### 3.4.1.4 Objetos Geográficos Agregados (AGO)

El último paso de la metodología es la agregación de los DGO para obtener los AGO, que son los tramos homogéneos que se utilizan para la clasificación *River Style*. Para la agregación de los DGO se aplica en primer lugar una prueba estadística para determinar tramos homogéneos y luego se intersectan los “planforms” obtenidos en la sección 3.4.1.3. El procedimiento para obtener los tramos (AGO) es la aplicación del Hubert Test.

- *Hubert Test*: es un algoritmo que utiliza una prueba estadística de Hubert (Hubert, 2000) basada en la desviación estándar que permite encontrar “puntos de ruptura” de un conjunto de

datos numéricos, los cuales son datos continuos y no discretos. El algoritmo agrupa los DGOs, según una de sus métricas para conseguir tramos que poseen atributos uniformes, el cual es calculado con las herramientas: *Hubert test* en el FCT en ArcGIS y *Hubert-Kehagias Aggregation* en el SRT en QGIS, siendo posible de esta forma evaluar el mejor resultado. Estas herramientas utilizan como dato de entrada un *shapefile* de punto, línea o polígono, con una tabla asociada con cada DGO, las distancia y sus métricas, además se debe ingresar un valor de umbral “alfa” que está relacionado con el nivel de confianza, el cual varía relativamente entre 0.05 y 0.08. Cabe destacar que este valor sólo se ingresa en la herramienta *Hubert test* del FCT en ArcGIS.

En este trabajo se utilizó el *Hubert Test* con los DGO de la llanura de inundación para determinar en qué zonas se producen cambios significativos con respecto al “ancho de la llanura de inundación” y, así generar grupos de DGO agregados. Para obtener los AGO se disuelven los DGO con la herramienta *Disolver* de QGIS, con respecto al valor único de AGO obtenido.

- Tramos (*reaches*): son los tramos que se utilizan para clasificar los estilos de ríos y son los que poseen todos los atributos calculados en las secciones anteriores. Para generar los tramos se deben tener los AGO generados con la herramienta *Hubert Test* y los DGO clasificados según su forma en planta. A partir de estas dos capas se realiza una intersección con la herramienta *Intersección* en QGIS, junto a una validación visual tal que cada tramo tenga más de dos DGO agrupados (Nardini, Yépez, Mazzorana *et al.* 2020)

Obtenidos los tramos, se determina el grado y causa de confinamiento, sinuosidad macro y material del lecho a nivel de AGO. A continuación, se explica cómo se determinan.

- Confinamiento: es el principal atributo de la clasificación *River Styles*, ya que caracteriza el comportamiento del río y corresponde al grado en que el río colinda con el *Valley Bottom* (VB). El confinamiento se calcula a nivel de DGO, para luego traspasar ese atributo a los tramos, este se clasifica como confinado cuando el 85 % del DGO se encuentra en contacto con el VB, no confinado cuando menos del 10 % del DGO se encuentra en contacto con el VB y, parcialmente confinado cuando se encuentra en el medio de confinado y no confinado (Nardini, Yépez y Bejarano, 2020)

El cálculo del confinamiento se calculó utilizando cuatro herramientas del SRT que corresponden al módulo de confinamiento, *Confinement Contacts*, *Valley Bottom Divided*, *Contact By Sides* y *Confinement*. Los algoritmos del módulo de confinamiento utilizan como datos de entrada el canal activo, la llanura de inundación (VB), el VB segmentado con los DGO y los tramos definidos en su tabla de atributos, así como una línea que divide al VB en dos (*close line*). La herramienta calcula en primer lugar las zonas de contacto entre el canal activo y el VB, luego divide el VB en dos polígonos para calcular los puntos de contacto a cada orilla del VB. Finalmente, se utilizaron los resultados obtenidos anteriormente para clasificar el tipo de confinamiento en cada DGO.

- Causa del confinamiento: se determina mediante interpretación visual con imágenes satelitales, imágenes aéreas temporales y un DEM. Se clasifica si el tramo es confinado por infraestructura, *planform* o valle. Que un tramo esté confinado por una infraestructura implica que hay presencia de diques, carreteras, encausamientos, embalses, puentes, entre otros. Si es confinado por *planform* significa que hay presencia geofomas en la llanura de inundación y que sea confinado por valle, se asocia su causa al producto del margen del valle aluvial.
- Sinuosidad macro: es calculada como se explica en la sección 3.4.3, pero a nivel de tramos, se generan los puntos de inflexión donde se generan los cambios de tramos. Esto se realiza, segmentando la línea central del canal activo para obtener así los segmentos separados y generar la línea de unión. Seguidamente, se crea una polilínea recta segmentada que une los puntos de frontera. Calculada la sinuosidad macro, se determina el tipo de sinuosidad según la tabla 3.1.
- Material del lecho: es uno de los atributos utilizados para la clasificación de los estilos de ríos, pero a diferencia de los otros atributos y métricas no se puede calcular, si no que se debe hacer una clasificación visual del material del lecho o mediante la adquisición de tomas de muestra en terreno para determinar su granulometría y tipo de suelo.

### 3.4.2 Marco River Styles

El marco *River Styles* descrito por Brierley y Fryirs (2005) permite realizar una interpretación de las características, comportamiento, condición y potencial de recuperación de un río. Este marco permite realizar un análisis integrado a nivel de cuenca y describe que cada sub-cuenca tiene un comportamiento diferente y debe ser analizada de tal forma.

Este marco se divide en 4 etapas:

- 1) Analizar las características y comportamientos de la cuenca
- 2) Evaluación de la evolución y estado geomorfológico de los ríos de la cuenca
- 3) Evaluación de la trayectoria futura y el potencial de recuperación geomorfológica.
- 4) Aplicaciones en la gestión de ríos

La metodología “*River Styles*” consiste en otorgarle un estilo de río a cada tramo segmentado. Para ello se deben tener en cuenta todas las características, como: confinamiento, causa del confinamiento, forma en planta (*planform*), carácter de la llanura de inundación y material del lecho que son las características principales que permitirán diferenciar los estilos fluviales. Para la determinación de los estilos de río se utiliza un árbol procedimental, que jerarquiza los atributos desde los más importantes a los menos importantes para clasificación.

### 3.4.2.1 Árbol procedimental

El árbol procedimental esquematiza jerárquicamente los atributos del corredor fluvial para realizar la clasificación de los estilos de ríos. La Figura 3.5 muestra el árbol procedimental original desarrollado y explicado por Brierley y Fryirs (2005) y la Figura 3.6 muestra el árbol procedimental modificado y utilizado en el estudio del río Magdalena en Colombia por Nardini, Yépez, Zuñiga *et al.* (2020). Para este estudio se utiliza el árbol procedimental modificado.

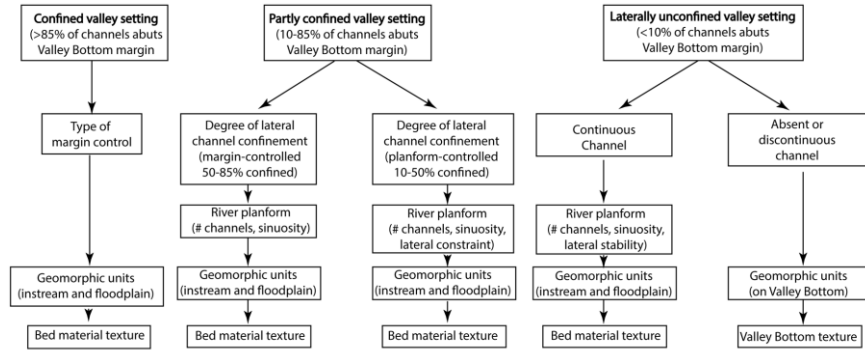


Figura 3.5 Árbol procedimental de River Styles

Fuente: Fryirs y Brierley (2005)

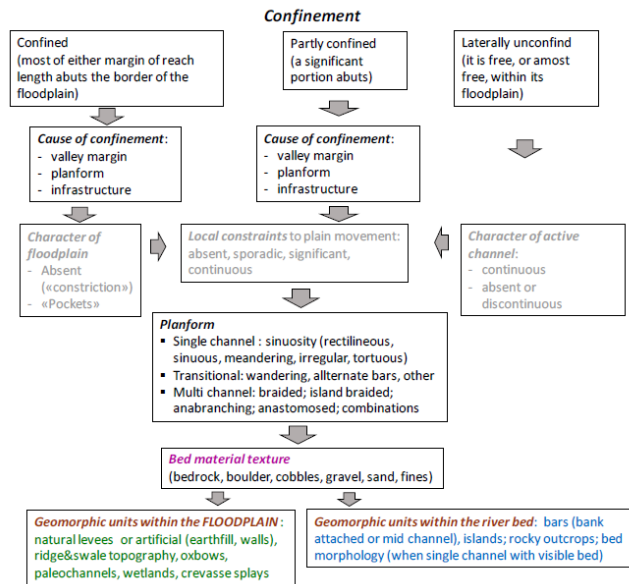


Figura 3.6 Árbol procedimental River Styles utilizado en la cuenca del río Magdalena, Colombia

Fuente: Nardini, Yépez, Zuñiga et al. (2020)

### 3.4.2.2 Atributos

Los atributos permiten realizar la clasificación, los que son jerarquizados mediante el árbol procedimental, de acuerdo con la importancia de los atributos. Para este estudio se consideraron ocho atributos: el grado de confinamiento, causa de confinamiento, forma en planta, material del lecho, presencia de humedales, barras laterales, barras medias e islas, en que el atributo más importante de la clasificación es el grado de confinamiento.

Para la clasificación se genera una matriz (Anexo 3.2) con los tramos definidos en la sección 3.5.3, donde se ordenan los atributos y se les asigna un número según su característica. Por ejemplo, para el grado de confinamiento se le asigna el número “0” cuando es *No Confinado*, “1” cuando es *Parcialmente Confinado* y “2” cuando es *Confinado*. Los tramos deben estar ordenados desde aguas arriba hacia aguas abajo para una correcta clasificación. La matriz generada en Excel es transferida en la tabla de atributos de la línea central del VB segmentado por los tramos.

### 3.4.2.3 Clasificación

La clasificación de los estilos de ríos se realiza en dos niveles jerárquicos siguiendo la estructura del árbol procedimental. El primer nivel jerárquico se le atribuye al grado de confinamiento, la causa del confinamiento, el planform y el material del lecho. El segundo nivel jerárquico se les atribuye a unidades geomorfológicas (humedales, barras laterales, barras medias e islas, etc.) presentes en el canal activo y VB de cada tramo.

Esta clasificación se realiza utilizando la herramienta Agrupamiento (Nardini *et al.*, 2019), la cual se ejecuta en ArcGIS y utiliza como parámetro de entrada una polilínea segmentada en los tramos y que posee los atributos ordenados y clasificados de forma numérica (esta clasificación puede realizarse también en QGIS usando la herramienta Cluster). En primer lugar, se realiza la primera clasificación con el primer nivel jerárquico y el resultado de esta primera clasificación se ordena desde aguas arriba hacia aguas abajo y se clasifica numéricamente. Un segundo nivel de clasificación se realiza con los cuatro atributos del segundo nivel jerárquico y se agrega la primera clasificación, luego este resultado es ordenado nuevamente desde aguas arriba hacia aguas abajo con respecto a la primera clasificación.

## 3.5 Análisis Multitemporal de la morfodinámica del río Andalién

### 3.5.1 Historial del río desde 1945 al 2020

El historial del río Andalién se realiza a partir de imágenes aéreas históricas ya georreferenciadas (Anexo 4.3), a las cuales se les delimita la envolvente del canal activo, las barras e islas, para luego



obtener el canal activo. La extracción del canal activo se realiza para los años 1945, 1955, 1978, 1992, 2010 y 2020 mediante el Sistema de Información Geográfica ArcGIS.

Luego, a partir de la envolvente del canal activo, se extrae la línea central de cada envolvente. La delimitación de la línea central se realiza con el SIG GGIS. En primer lugar, se transforma el polígono de la envolvente a línea y se eliminan los extremos de la envolvente para luego obtener dos líneas continuas. Posteriormente, se utiliza la herramienta “*Locate Point Along Lines*” para segmentar mediante puntos las líneas de la envolvente. Con la herramienta “*Polígonos de Voronoi*” se generan polígonos con los puntos, los cuales forma la línea central. Finalmente, se utiliza la herramienta “*Line Smooth*”, para suavizar la línea central generada y así obtener un resultado más exacto.

La extracción de la línea central de las envolventes permite analizar los cambios geomorfológicos que ha tenido el río entre 1945 y 2020 y determinar las tasas de migración lateral. Esto permite visualizar las zonas que han tenido mayor migración y analizar las causas. Los ríos naturalmente tienden a migrar hacia los lados, a medida que su llanura de inundación lo permita, pero hay diversos factores que pueden obligar al río a confinarse y migrar en zonas dónde naturalmente no lo hace. Algunas de las causas que producen los cambios geomorfológicos son el cambio en el uso de la tierra por efecto antrópico, es decir, el confinamiento obligado de los ríos mediante canalizaciones o construcción de defensas fluviales para poblar zonas por dónde escurría antiguamente el río.

### **3.5.1.1 Tasas de Migración**

El cálculo de las tasas de migración utiliza como parámetros de entrada las líneas centrales de dos canales activos. Para este estudio, en primer lugar, se calcularon las tasas de migración entre los años 1945 y 1955, luego entre 1955 y 1978, 1978 y 1992, 1992 y 2010 y finalmente entre 2010 y 2020.

En primer lugar, se unen los pares de líneas centrales (por ejemplo las línea de 1945 y 1955) y se transforman en polígono usando las herramientas del ArcGIS, para luego agregarles un *Buffer* de 5 metros y así obtener un nuevo polígono. A partir del polígono con *buffer* se le extrae la línea central utilizando la metodología descrita en el punto 3.5.1. para así segmentar cada 20 metros el polígono con la herramienta “*Segmentation*” del *South Rivers Toolbox* y calcular el ancho de cada segmento. Finalmente para calcular las tasas de migración se le debe restar el ancho del *buffer* del polígono a

cada valor obtenido de la segmentación y luego dividirlo por el número de año que hay entre cada periodo (entre 10945 y 1955 hay 10 años de diferencia).

Lo anterior, se replica para cada uno de los años en análisis para así determinar las tasas de migración del río Andalién entre el año 1945 y 2020.

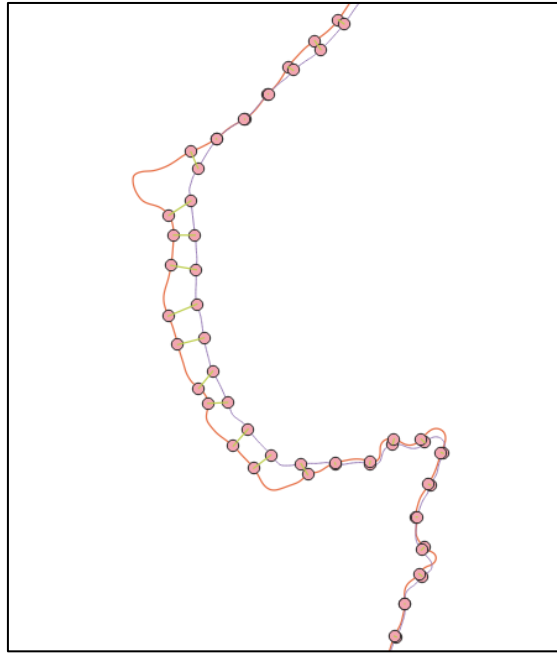


Figura 3.7. Transectos para calcular tasas de migración entre los años 1945 (línea morada) y 1955 (línea naranja)

### 3.5.2 Cambio en el uso de la tierra

El análisis de cambio de uso de la tierra se realiza más detalladamente a nivel de cuenca y a nivel de río, más detalladamente. Para realizar dicho análisis se utilizan 3 mapas de uso y cobertura de la tierra, de los años 1997, 2008 y 2015. Cada uno de los mapas se depuran con el SIG QGIS para poder obtener y calcular el porcentaje de cada uno de los tipos de uso de la tierra que tiene la cuenca del río Andalién, y a partir de dichos porcentajes se puede analizar cuanto ha variado el cambio en el uso de la tierra entre 1997 y 2015.

### **3.6 Conclusión**

En este capítulo se presentan y explican las metodologías utilizadas para realizar la clasificación geomorfológica del río Andalién, se muestran los datos utilizados, las ecuaciones, esquemas y herramientas de los SIG que se utilizan para desarrollar las metodologías. Además, se presenta la metodología para realizar el análisis multitemporal de la morfodinámica del río Andalién, la cual se realiza mediante imágenes históricas georreferenciadas y mapas de cambio del uso de la tierra.

## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **4.1 Introducción**

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos del análisis estático y multitemporal de la morfodinámica del río Andalién. Para el análisis estático se presentan los resultados de todas las etapas de la aplicación de la metodología de desagregación y agregación espacial y de la clasificación con el Marco *River Styles*. Para el análisis multitemporal se presentan los resultados de las tasas de migración lateral que ha tenido el río entre 1945 y 2020, relacionado con el cambio en el uso de la tierra y el efecto antrópico.

### **4.2 Análisis Estático de la Morfología**

Se muestran los resultados obtenidos con la metodología de desagregación y agregación de objetos geográficos mediante la utilización de ArcGIS y QGIS y de la aplicación del Marco *River Styles*.

#### **4.1.1 Desagregación y Agregación de Objetos Geográficos**

Se muestran los resultados de la aplicación de la metodología de desagregación y agregación de objetos geográficos.

##### **4.2.1.1 Objetos Unitarios Geográficos (UGO)**

Se muestran los objetos unitarios geográficos obtenidos, el canal activo, la envolvente del canal activo, las unidades geomórficas y la llanura de inundación.

###### **4.1.1.3.1 Canal activo y envolvente canal activo**

La delimitación del canal activo, la envolvente del canal activo y las unidades geomórficas se realiza digitalizando las imágenes satelitales. En primer lugar se extrae el NDWI de las imágenes de aguas altas correspondientes al 23 de julio del 2019, día en que el caudal medio diario fue 21,6 m<sup>3</sup>/s en la

estación río Andalién camino a Penco. Las imágenes en periodo de aguas altas son imágenes *Planet Scope* de resolución 3 metros descargadas de la plataforma *Planet*. A partir de estas imágenes, se delimitó la envolvente del canal activo. Para la delimitación de las unidades geomórficas, del canal activo y de la envolvente en la parte alta del río, se utilizaron imágenes captadas por el satélite ESRI el 2 de febrero del 2020, día en que el caudal medio diario fue  $1,43 \text{ m}^3/\text{s}$  en la estación río Andalién camino a Penco. Se utilizaron imágenes del año hidrológico 2019-2020, periodo que se encuentra afectado por la megasequía por lo que la delimitación del canal activo podría presentar diferencias con respecto a un año sin sequía donde el caudal en periodos de aguas altas es mayor. Se eligió este periodo porque había disponibilidad de imágenes de la cuenca completa y sin la presencia de nubes, además se debía elegir un periodo posterior a la canalización realizada en el año 2015, que cambió drásticamente el curso del río en la parte baja. En la Figura 4.1 se muestra la delimitación del canal activo y de la envolvente del canal activo.

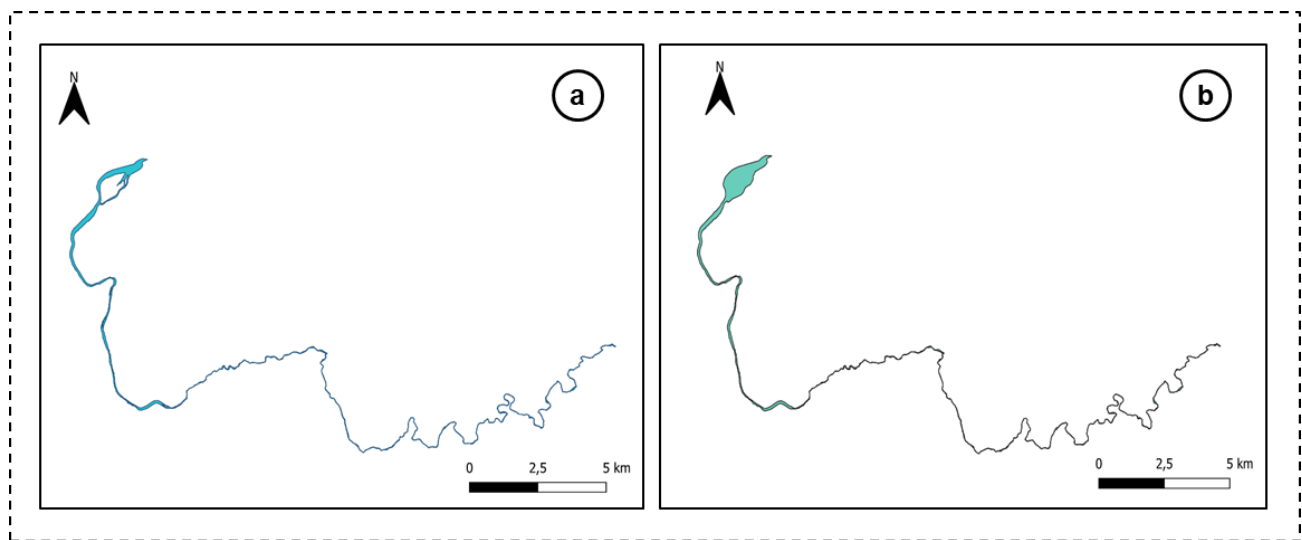
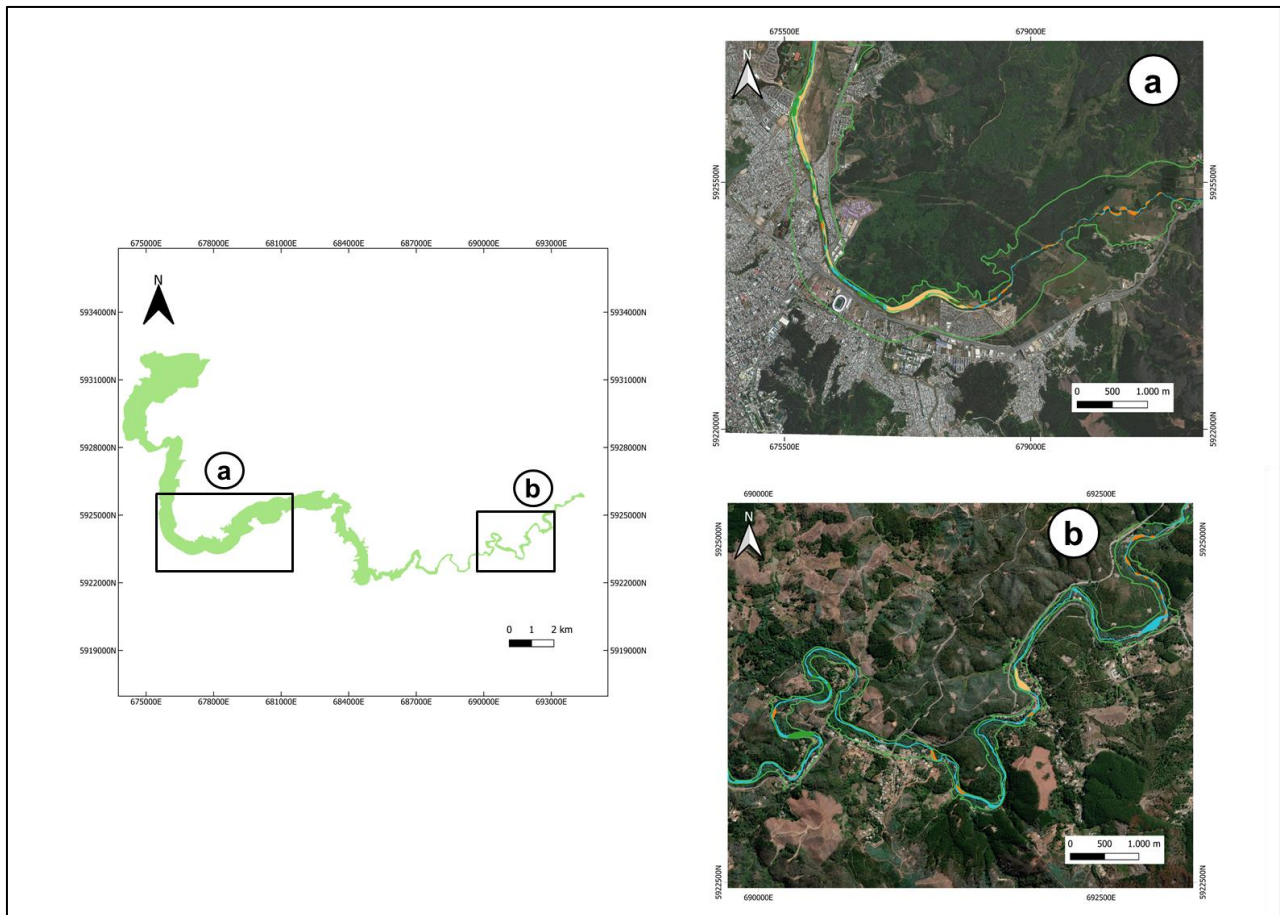


Figura 4.1 (a) Canal activo río Andalién, (b) Envolvente canal activo

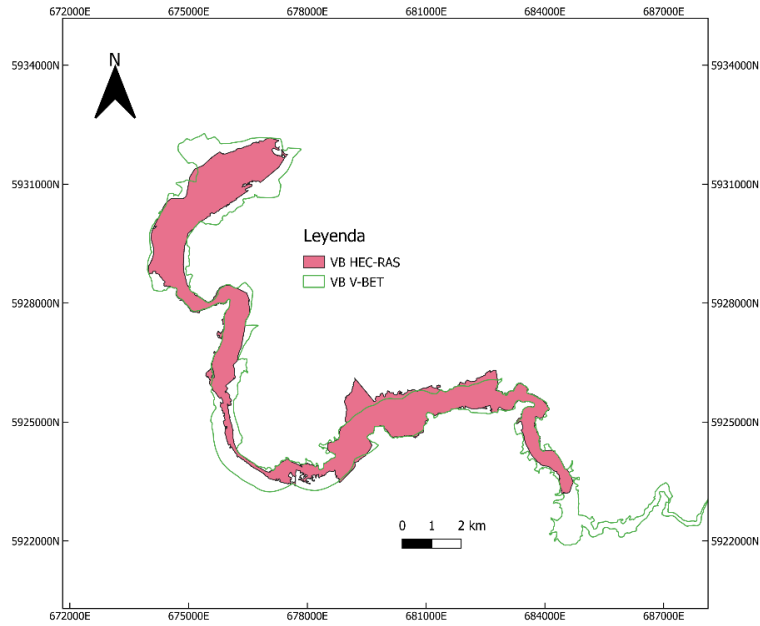
#### 4.1.1.3.2 Llanura de inundación (*Valley Bottom*)

La Figura 4.3 muestra el polígono que delimita la llanura de inundación a lo largo del río, esta se calcula utilizando el complemento de ArcGIS V-BET. Para la delimitación semiautomática de la llanura se utiliza un DEM combinado, es decir, se unieron los DEM LIDAR a 5 metros y TanDEM-x a 10 metros para que abarcara toda la cuenca, así como la línea central de la envolvente del canal

activo. La delimitación realizada con el V-BET se valida con la zona inundada por el evento de precipitaciones extremas del 2006, esta información es obtenida a partir de imágenes captadas el día de la inundación y la delimitación realizada por Rojas *et al.* (2016). Además, se valida la delimitación con la llanura de inundación extraída con HEC-RAS por ARRAU INGENIEROS E.I.R.L. (2011) (Figura 4.4), dónde se puede observar que se produce una diferencia en la zona de la Figura 4.2(a) ya que al comparar las imágenes captadas del evento de crecidas del 2006 se puede observar que ese sector (Figura 4.4), fue el más afectado por la inundación. La Figura 4.2(b) muestra la parte alta del río, de la cual no se tiene información fotográfica ni de modelos, pero es validada con el DEM, esa es la zona más confinada del río y la llanura de inundación es mucho menos ancha que la de la parte baja.



**Figura 4.2** Llanura de inundación a lo largo del río Andalién y zonas características



**Figura 4.3 Llanura de inundación a lo largo del río Andalién**



**Figura 4.4 Inundación en la Universidad del Biobio, Estero Nonguén**

Fuente: Diario de Concepción (Julio 2006)

#### 4.1.1.3.3 Unidades geomórficas

La Figura 4.5 muestra el mapa a lo largo del río desde aguas arriba hacia aguas abajo, llanura de inundación (verde claro), el canal activo (celeste) y las unidades geomórficas. Las unidades geomórficas identificadas fueron barras medias (café), barras laterales con vegetación (amarillo), barras laterales sin vegetación (naranja), el humedal Rocuant en la zona de la desembocadura (verde agua) y la Laguna Pineda (azul) en la Figura 4.5(c). En la figura se puede observar que hay mayor

frecuencia de barras en la parte baja del río y que a lo largo del río se encuentran pocas islas, a excepción de la gran isla de la desembocadura, por lo que puede visualizar que el río es monocal.

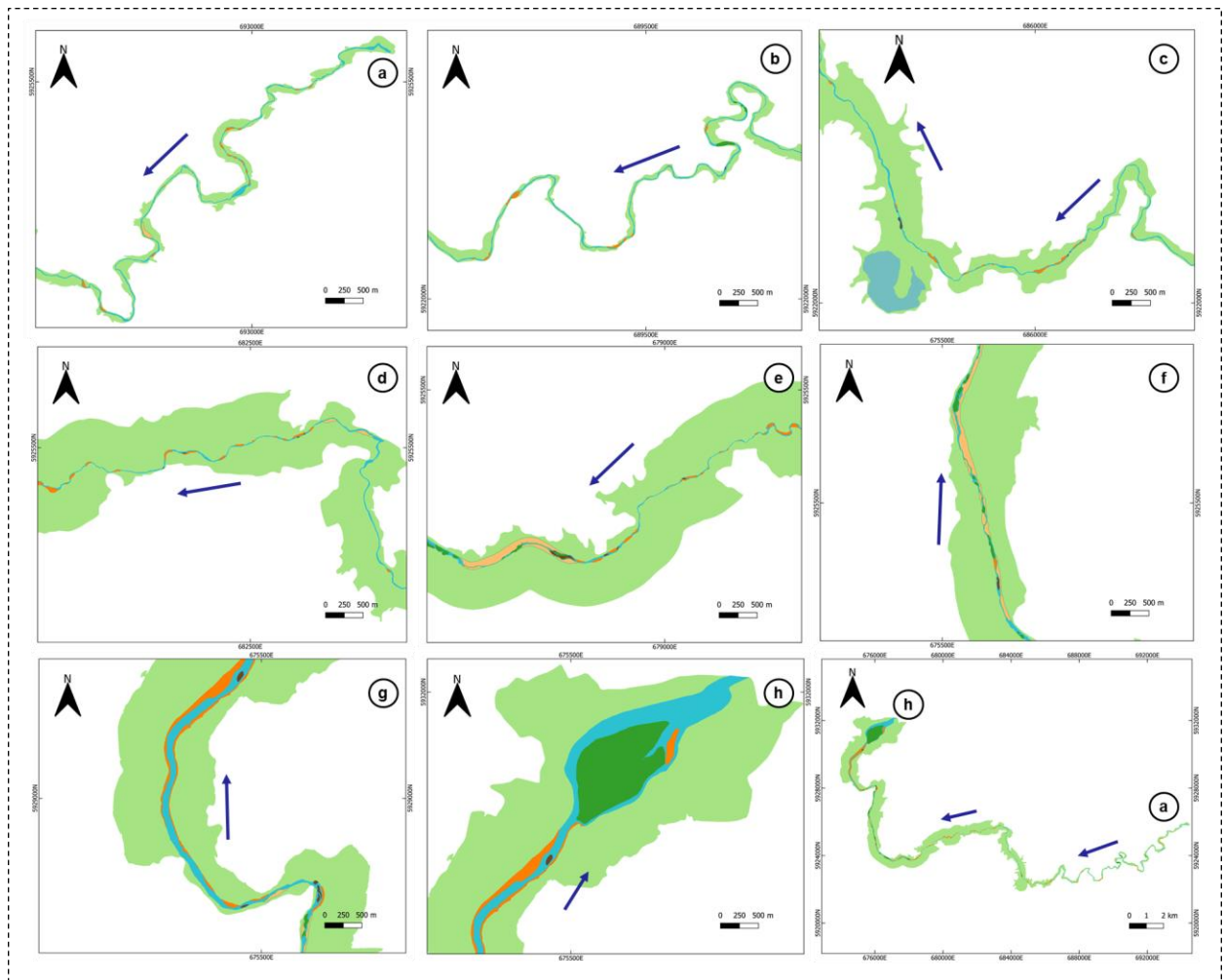


Figura 4.5 Mapa a lo largo del río Andalién, desde aguas arriba (a) hacia aguas abajo (h), con las unidades geomórficas delimitadas

#### 4.1.1.2 Objetos Geográficos Desagregados (DGO)

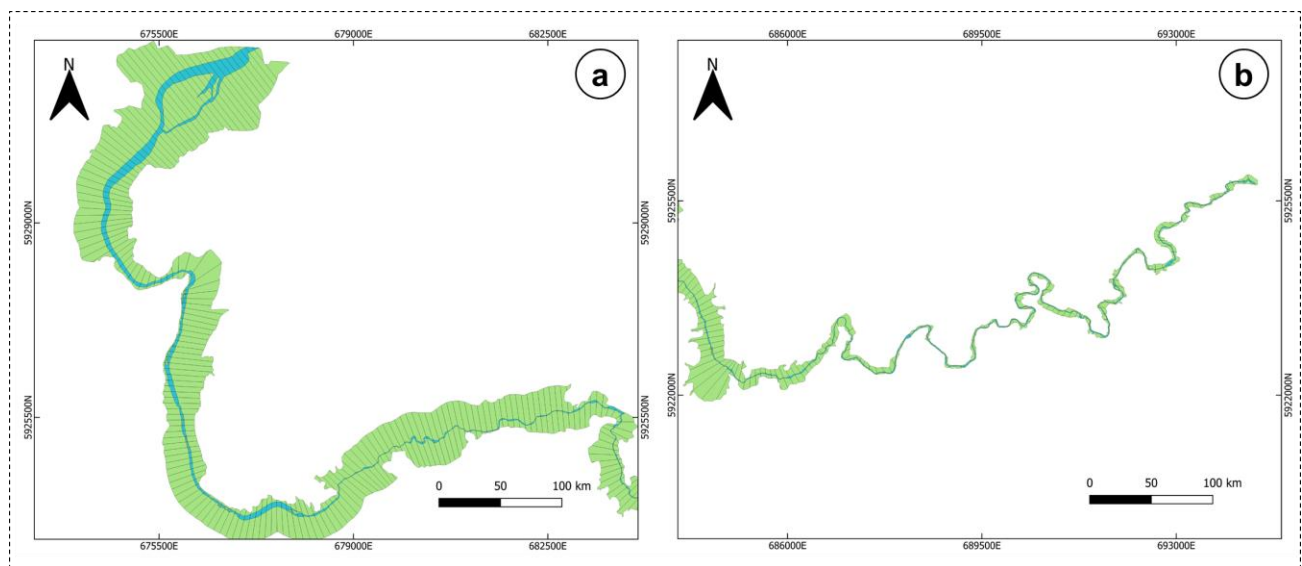
Se muestran los resultados obtenidos luego de la desagregación espacial de los objetos geográficos unitarios.



#### 4.1.1.2.1 Segmentación

La Figura 4.6 muestra la segmentación cada 100 metros en la llanura de inundación y el canal activo, de la cual se obtienen 353 DGO a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo.

La segmentación se podría ajustar mejor a nivel del canal activo, debido a que se realiza en la llanura de inundación con un paso de 100 metros son respecto a su línea central y se visualiza que no coincide con la línea central del canal activo, en diversos segmentos. Por lo que la segmentación del canal activo no es realmente cada 100 metros, sino que hay tramos que tienen mayor y menor longitud. En estos casos se podría disminuir el tamaño del paso de segmentación, pero aumentarían los tiempos computacionales de procesamiento.



**Figura 4.6 Llanura de inundación y canal activo segmentados (a) zona baja del río, (b) zona alta del río**

#### 4.1.1.2.2 Métricas

Con las herramientas del SRT y otros complementos de QGIS y ArcGIS se calculan las métricas de cada DGO a lo largo del río. Los resultados de las métricas y características de cada DGO son descritos a continuación.

### 4.1.1.2.3 Ancho llanura de inundación

La Figura 4.7, la cual grafica el ancho del VB desde aguas arriba hacia aguas abajo, dónde se puede visualizar que la llanura de inundación va aumentando hacia aguas abajo. Es importante resaltar la asimetría de las orillas del río Andalién, siendo la orilla derecha (verde claro) muchos más ancha en algunas secciones del continuo fluvial.

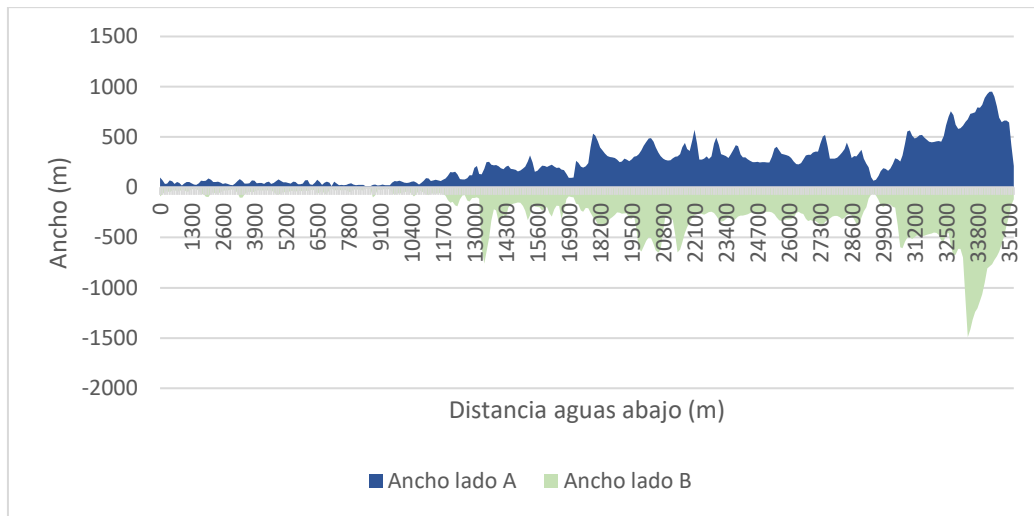
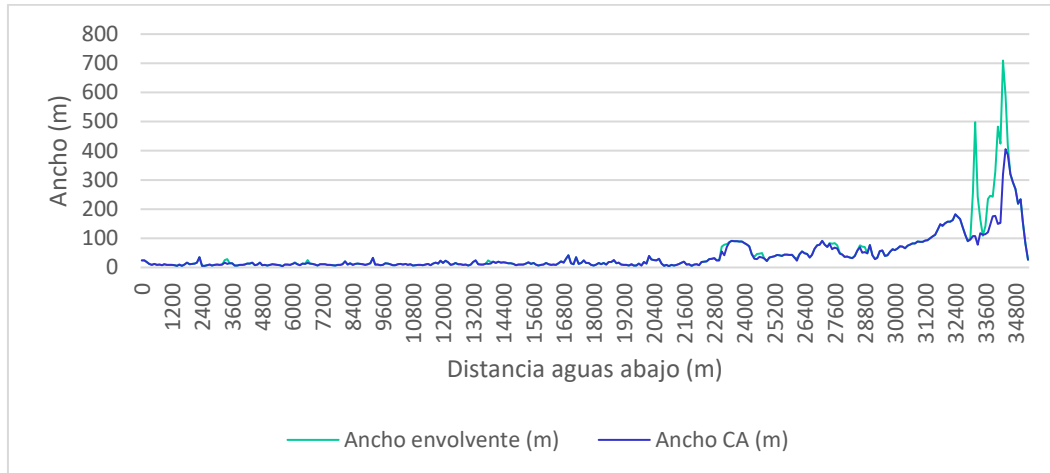


Figura 4.7 Ancho llanura de inundación por lado desde aguas arriba hacia aguas abajo

### 4.1.1.2.4 Ancho canal activo y envolvente

La Figura 4.8 muestra graficados el ancho del canal activo y su envolvente. Se puede visualizar que tienen el mismo ancho, a excepción de la zona cercana a la desembocadura, lo que se explica por la presencia de la gran isla que se encuentra en esa zona, la cual tiene un área aproximada de 0.6 km<sup>2</sup>. A partir de estos resultados se observa que a lo largo del río Andalién hay baja presencia de islas y barras medias, lo que explica que el río sea monocal.

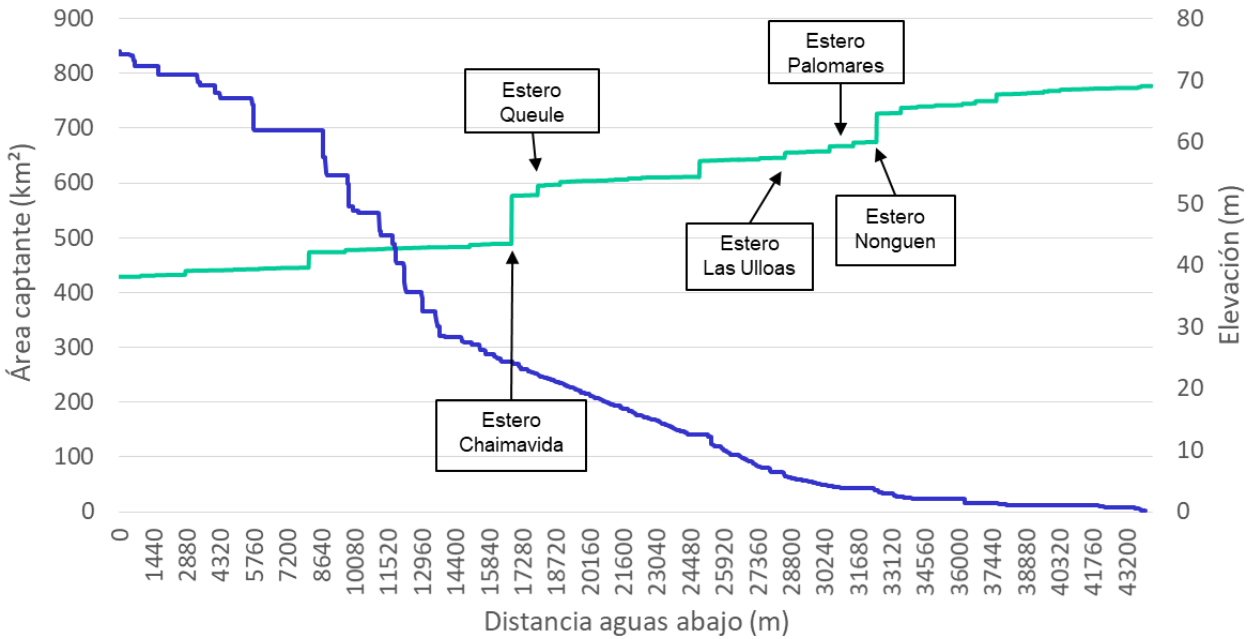


**Figura 4.8 Ancho del canal activo y de su envolvente**

#### 4.1.1.2.5 Elevación y área captante

La Figura 4.9 muestra las elevaciones a lo largo de la línea central del canal activo, desde aguas arriba hacia aguas abajo, calculada cada 20 metros y luego se promedian los resultados en cada DGO. Entre 0 a 15000 metros se calculan las elevaciones con el DEM TanDEM-x, al cual se le aplica una corrección altimétrica y desde la distancia de 15000 m hasta la desembocadura se extraen las elevaciones del DEM LIDAR, la cual se muestra en el Anexo 4.1. Por la diferencia de resolución de los DEM, es que se visualiza un mayor suavizado de la línea que grafica las elevaciones en la parte media y baja del río.

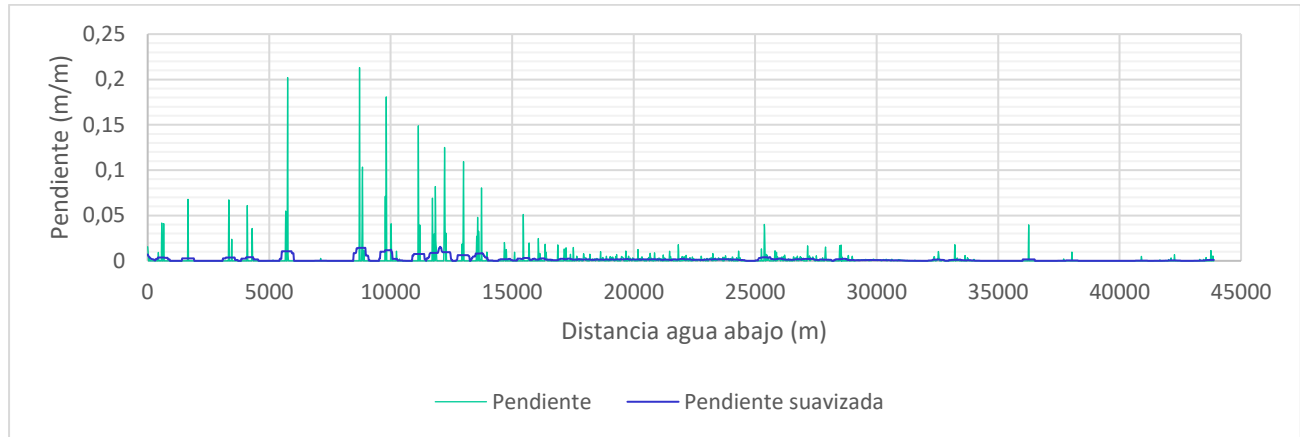
En la Figura 4.9, con la línea verde, se muestran graficados los resultados obtenidos del área captante calculada a lo largo del río, al igual que para las elevaciones, que se calcula desde aguas arribas hacia aguas abajo cada 20 metros y luego se calcula el promedio para cada DGO. En el gráfico se muestran a que distancia del río se encuentran los principales afluentes del río Andalién, los cuales son: el estero Nonguen, estero Palomares, estero Las Ulloas, estero Queule y estero Chaimávida y se distinguen por el cambio rápido de área captante.



**Figura 4.9** Área captante a lo largo del río desde aguas arriba hacia aguas abajo, perfil de elevaciones y puntos donde confluyen los esteros al río Andalién

#### 4.1.1.2.6 Pendiente

La Figura 4.10 muestra los resultados obtenidos del cálculo de la pendiente a partir de las elevaciones extraídas del canal activo cada 20 metros, aplicándose un suavizado para obtener resultados más reales, ya que la pendiente es calculada a partir de elevaciones extraídas de un DEM, el cual puede tener errores altimétricos. En el gráfico se puede observar que las pendientes son casi cero en la parte baja y de la desembocadura, que es donde la llanura de inundación es de mayor superficie, a diferencia de la parte alta del río, donde las pendientes son mayores y la llanura de inundación es de menor superficie.



**Figura 4.10** Pendiente cada 20 metros a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo

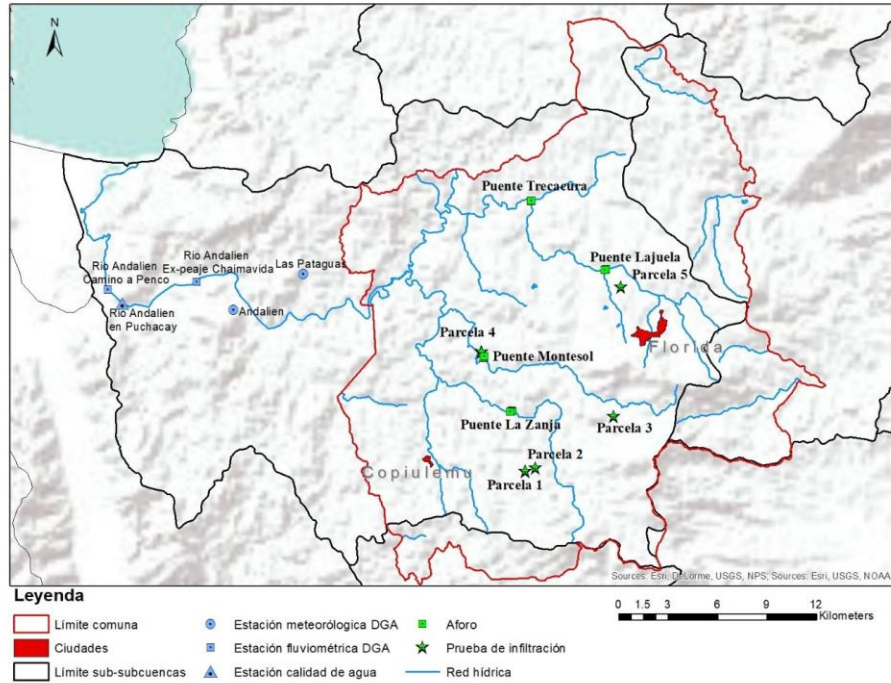
**4.1.1.2.7 Potencia de la corriente y potencia de la corriente específica**

La Tabla 4.1 muestra los caudales medios de tres estaciones fluviométricas y cuatro aforos realizados en el Puente La Zanja, Montesol, Lajuelas y Traquecura que se encuentran en la red hidrométrica de la cuenca del río Andalién (Figura 4.11), con las que se realizó una interpolación lineal (Figura 4.12) para encontrar una relación lineal entre ellas. Esta ecuación permitió calcular el caudal a lo largo del río Andalién utilizando los datos de área captante calculada anteriormente.

**Tabla 4.1** Caudales y áreas de estaciones y aforos en la cuenca del río Andalién

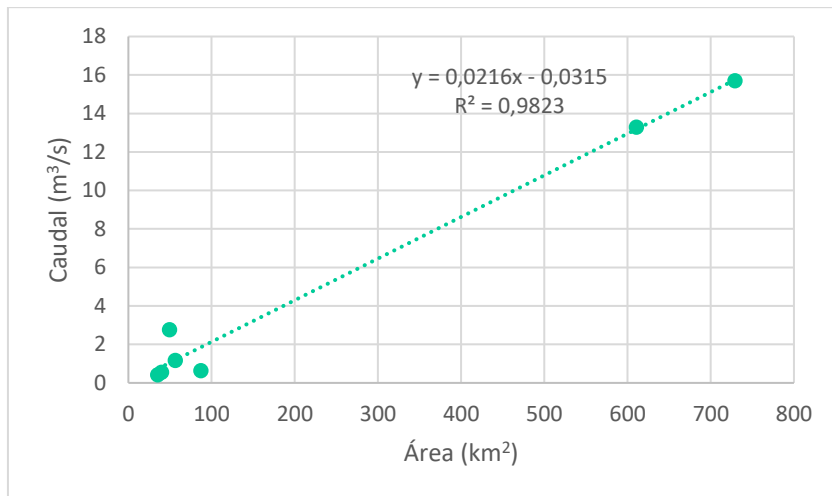
<i>Estación</i>	<i>Área (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Caudal (m<sup>3</sup>/s) 12/10/2017</i>
<i>Puente La zanja (Aforo)</i>	56,44	1,18
<i>Puente Montesol (Aforo)</i>	35,10	0,42
<i>Puente Lajuelas (Aforo)</i>	40,01	0,56
<i>Puente Traquecura (Aforo)</i>	87,05	0,64
<i>Río Andalién antes ex peaje Chaimavida (Estación fluviométrica)</i>	610,54	13,3
<i>Camino a Penco (Estación fluviométrica)</i>	728,99	15,7
<i>Estero Nonguen frente U del Bío bio (Estación fluviométrica)</i>	49,65	2,77

Fuente: Peña *et al.* (2017)



**Figura 4.11 Localización estaciones fluviométricas y aforos**

Fuente: Peña *et al.* (2017)

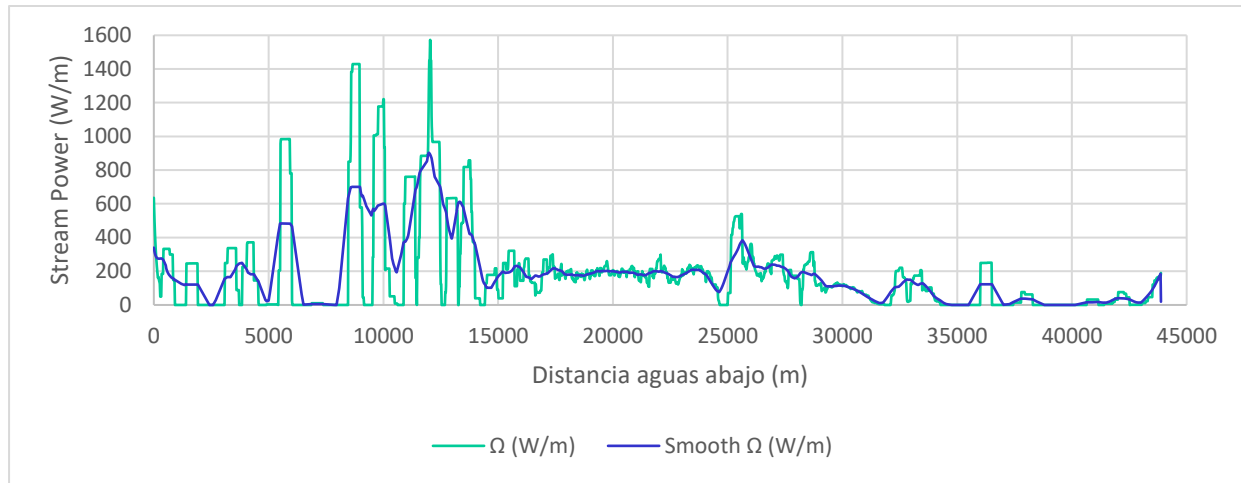


**Figura 4.12 Relación entre caudal y área de estaciones y aforos realizados en la cuenca del río Andalién**

Fuente: Peña *et al.* (2017)

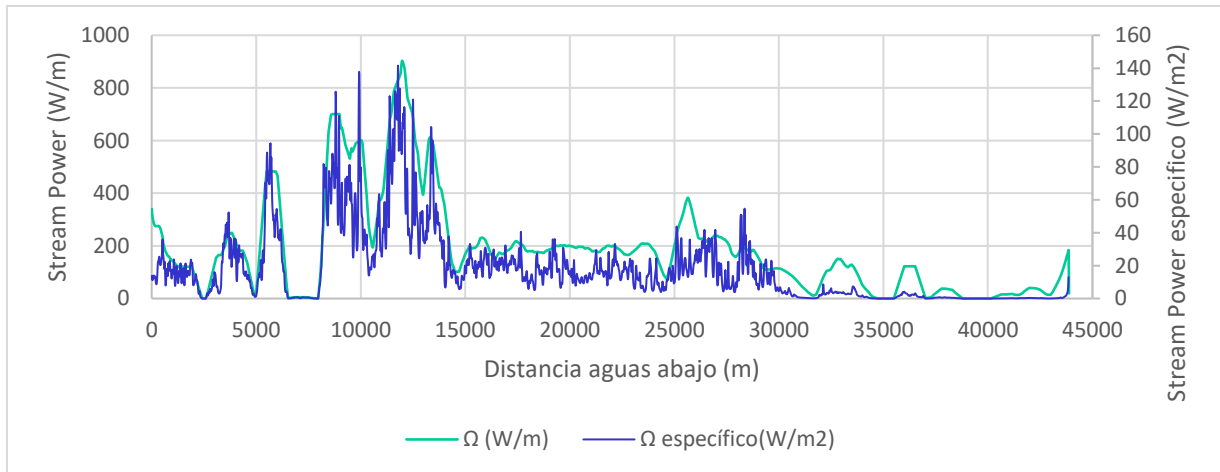
La Figura 4.13 muestra los resultados del cálculo de la potencia de corriente y la potencia de corriente específica suavizada a lo largo del río Andalién. A partir del gráfico, se observa que el valor de la potencia de corriente es mayor en la parte alta del río, zona que se encuentra mayormente confinada, lo que indica que el río tiene un mayor potencial de arrastre específica de sedimentos. Luego, en la

zona media disminuye llegando a valores medios, lo que indica que la capacidad de arrastre disminuye y empiezan a depositarse sedimentos. Finalmente, se encuentra la parte baja del río, dónde se encuentra el humedal Rocuant donde las pendientes son casi nulas. En esta zona el valor de la potencia de corriente disminuye considerablemente, por lo que la deposición de sedimentos provenientes desde aguas arriba es mayor y se ve reflejado en la formación de la gran isla que se encuentra en esa zona.



**Figura 4.13 Potencia de la corriente específica y potencia de la corriente específica suavizada cada 20 metros a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo**

La Figura 4.14 muestra los resultados y la comparación entre la potencia de la corriente y la potencia de la corriente específica.



**Figura 4.14 Comparación de potencia de corriente y potencia de corriente específica cada 20 metros a lo largo del río**

### 4.1.1.2.8 Sinuosidad y confinamiento local

Para el cálculo de la sinuosidad local se generaron 146 puntos de inflexión que dividen la línea central en 145 tramos, los cuales se unen por líneas de inflexión. La sinuosidad local no se calcula a nivel de DGO, por lo que se realiza una intersección de los DGO con los valores obtenidos a lo largo de la línea central y así se obtiene un valor promedio por cada tramo. La Figura 4.15 muestra un tramo del río dónde se visualizan los puntos de inflexión generados, las líneas de inflexión y el valor de la sinuosidad intersectada en cada DGO. Según el valor de la sinuosidad se clasifica si el tramo es rectilíneo, de baja sinuosidad, sinuoso o meándrico.

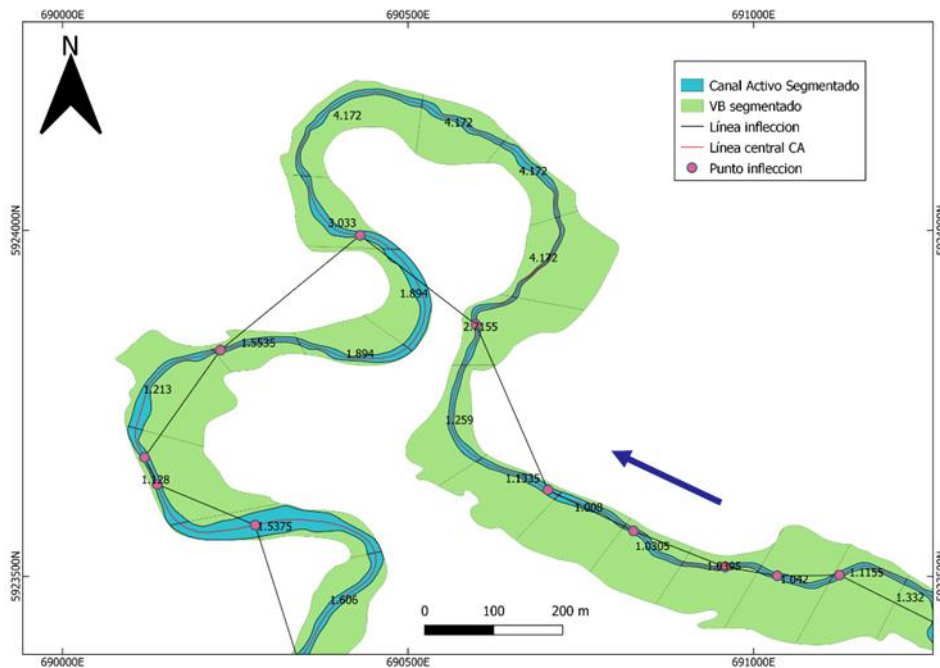


Figura 4.15 Tramo del río que muestra el grado de sinuosidad local

Para determinar si un DGO tiene sinuosidad restringida se calcula el grado de confinamiento cada 50 metros a lo largo del río, la Figura 4.16 muestra el mismo tramo de río de la Figura 4.14 para visualizar de forma general que tramos se encuentran confinados.



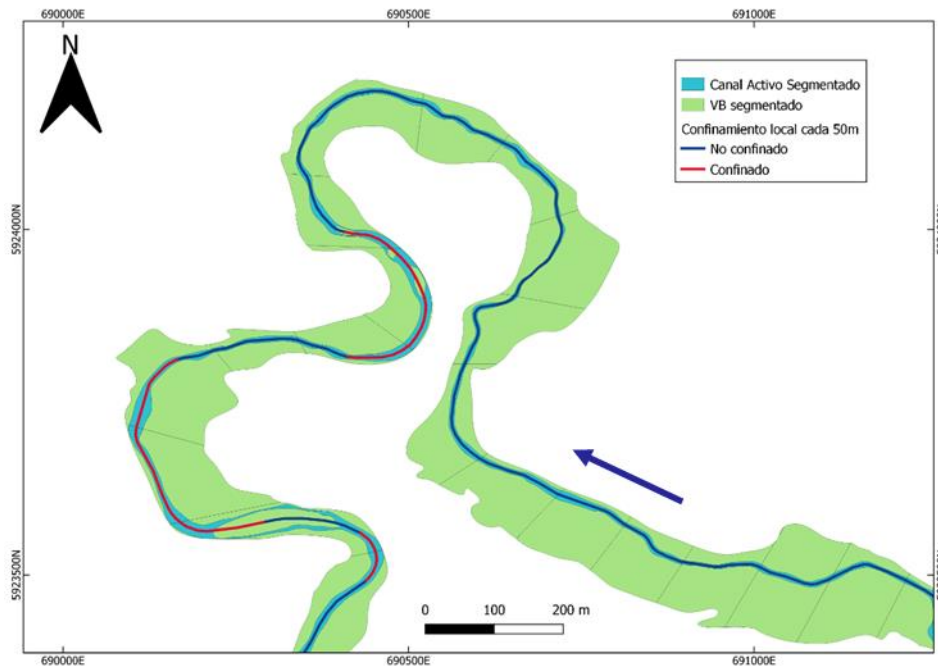


Figura 4.16 Tramo del río que muestra el grado de confinamiento local

#### 4.1.1.2.9 Forma en planta (*Planform*)

A lo largo del río se clasificaron 6 tipos de formas en planta, de los cuales tres corresponden a monocanal, dos a transicional y uno a multicanal. Los tipos de forma en planta que se encuentran a lo largo del río Andalién son rectilíneos, de baja sinuosidad, sinuosidad restringida, barras alternas, *wandering* (errante) y trezado por islas.

La Figura 4.17 muestra la clasificación de los tipos de forma en planta de cada DGO a lo largo del río, dónde se puede visualizar que en la parte alta del río predominan los tipos de forma en planta rectilíneo, de baja sinuosidad y de sinuosidad restringida (Figura 4.18), debido a la baja presencia de barras e islas y por estar mayormente confinado. En la parte media y baja se encuentran tramos con alta presencia de barras por lo que los tipos de forma en planta predominantes son de barras alternas y *wandering* (Figura 4.19). El río Andalién se considera un río monocanal pero, aun así, se clasificaron dos tramos como multicanal, trezado por islas. Uno de esos tramos es la desembocadura del río donde se encuentra la presencia de una gran isla que divide el río en dos canales (Figura 4.20) y el segundo corresponde a una zona con alta presencia de islas y barras medias. La alta presencia de barras laterales

y medias sin vegetación en la parte media y baja se debe al transporte de sedimentos de la parte alta, los cuales se van depositando aguas abajo generando estas unidades geomórficas.

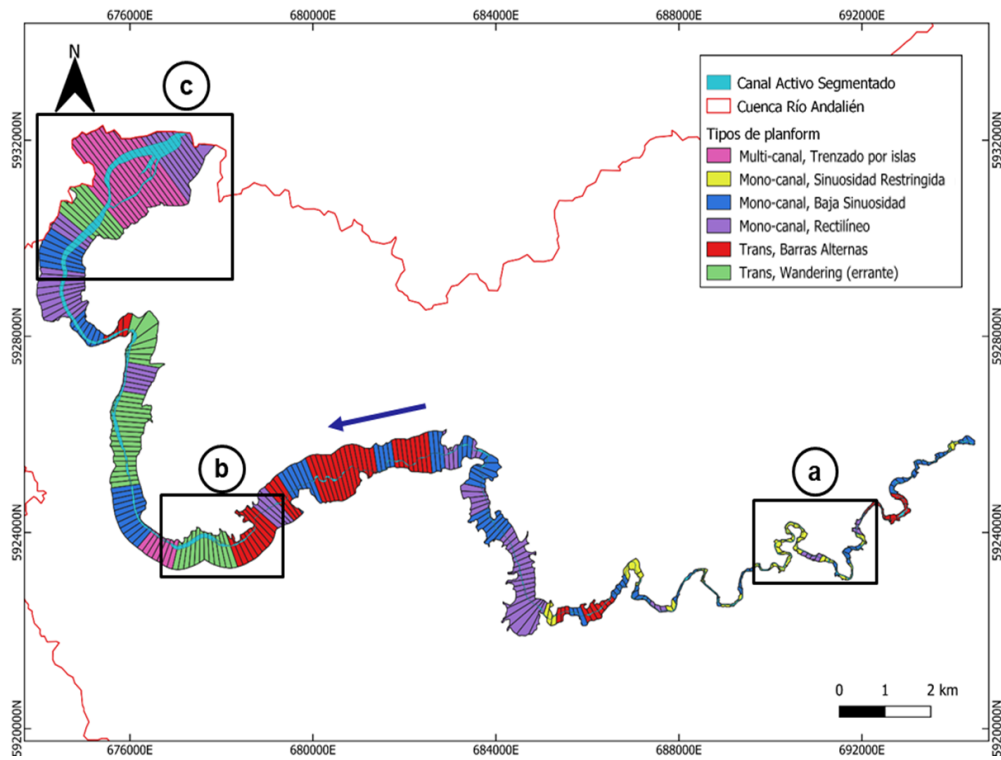


Figura 4.17 Tipos de forma en planta a lo largo del río

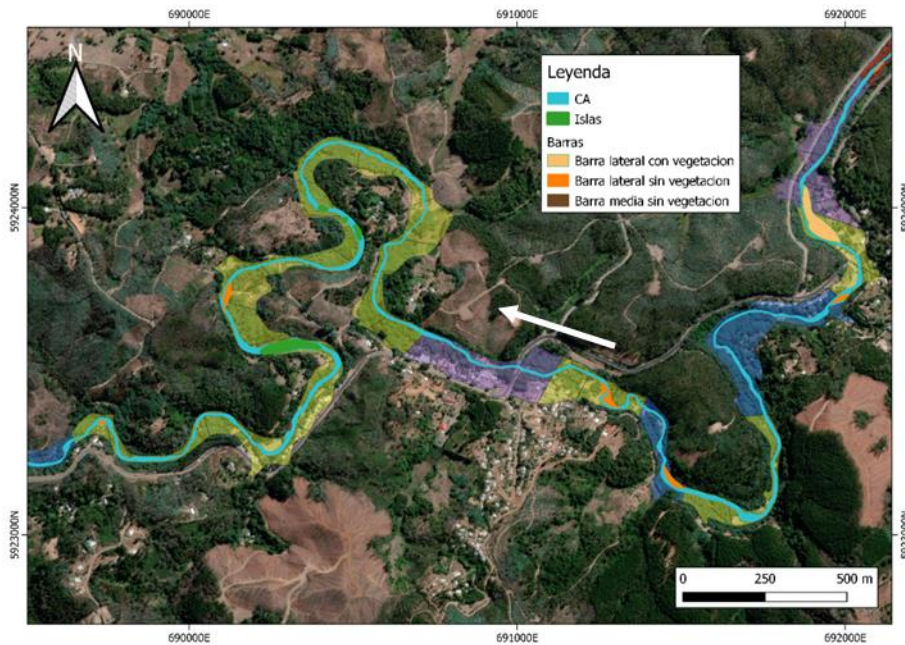


Figura 4.18 Tipos de forma en planta de un tramo de la parte alta del río (a)

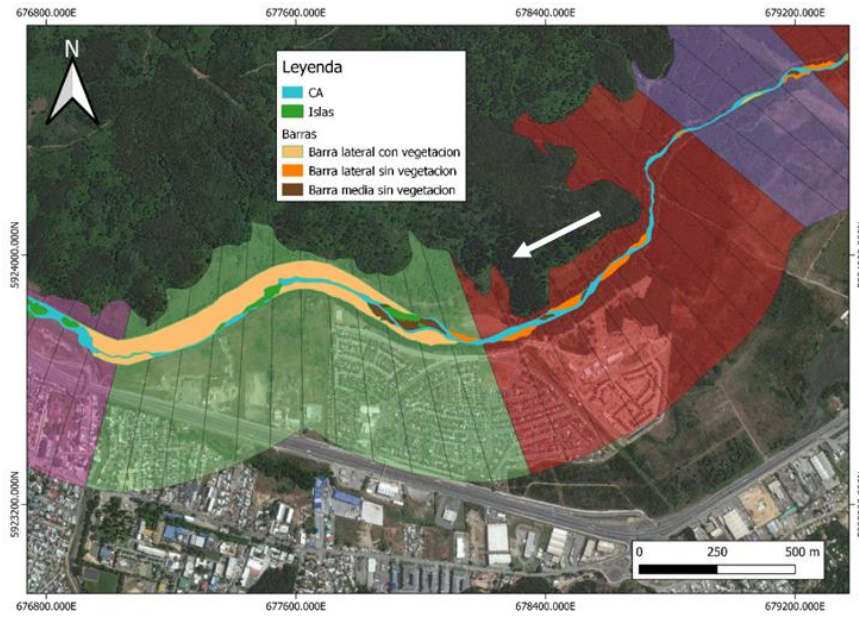


Figura 4.19 Tipos de forma en planta de un tramo de la parte media del río (b)

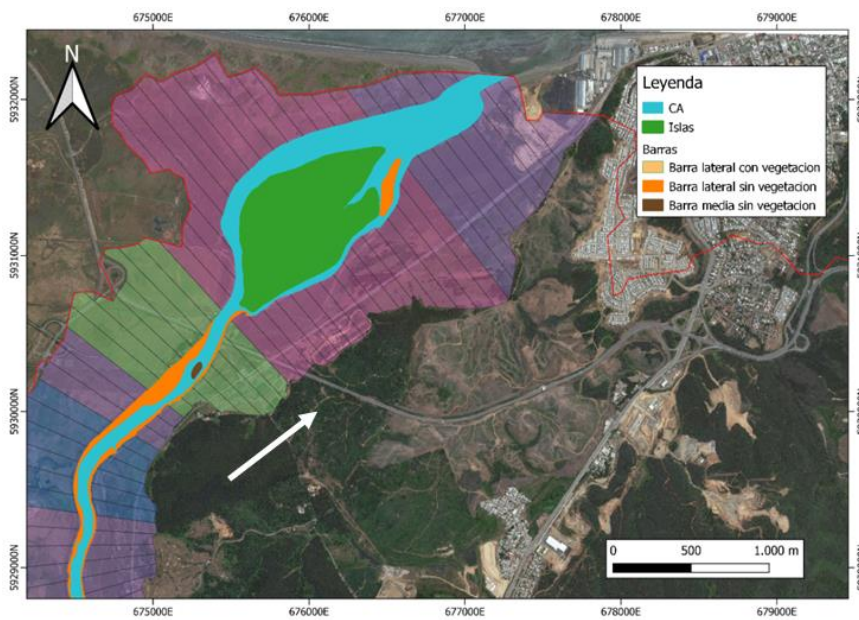


Figura 4.20 Tipos de forma en planta de un tramo de la parte baja del río (c)

#### 4.1.1.3 Objetos geográficos agregados (AGO)

Se muestran los resultados obtenidos de la agregación espacial de los objetos geográficos desagregados.

#### 4.1.1.3.1 *Hubert Test* y determinación de tramos

La aplicación del *Hubert test* se realiza con la herramienta *Hubert Test* del FCT en ArcGIS debido a que entrega mejores resultados de las zonas homogéneas que el *Hubert-Kehagias Aggregation* en el SRT. Se obtuvieron 9 grupos homogéneos, los cuales se agruparon según el ancho de la llanura de inundación.

Para determinar los AGO a lo largo del río se realiza una intersección entre los 9 tramos clasificados por el ancho de la llanura de inundación y los tramos de los tipos de configuración en planta. La Figura 4.21 muestra en el primer mapa los tramos homogéneos obtenidos por la aplicación del *Hubert Test*, el segundo mapa muestra la clasificación por forma en planta y el tercer mapa del río muestra la intersección. De esta intersección se generan 46 tramos que corresponden a los objetos geográficos agregados, donde cada uno de estos AGO está compuesto por 2 o más DGO con características geomorfológicas similares.

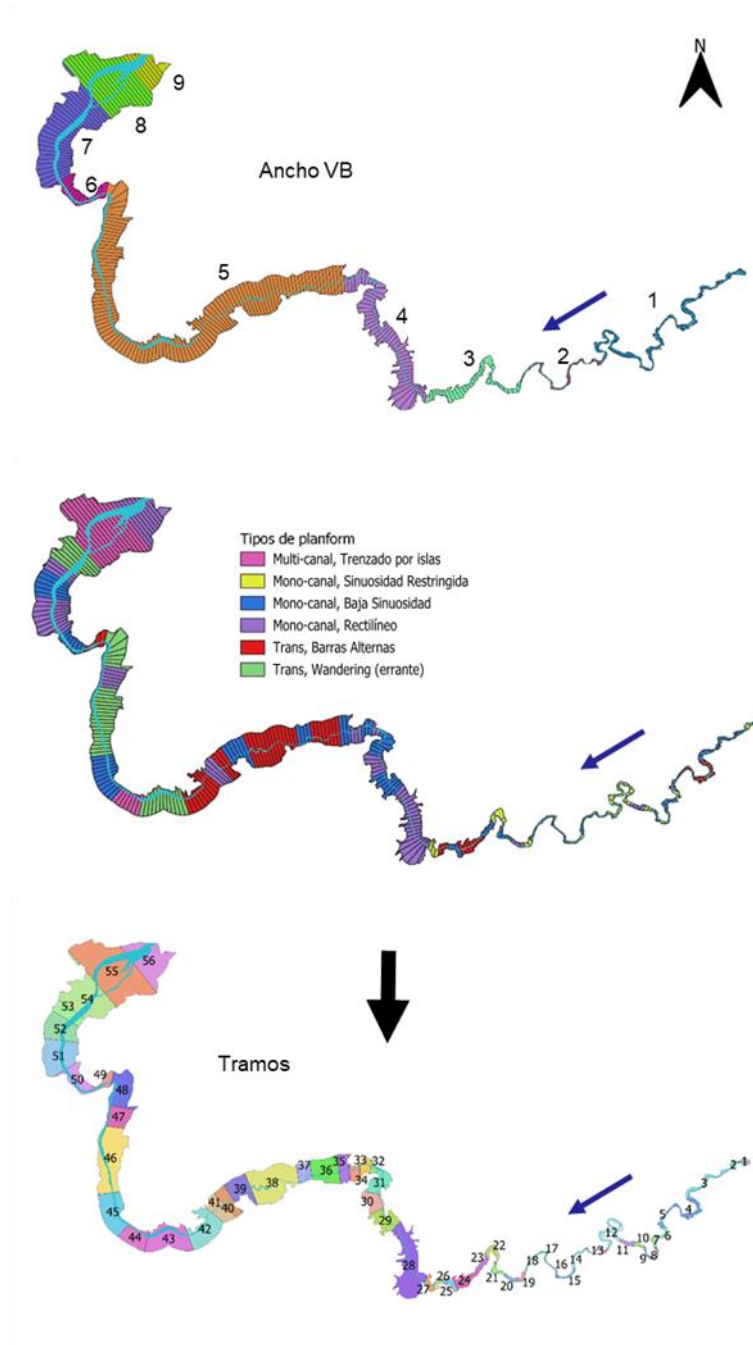


Figura 4.21 Tramos generados por *Hubert test*, por tipo de forma en planta y la intersección entre ellos (tramos)

La Figura 4.22 muestra graficado el ancho de la llanura de inundación, los tramos generados por la aplicación del *Hubert Test* y los tramos a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo. Se puede visualizar además, que los tramos generados según el ancho de la llanura de inundación son correctos, ya que se observa homogeneidad en la clasificación.

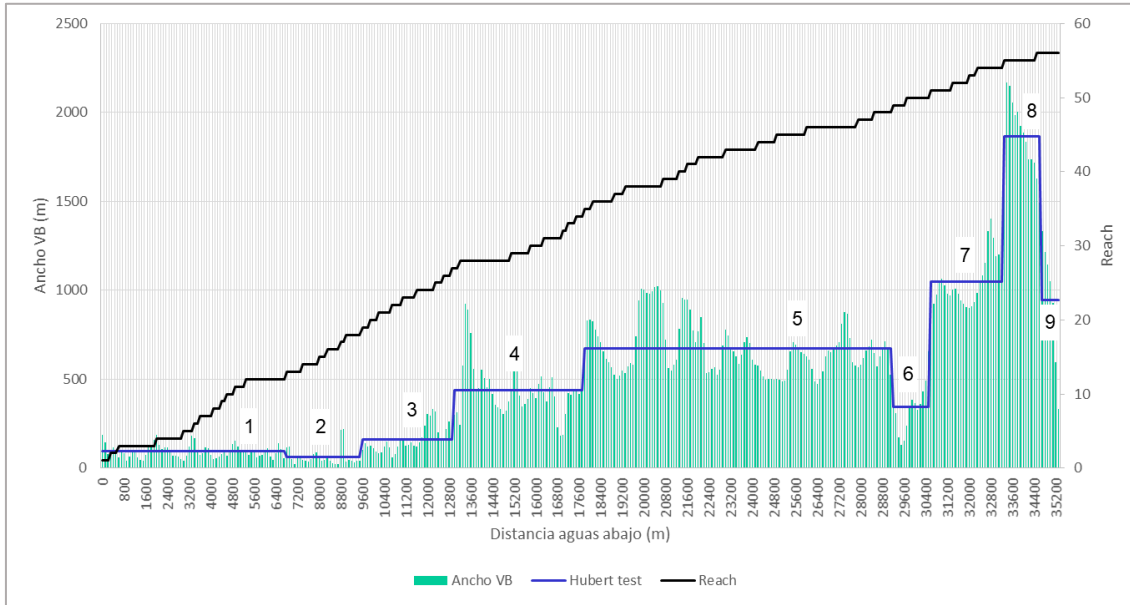
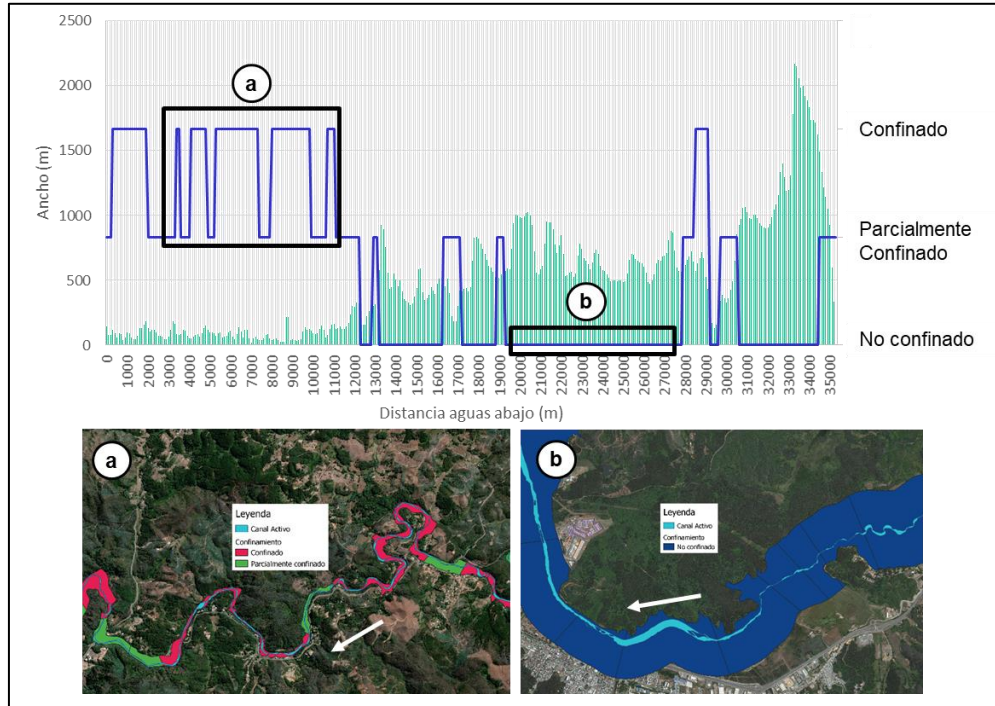


Figura 4.22 Gráfico de tramos generados por *Hubert test* y tramos a lo largo de la llanura de inundación, desde aguas arriba hacia aguas abajo

#### 4.1.1.3.2 Confinamiento

Obtenidos los tramos a lo largo del río se calculó nuevamente el confinamiento. La Figura 4.23 muestra un gráfico a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo, destacando el grado de confinamiento para diferentes secciones del río. La Figura 4.23(a) muestra una zona de la parte alta del río, que se encuentra mayormente confinado o parcialmente confinado. Desde el kilómetro 11 desde aguas arriba, se observa que el río deja de estar confinado (Figura 4.23), a excepción de tramos donde se encuentra parcialmente confinado, como es el caso de un tramo cercano a la desembocadura, que se encuentra confinado por infraestructura, que corresponde a una canalización y construcción de viviendas, luego del evento de precipitaciones extremas en 2006.



**Figura 4.23** Gráfico del grado de confinamiento de los tramos a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo

### 4.1.1.3.3 Sinuosidad

La sinuosidad es nuevamente calculada, pero a nivel de tramos. La Figura 4.24 muestra el grado de sinuosidad de cada tramo a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo. Además, a partir del gráfico se puede distinguir que la parte alta del río predomina el grado de sinuosidad confinada y algunos tramos meándricos. En cambio, en la parte media y baja, predomina el grado de baja sinuosidad y rectilíneo, a excepción de un tramo que se encuentra confinado por infraestructura, lo que determina un grado de sinuosidad restringida.

Comparando la Figura 4.23 con la Figura 4.24 se observa una zonificación del sistema fluvial en dos tramos. La zona alta dónde predomina el confinamiento, donde el río es más sinuoso, a diferencia de la zona media y baja donde el río ya no se encuentra confinado y predominan tramos rectilíneos y de baja sinuosidad.

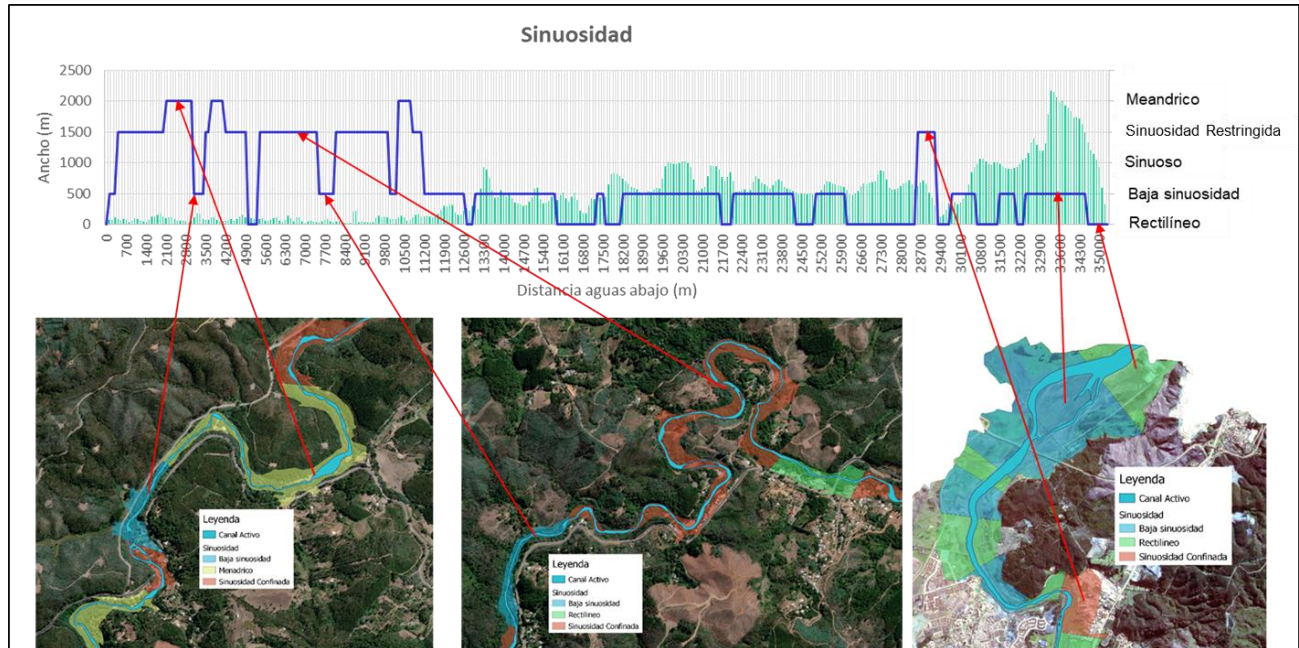


Figura 4.24 Tipo de sinuosidad en cada tramo a lo largo del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo

#### 4.1.1.3.4 Tipo de suelo

La Figura 4.25 muestra imágenes de una salida de terreno realizada a la parte alta de la cuenca del Río Andalién, donde se puede observar el tipo de suelo que predomina, el cual es principalmente suelo de textura fina.



Figura 4.25 Fotos en terreno a: en el puente Traquecura; b: en el puente Montesol

Fuente: Peña *et al.* (2017)



## 4.1.2 Marco River Styles

Caracterizado el río Andalién se presenta la clasificación de los estilos de ríos según sus características geomorfológicas.

### 4.1.2.1 Atributos y clasificación

El Anexo A4.2 muestra la clasificación *River Styles* (RS) realizada a partir de atributos principales y secundarios. Para la clasificación del RS principal se consideran los atributos de confinamiento, causa de confinamiento, forma en planta y material del lecho, este último no fue de gran relevancia para este estudio debido a que no se tenía información detallada del tipo de material del lecho, por lo que se considera que, a partir de imágenes de la zona, se clasifica un tipo de material de textura fina. Esta clasificación se debe validar con muestras de suelo o fotografías en terreno a lo largo del río, pero debido a la situación sanitaria por el COVID-19 no se pudieron realizar este tipo de validaciones detalladas en terreno. Se obtuvieron así 12 estilos de ríos principales.

Para la clasificación secundaria se utilizan los atributos de la presencia o ausencia de unidades geomórficas en la llanura de inundación y en el canal activo, las cuales son humedales, barras laterales, barras medias e islas. A partir de esta segunda clasificación se obtienen 29 estilos de ríos.

La Tabla 4.3 muestra el porcentaje de tramos que se encuentran confinados, parcialmente confinados y no confinados; además si la causa de confinamiento es por *planform* o por infraestructura. A partir de este resultado se observa que los tramos del río se encuentran mayoritariamente no confinados y que los tramos que se encuentran confinados son a causa de *planform*. Los tramos que se encuentran confinados por infraestructura son solo 4 y se encuentran en la zona baja del río, donde se han construido estructuras para mitigar las inundaciones en sectores recientemente poblados.

**Tabla 4.3 Porcentaje de ocurrencia del confinamiento y su causa con respecto al número total de tramos**

Confinamiento	%	Causa de confinamiento	%
Confinado	26.8	Planform	48.2
Parcialmente confinado	28.5	Infraestructura	7.1
No Confinado	44.7	Sin causa	44.7

En la Tabla 4.4 se observa de forma resumida los tipos de forma en planta que predominan en los tramos. El río Andalién es un río monocal, por lo que tiene una baja presencia de islas y barras medias como se muestra en la Tabla 4.5. Además, se caracteriza por tener un alto porcentaje de barras laterales en la parte media y baja del río, lo que genera tramos con tipos de forma en planta correspondientes a barras alternas y *Wandering* (errante).

**Tabla 4.4 Porcentaje de ocurrencia del número de canales, tipo de planform y material del lecho con respecto al número total de tramos**

N° de canales	%	Planform	%	Material de lecho	%
Mono-canal	75	Rectilíneo	19.6	Fino	100
Transición	21.4	Baja sinuosidad	28.6		
Multi-canal	3.6	Sinuosidad restringida	26.8		
		<i>Barras</i> alternas	14.3		
		<i>Wandering</i> (errante)	7.1		
		Trenzado por islas	3.6		

**Tabla 4.5 Porcentaje de presencia y ausencia de humedales, barras laterales, barras medias e islas con respecto al número total de tramos**

%	Humedales	Barras laterales	Barras medias	Islas
<b>Ausente</b>	94.6	30.4	78.6	80.4
<b>Presente</b>	5.4	69.6	21.4	19.6

#### 4.1.2.2 Comportamiento del río a escala de cuenca

En la Figura 4.26 se muestra el mapa de la cuenca del Río Andalién con los estilos de ríos clasificados y en base a la información mostrada en la Tabla 4.2 y en el Anexo 4.2, dónde se realiza un análisis del comportamiento del río. El río se divide en 3 zonas según el ancho de la llanura de inundación.

La primera zona empieza en la unión entre los esteros Poñen y Curapalihue, punto donde nace el río Andalién, hasta 17.8 km aguas abajo. Esta zona se encuentra confinada y parcialmente confinada por *planform*, su grado de sinuosidad es alto, por lo que se encuentran tramos de río meándricos y sinuosos. La potencia de corriente específica en este tramo alcanza el valor máximo de 141,5 W/m<sup>2</sup>, lo que significa que, en esta zona, el río tiene la mayor capacidad de arrastre de sedimentos, debido a

la pendiente y al grado de confinamiento del río; lo que explica la baja presencia de barras laterales. Si bien, el valor de la potencia de la corriente específica es baja en comparación a otros ríos, como lo explican Bizzi *et al* (2015), se produce mayor transporte de sedimentos en esta zona y se valida con la ausencia de barras laterales y medias. Los estilos de ríos que predominan en esta zona son los RS-1, RS-2, RS-3 y RS-4, los cuales se caracterizan por su alto grado de sinuosidad, confinamiento y forma en planta monocanal de sinuosidad confinada, según la Figura 4.26(a) y la Tabla 4.2.

La segunda zona se localiza desde el tramo T28 al T50, esto es desde el kilómetro 17.8 hasta el, 34.5. La llanura de inundación es de mayor longitud que la primera zona y varía entre 245 y 895 metros. Esta zona se caracteriza por estar no confinada y algunos tramos parcialmente confinados por planform o infraestructura, debido a carreteras, diques y a la canalización realizada durante 2015. El grado de sinuosidad en esta zona es menor, y predominan los tramos de baja sinuosidad y rectilíneos. El valor de la potencia de corriente específica empieza a disminuir, llegando a valores medios de  $40 \text{ W/m}^2$ , lo que significa que en esta zona comienza la deposición de sedimentos transportados desde aguas arriba, con una mayor frecuencia de barras laterales, barras medias e islas. Los tipos de forma en planta del río que predominan son monocanal, rectilíneo, de baja sinuosidad, de transición con barras alternas y *wandering*. Los estilos de ríos que se encuentran mayoritariamente en esta zona son los RS-5, RS-6, RS-7 y RS-9, los cuales se caracterizan por su bajo grado de sinuosidad, no confinamiento y mayor frecuencia de barras alternas según la Figura 4.26b.

La tercera y última zona corresponde a la parte baja del río, zona de la desembocadura, donde la pendiente es casi cero y se encuentra el humedal Rocuant. Esta zona se compone por los tramos T51 al T56, desde el kilómetro 34.5 hasta el, 42.6. Los estilos de ríos de esta zona son los RS-5, RS-7 y RS-9, los cuales se caracterizan por no estar confinados, no ser sinuosos y los tipos de forma en planta que se encuentran son mono-canal rectilíneo, de baja sinuosidad y multicanal trenzado por islas (Figura 4.26c). La principal característica de esta última zona es la presencia de una gran isla, provocando que el río se divida en dos canales. El ancho de la llanura de inundación varía entre 960 y 1914 metros, lo que indica que es la zona que tiene la llanura de inundación de mayor longitud. Con respecto a la potencia de corriente específica, es casi cero debido a la baja pendiente, lo que produce una mayor deposición de sedimentos, dando origen a unidades geomorfológicas como la gran isla sin vegetación que se encuentra cercana a la desembocadura.

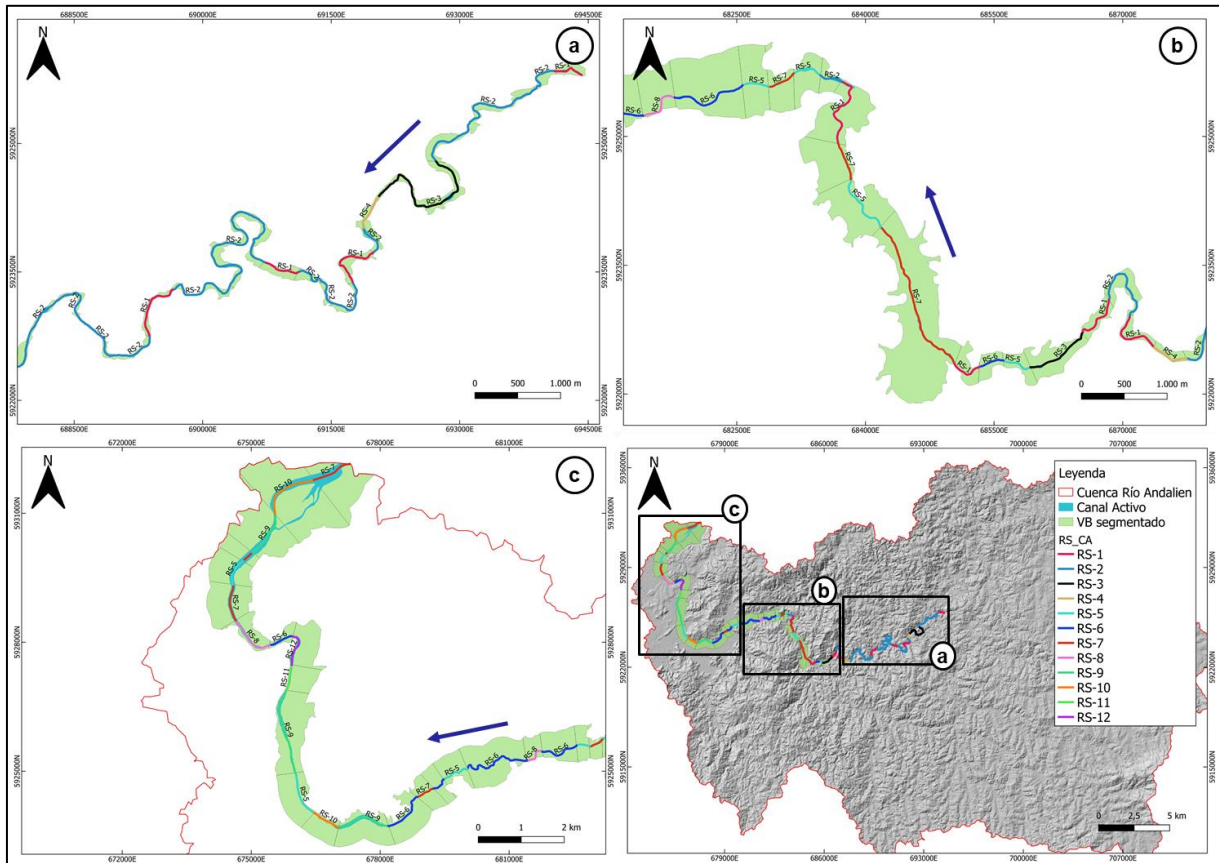


Figura 4.26 Mapa de los River Styles identificados en el río Andalién

#### 4.4 Análisis Multitemporal de la Morfodinámica

Se muestran los resultados obtenidos del análisis multitemporal de la morfodinámica entre 1945 y 2020 a partir de los resultados del análisis del cambio en el uso de la tierra, la extracción del canal activo entre 1945 y 2020 y las tasas de migración.

##### 4.4.1 Historial del río Andalién desde 1945 al 2020

Se muestran los resultados del cambio morfológico que ha tenido el río Andalién entre 1945 y 2020.

##### 4.4.1.1 Imágenes históricas georreferenciadas

La georreferenciación de las imágenes históricas de los años 1945, 1955, 1978 y 1992 se realizó a partir de la imagen satelital del año 2020, utilizando como puntos de referencia edificios o esquinas

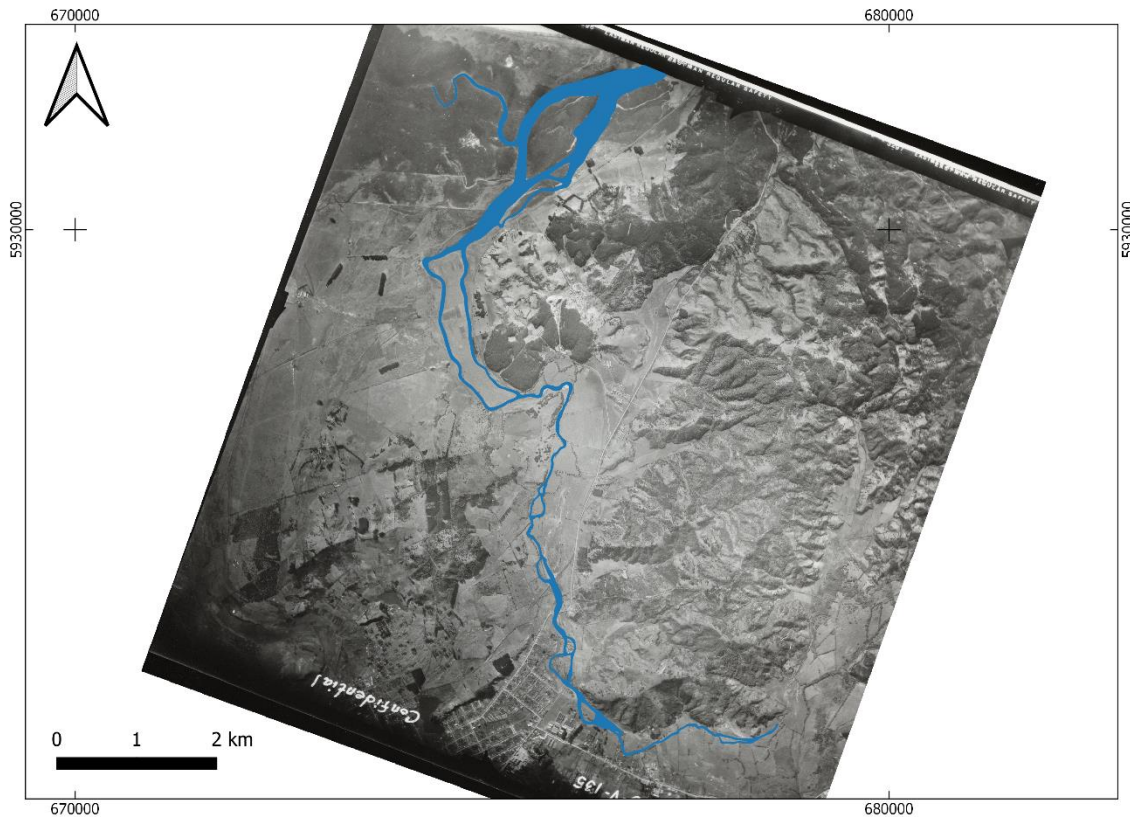
de calles que se han mantenido en el tiempo, entre 1945 y 2020. La georreferenciación se realizó utilizando 10 puntos de control de los extremos de la imagen, los cuales se ordenaron en sentido horario y se utilizó el algoritmo *Spline* para ajustar la imagen, siendo que el error cuadrático medio sea próximo a 0.

#### **4.4.1.2 Delimitación Canal Activo**

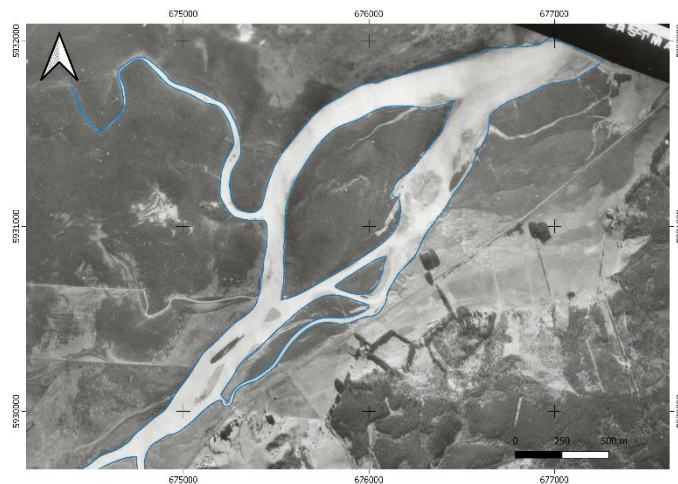
Georreferenciadas las imágenes históricas, se extrajo el canal activo de los años 1945, 1955, 1972 y 1992. En primer lugar, se delimitó la envolvente y luego las barras e islas para finalmente obtener el canal activo.

#### **1945**

La Figura 4.27 muestra la delimitación del canal activo del año 1945. En la imagen se puede observar que el flujo del río Andalién escurría libremente, sin barreras antrópicas que lo confinaran. La Figura 4.28 muestra la zona de la desembocadura del río Andalién en el océano Pacífico, donde se puede observar el humedal de Rocuant y la característica isla de la desembocadura que divide, hasta el 2023, en dos canales al río Andalién.

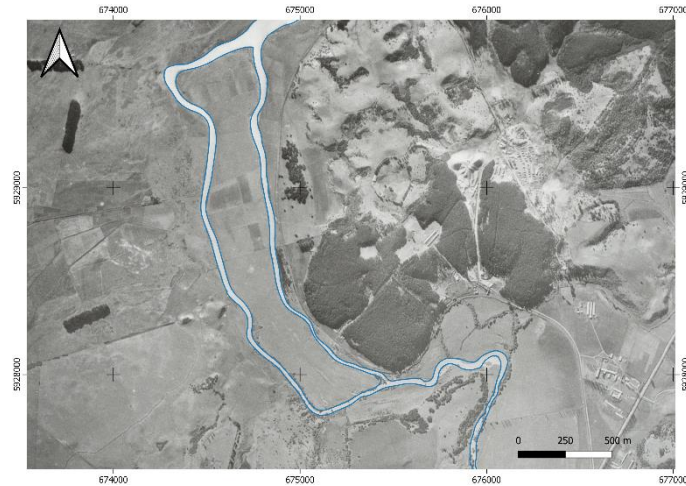


**Figura 4.27 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 1945**



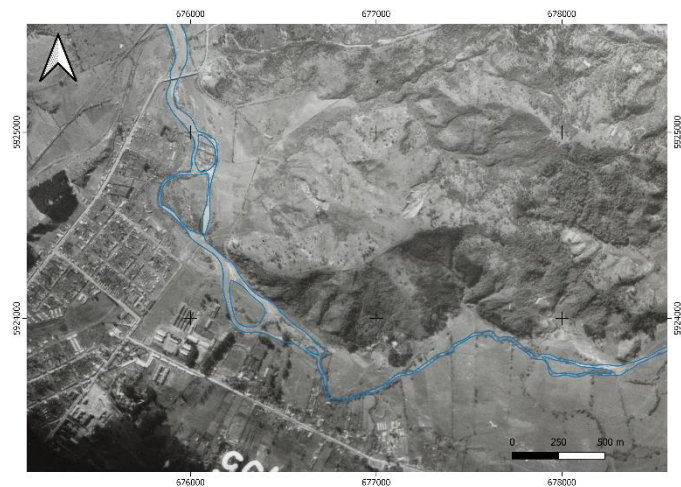
**Figura 4.28 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 1945**

La Figura 4.29 muestra la delimitación del canal activo antes de llegar a la desembocadura. En esta zona se observa que en el año 1945 el río Andalién se dividía en dos canales formando una gran isla. En la actualidad, esa zona se encuentra canalizada, formando un solo canal.



**Figura 4.29 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 1945**

En la Figura 4.30 se pueden observar las grandes islas que se formaban en la parte baja de la cuenca del río Andalién y la capacidad que tenía el río para migrar hacia el centro de la comuna de Concepción. En el año 1945, la población de la ciudad de Concepción se concentraba en el centro, hacia el río Bio Bío, por lo que el río Andalién no tenía barreras que confinaran su escurrimiento natural.

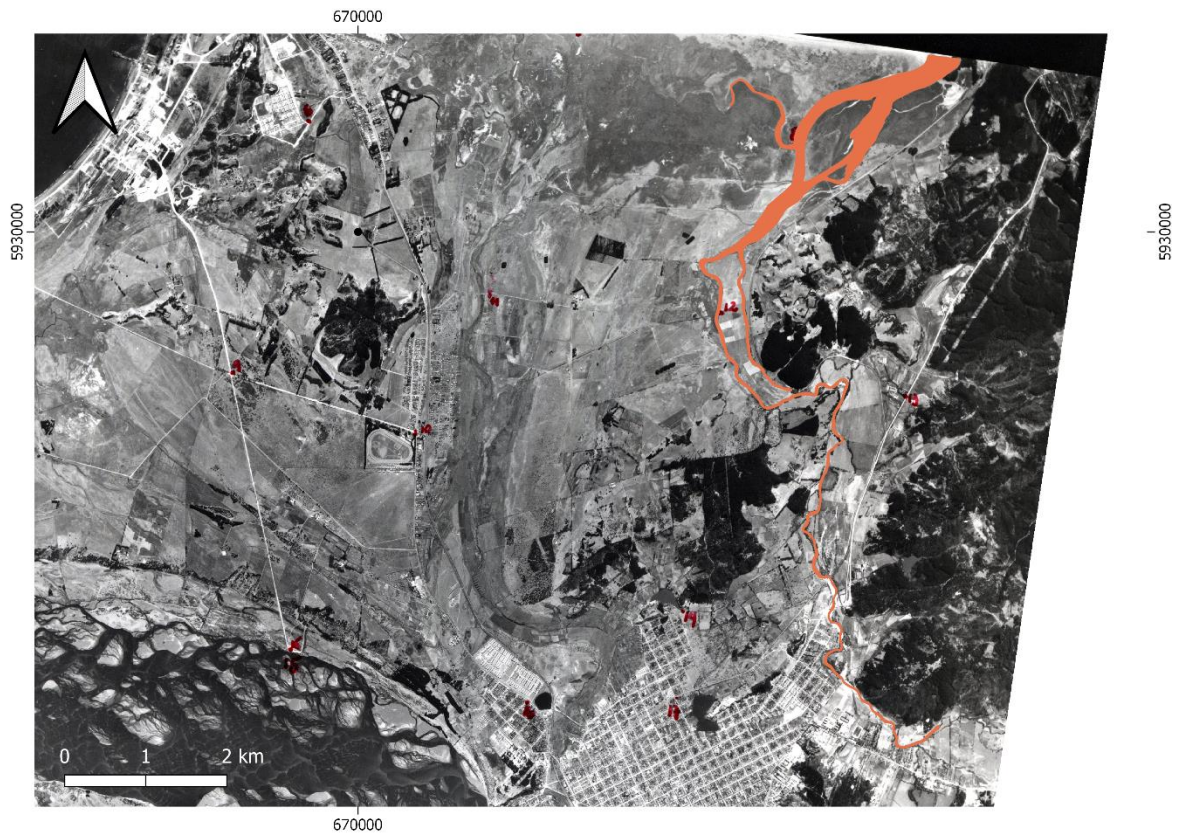


**Figura 4.30 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 1945**

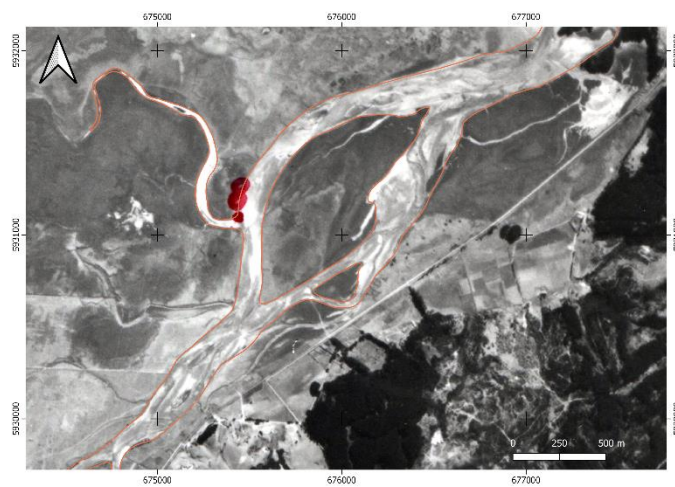
## 1955

La Figura 4.31 muestra la delimitación del canal activo del año 1955. En la imagen se puede observar que el flujo del río Andalién escurría con escasa presión antrópica, a excepción de la parte más aguas arriba dónde, debido a la urbanización, se empieza a confinar el río. La Figura 4.32 muestra la zona

de la desembocadura del río Andalién en el océano Pacífico, dónde se puede observar el humedal de Rocuant y la característica isla de la desembocadura, al igual que en 1945.



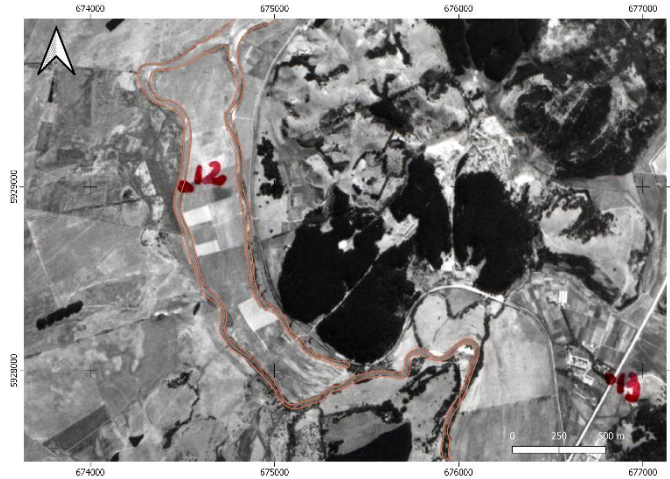
**Figura 4.31 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 1955**



**Figura 4.32 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 1955**

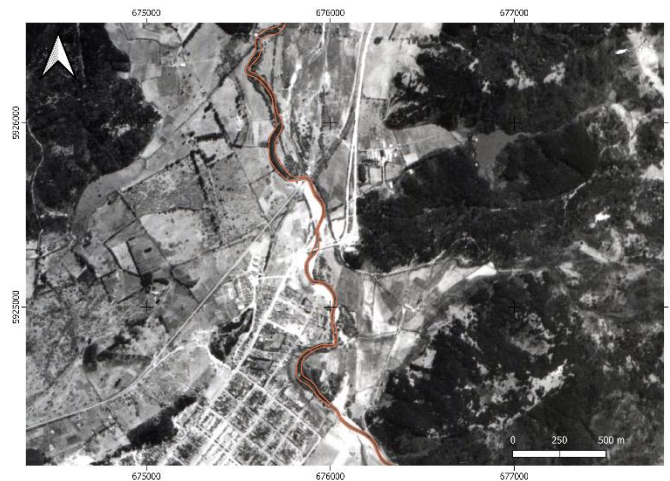


La Figura 4.33 muestra la delimitación del canal activo antes de llegar a la desembocadura. En esta zona se observa que en el año 1955 ya no se formaba la gran isla que se pudo visualizar en las imágenes del año 1945 y el canal que permitía la formación de esta isla se transformó en un paleocanal.



**Figura 4.33 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 1955**

En la Figura 4.34 se pueden observar que la ciudad de Concepción se empezó a urbanizar hacia el río Andalién, produciendo que este se empiece a confinar en esa zona y produciendo que la migración del río empiece a disminuir.

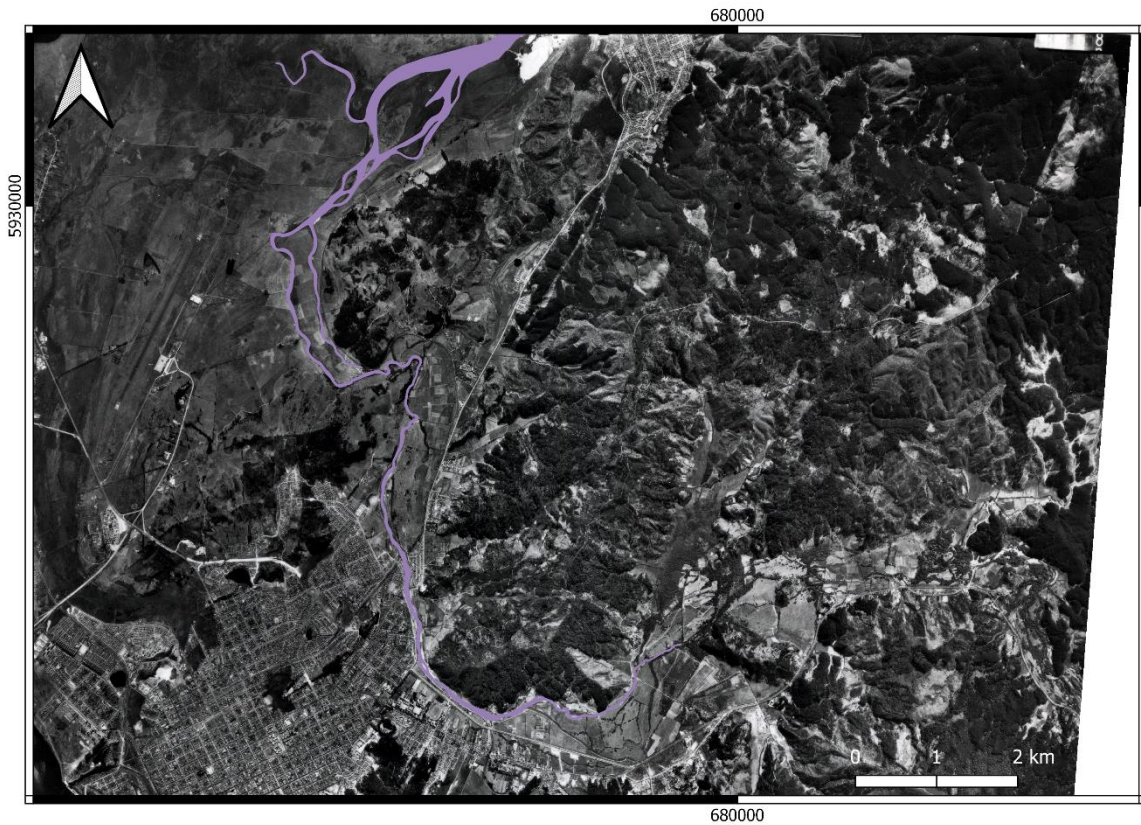


**Figura 4.34 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 1955**

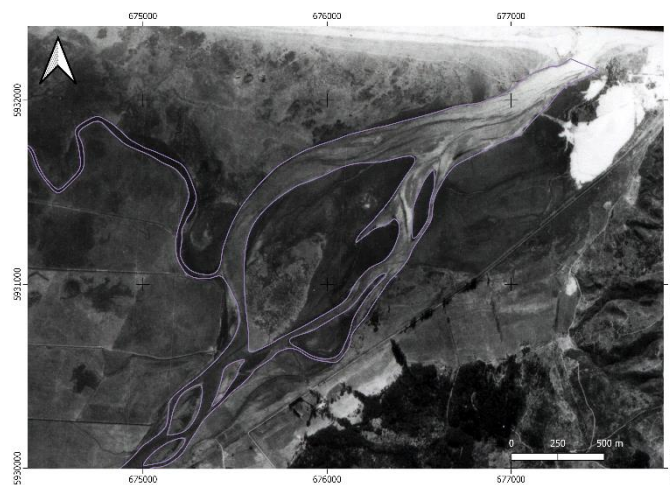
## **1978**

La Figura 4.35 muestra la delimitación del canal activo del año 1978. En la imagen se puede observar que el flujo del río Andalién escurría libremente, a excepción de la parte más aguas arriba dónde la

urbanización de parte de la ciudad de Concepción se concentró en una de las riberas del río Andalién, produciendo el confinamiento del río en esa zona. La Figura 4.36 muestra la zona de la desembocadura del río Andalién en el océano Pacífico, la cual no ha tenido variaciones respecto a los años 1945 y 1955.

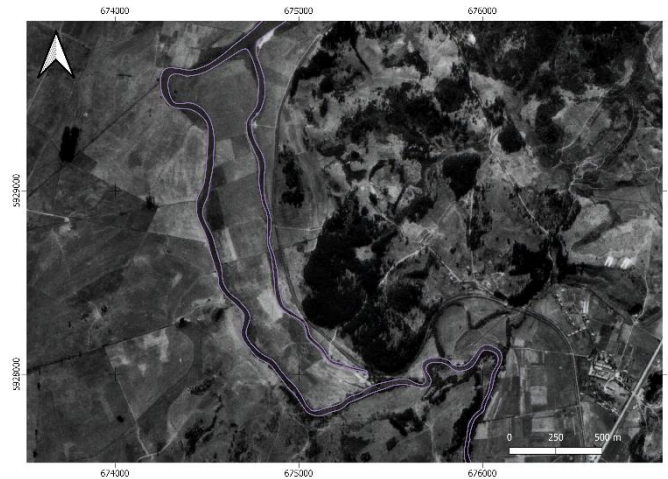


**Figura 4.35 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 1978**



**Figura 4.36 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 1978**

La Figura 4.37 muestra la delimitación del canal activo antes de llegar a la desembocadura. En esta zona se observa el mismo fenómeno del año 1955, por lo que se puede analizar que hasta el año 1945 se formaban dos canales en ese sector.



**Figura 4.37 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 1978**

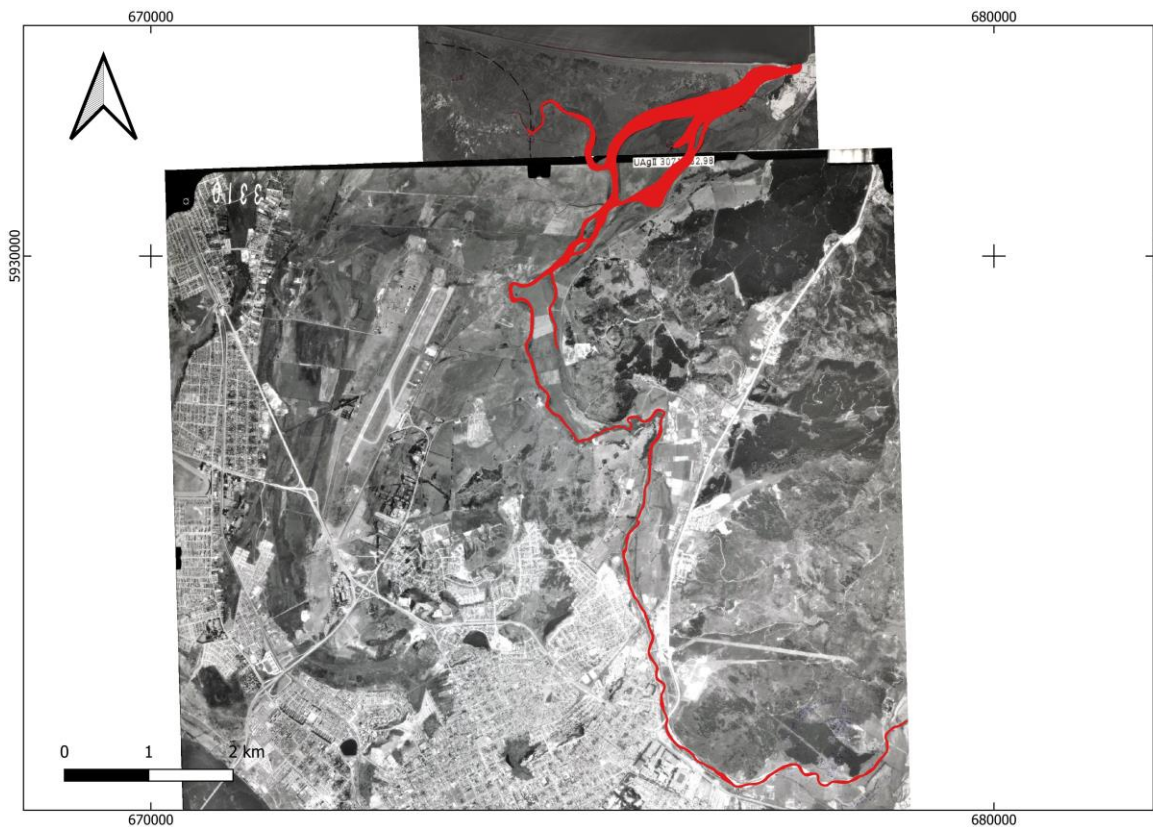
En la Figura 4.38 se observa que ya en el año 1978 la zona cercana al río Andalién, por dónde escurrían sus aguas en 1945, se encuentra urbanizada y además, construida la Avenida General Bonilla. Lo anterior, provocó que el río se confinará aún más, sin permitir el libre escurrimiento de sus aguas.



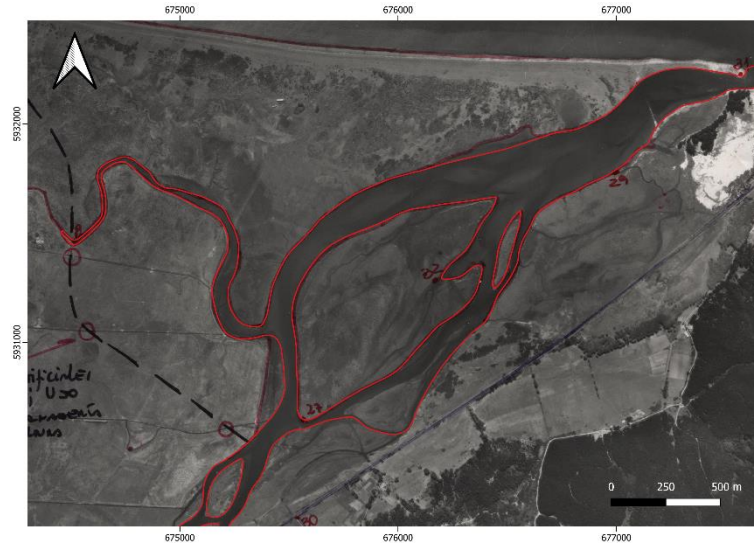
**Figura 4.38 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 1978**

## 1992

La Figura 4.39 muestra la delimitación del canal activo del año 1992. En la imagen se puede observar que el flujo del río Andalién escurría libremente, a excepción de la parte más aguas arriba dónde la urbanización de parte de la ciudad de Concepción se concentró en una de las riberas del río Andalién, produciendo el confinamiento del río en esa zona. La Figura 4.40 muestra la zona de la desembocadura del río Andalién en el océano Pacífico, la cual no ha tenido variaciones respecto al año 1978

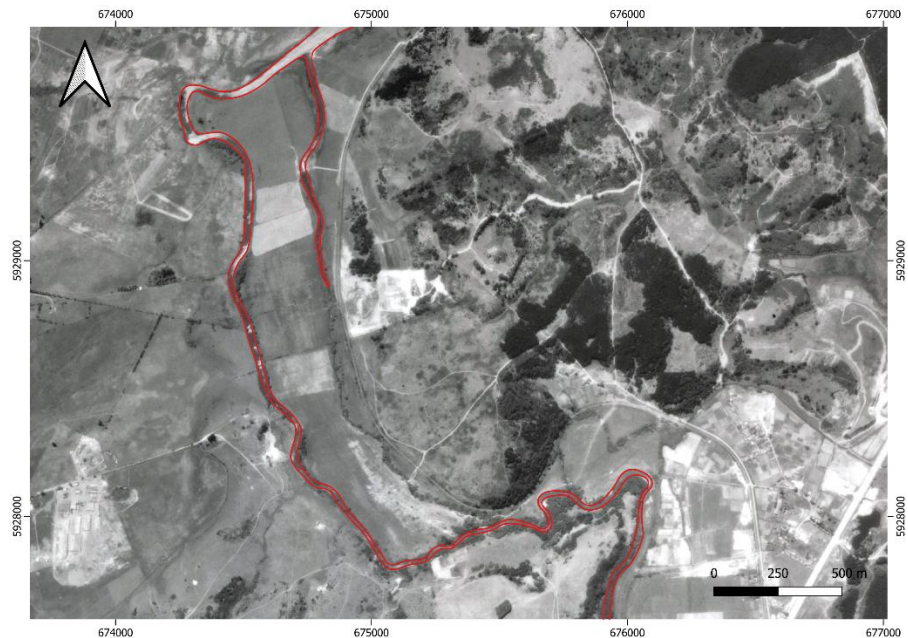


**Figura 4.39 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 1992**



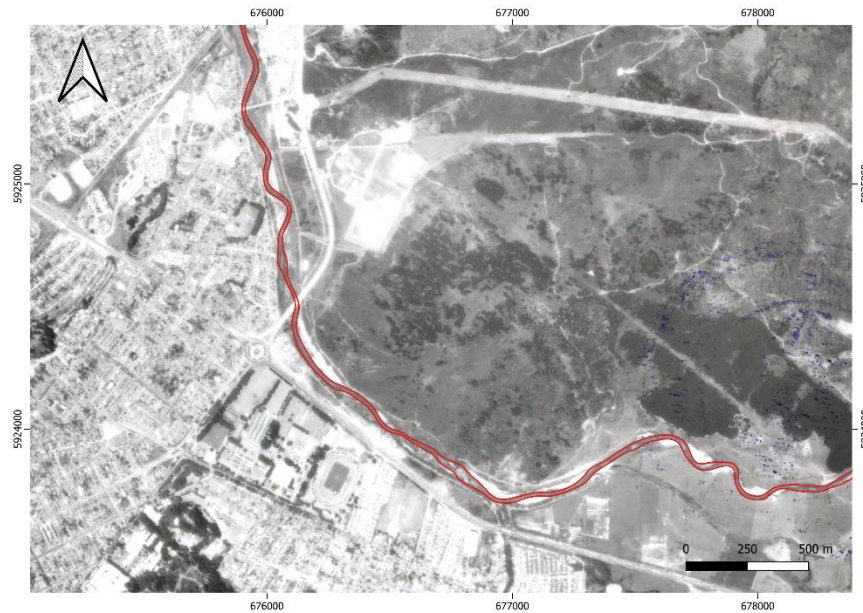
**Figura 4.40 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 1992**

La Figura 4.41 muestra la delimitación del canal activo antes de llegar a la desembocadura. En esta zona se observa el mismo fenómeno del año 1955 y 1978, por lo que se puede analizar que hasta el año 1945 se formaban dos canales en ese sector.



**Figura 4.41 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 1992**

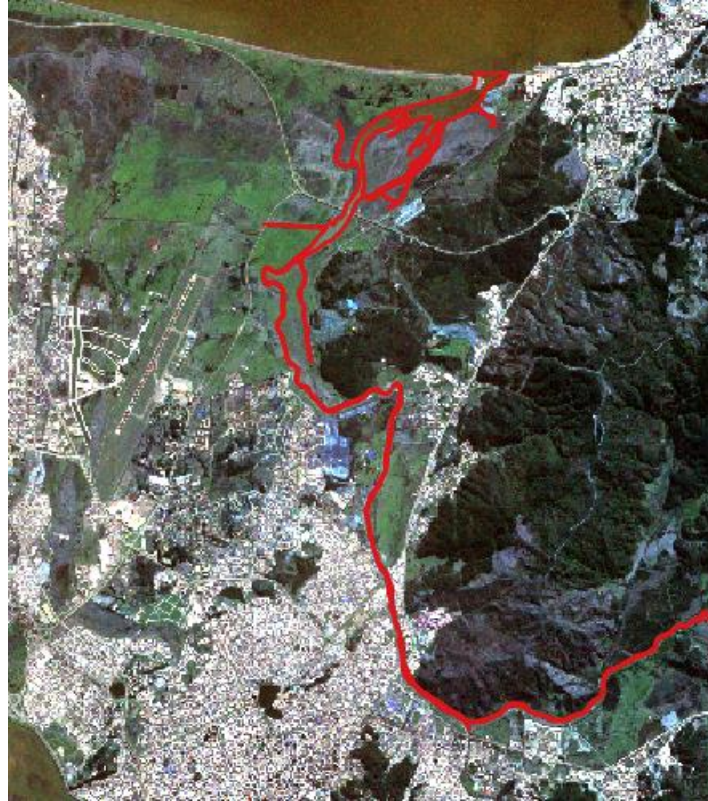
En la Figura 4.41 se observa que en el año 1992 no hay mayor variación en el área urbana respecto al año 1978.



**Figura 4.42 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 1992**

## **2010**

La Figura 4.43 muestra la delimitación del canal activo del año 2010. En la imagen se puede observar que el área urbana se ha expandido más hacia el río Andalién en comparación al año 1992, lo que provoca que el río se confine más con el pasar de los años. La Figura 4.43 muestra la zona de la desembocadura del río Andalién en el océano Pacífico, la cual no ha tenido variaciones respecto a los años 1945, 1955, 1978 y 1992.



**Figura 4.43 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 2010**



**Figura 4.44 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 2010**

La Figura 4.45 muestra la delimitación del canal activo antes de llegar a la desembocadura. En esta zona se observa el mismo fenómeno de los años 1955, 1978 y 1997, por lo que se puede analizar que hasta el año 1945 se formaban dos canales en ese sector. Además, se observa una expansión urbana en esa zona colindante al río Andalién.



**Figura 4.45 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 2010**

En la Figura 4.46 se observa la gran expansión urbana que ha tenido la ciudad de Concepción respecto al año 1944 y como se ha confinado el río.

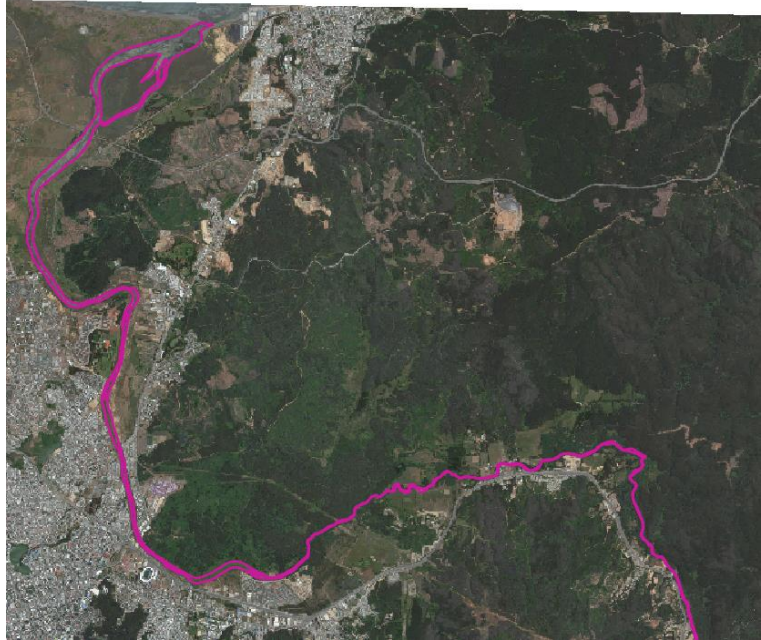


**Figura 4.46 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 2010**

## **2020**

La Figura 4.47 muestra la delimitación del canal activo del año 2020. En la imagen se puede observar que el río se encuentra confinado producto de la expansión urbana y por la canalización realizada por la Dirección de Obras Hidráulicas a lo largo del río Andalién para mitigar inundaciones como la producida el año 2006. La Figura 4.48 muestra la zona de la desembocadura del río Andalién en el océano Pacífico, la cual no ha tenido variaciones respecto a los últimos años, lo cual se puede atribuir a que es una humedal que se encuentra protegido.





**Figura 4.47 Canal Activo delimitado en imagen histórica de la ciudad de Concepción de 2020**



**Figura 4.48 Canal Activo en la desembocadura del río Andalién de 2020**

La Figura 4.49 muestra la delimitación del canal activo antes de llegar a la desembocadura. En esta zona se observa la canalización realizada por la DOH y cómo ha cambiado la morfología del río producto de la intervención antrópica.



**Figura 4.49 Canal Activo en la parte media del río Andalién de 2020**

En la Figura 4.50 se observa el grado de confinamiento que tiene el río en esa zona y como ha aumentado el área urbana respecto al año 1945.

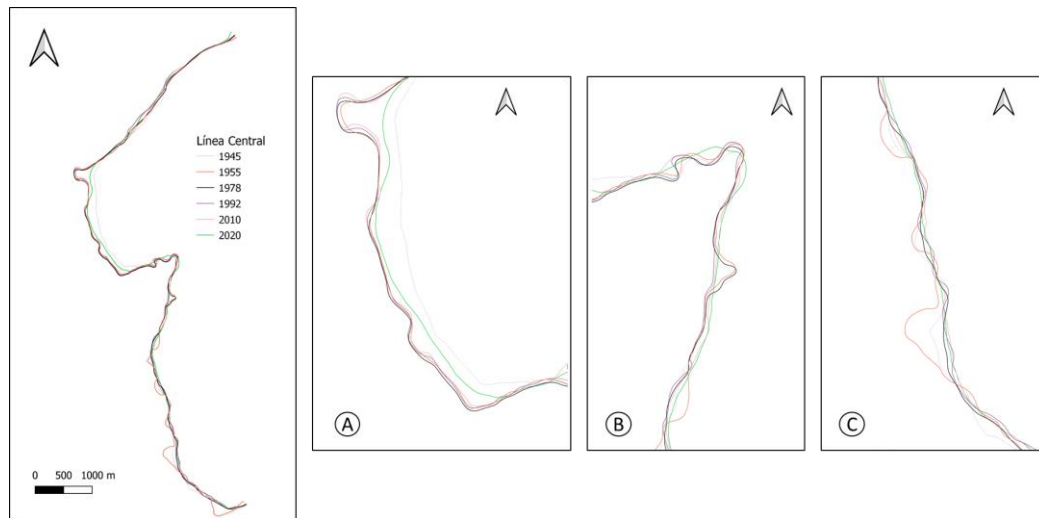


**Figura 4.50 Canal Activo en la zona más intervenida antrópicamente del río Andalién de 2020**

#### **4.4.1.3 Extracción línea central**

Delimitados los canales activos de los años 1945, 1955, 1978, 1992, 2010 y 2020 se extrajo la línea central de cada uno a partir de sus envolventes. La Figura 4.51 muestra la variación de la línea central entre los años 1945 y 2020, dónde se pueden observar los cambios morfológicos del río y como ha ido migrando con el pasar de los años.

A partir de la Figura 4.43 se puede observar que la zona de la desembocadura no ha tenido grandes variaciones, pero hacia aguas arriba el río se ha ido confinando. Lo anterior, se debe a la urbanización de la ciudad de Concepción hacia el río Andalién (Figura C) y de la canalización que realizó la Dirección de Obras Hidráulicas en el año 2015 (Figura A y B) para evitar nuevos desbordes del río con el ocurrido en el año 2006 en el sector Collao.



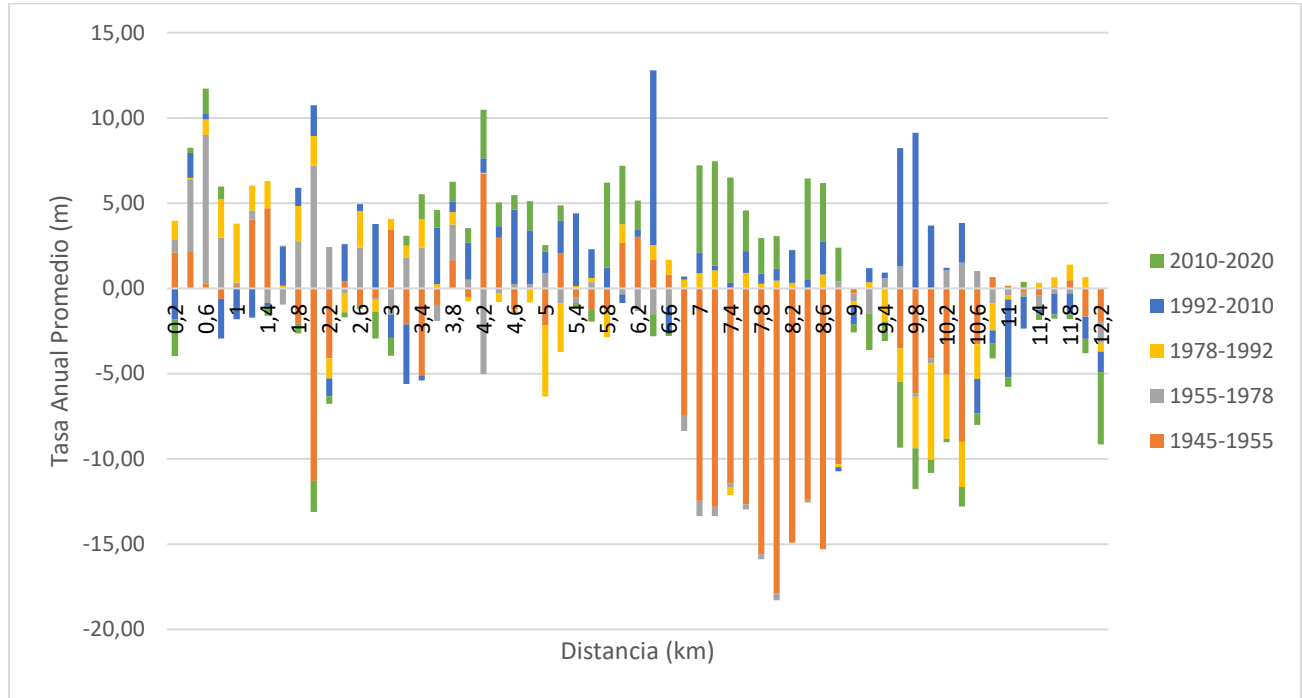
**Figura 4.51 Variación de la línea central entre los años 1945 y 2020**

#### 4.4.1.4 Tasas de migración

La Figura 4.52 muestra un gráfico de las tasas de migración anuales promedio entre 1945 y 2020 desde aguas arriba hacia aguas abajo. A partir del gráfico se puede observar que los años donde el río Andalién tuvo mayor tasa de migración fueron entre los años 1945-1955 y 2010-2020.

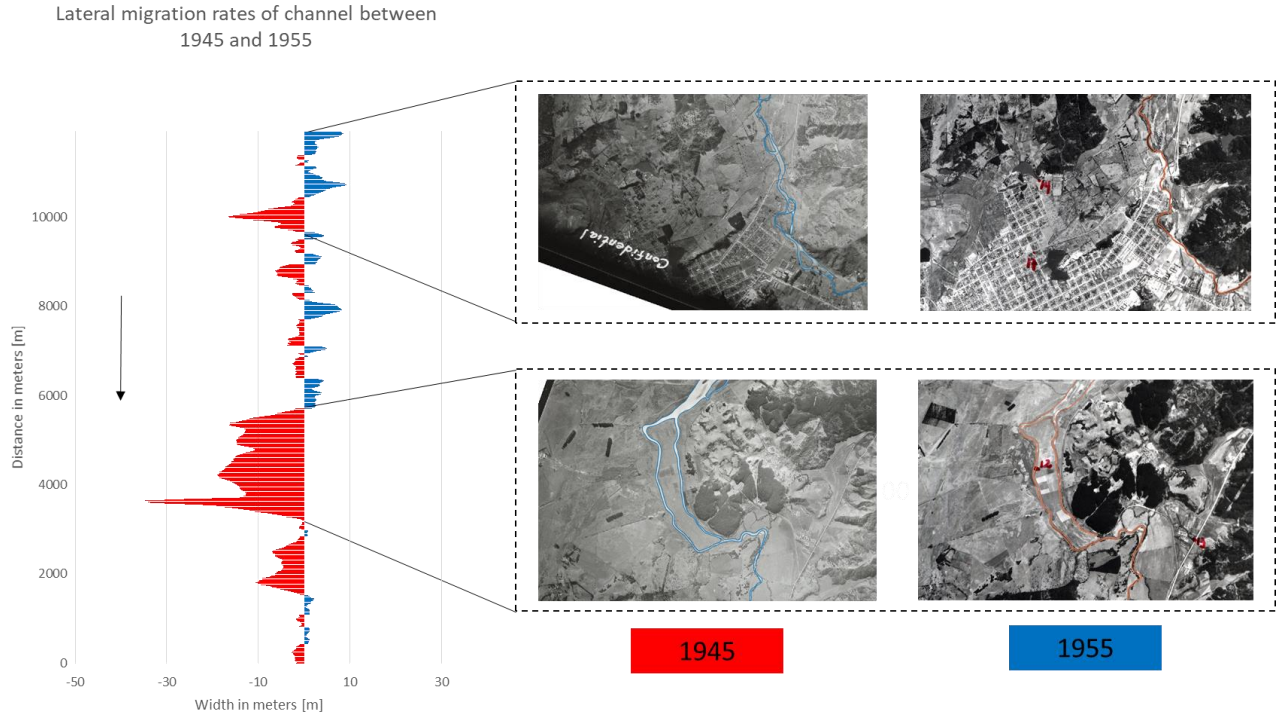
En el año 1945 el río se encontraba completamente no-confinado y el flujo migraba libremente por su llanura de inundación, pero en el año 1955, la urbanización de la ciudad de Concepción se empezó a expandir hacia el río Andalién, produciendo que este se empiece a confinar. Además, en el gráfico se observa una gran variación en las tasas de migración entre los kilómetros 7 y 9, zona que corresponde aguas arriba de la gran isla de la desembocadura, donde en el año 1945 el río Andalién se dividía en 2 canales produciendo una gran isla, lo cual en 1955 desapareció.

En el grafico se muestra que entre los años 2010 y 2020 las tasas de migración fueron elevadas, lo anterior producto de la canalización realizada por en el año 2015 entre los kilómetros 5.6 y 9.



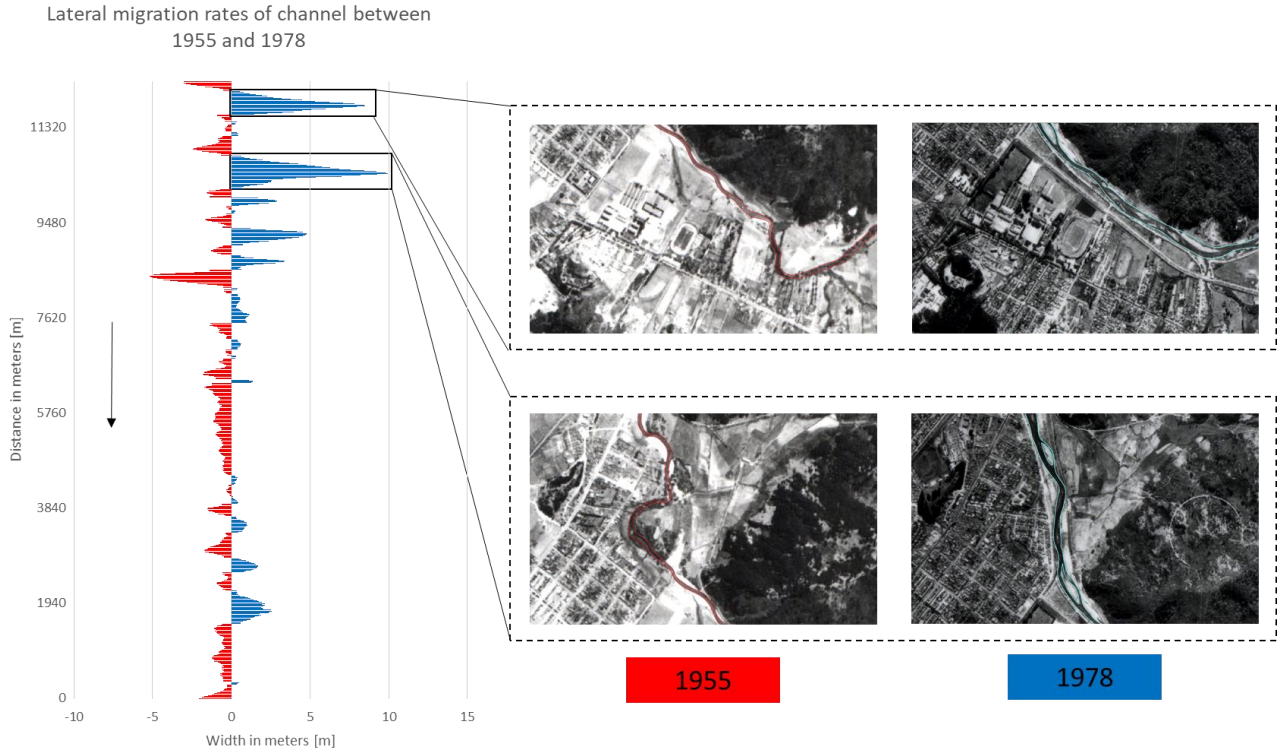
**Figura 4.52 Gráfico de las Tasas Anuales Promedio de migración desde aguas arriba hacia abajo entre los años 1945 y 2020**

La Figura 4.53 muestra las tasas de migración anual del canal entre los años 1945 y 1955 y los sectores dónde el río más ha migrado dentro de su llanura de inundación. Durante este periodo, la zona urbana se empezó a expandir hacia el río Andalién, produciendo que el río tenga menos capacidad para migrar lateralmente.



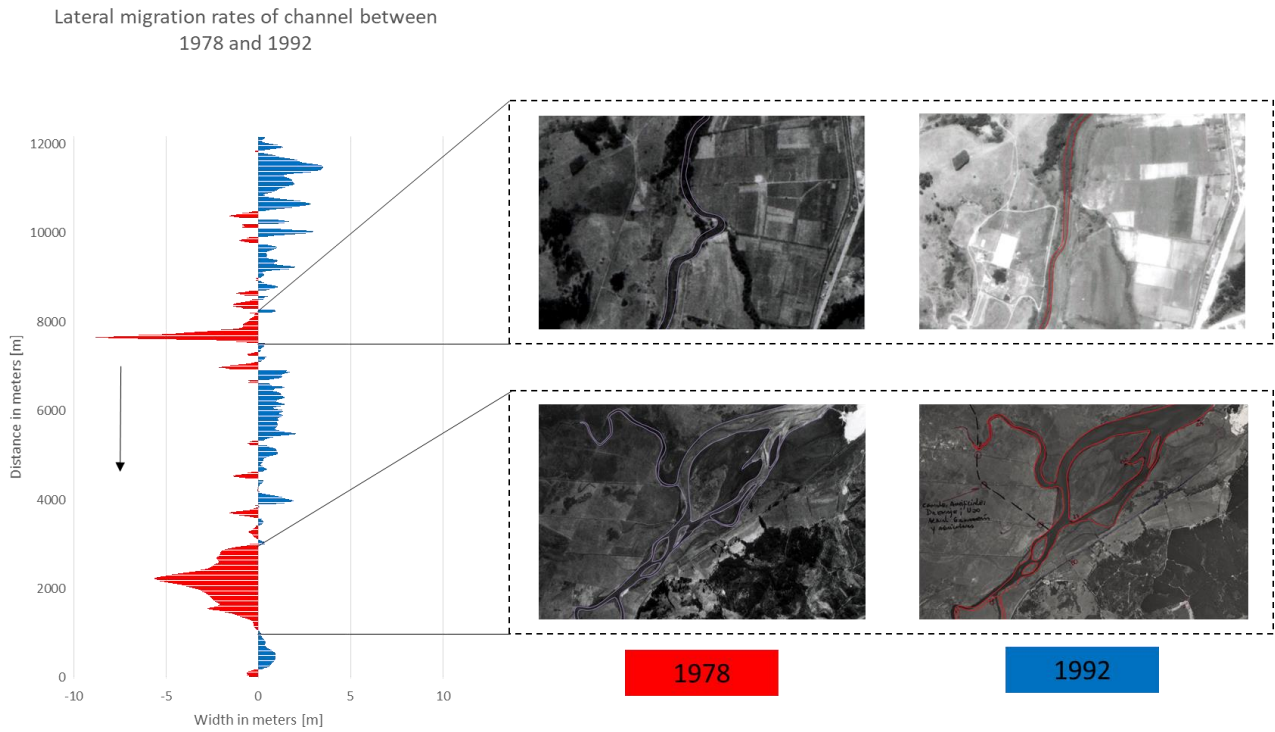
**Figura 4.53** Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 1945 y 1955

La Figura 4.54 muestra las tasas de migración anual del canal entre los años 1955 y 1978 y los sectores dónde el río más ha migrado dentro de su llanura de inundación. En este periodo se puede observar dos sectores del río afectados por la intervención antrópica producida por la expansión urbana y la construcción de la ruta R-146. La tasa de migración anual de estos sectores es aproximadamente 10 m por años, produciendo que en el año 1978 el río se encuentre confinado en esos sectores.



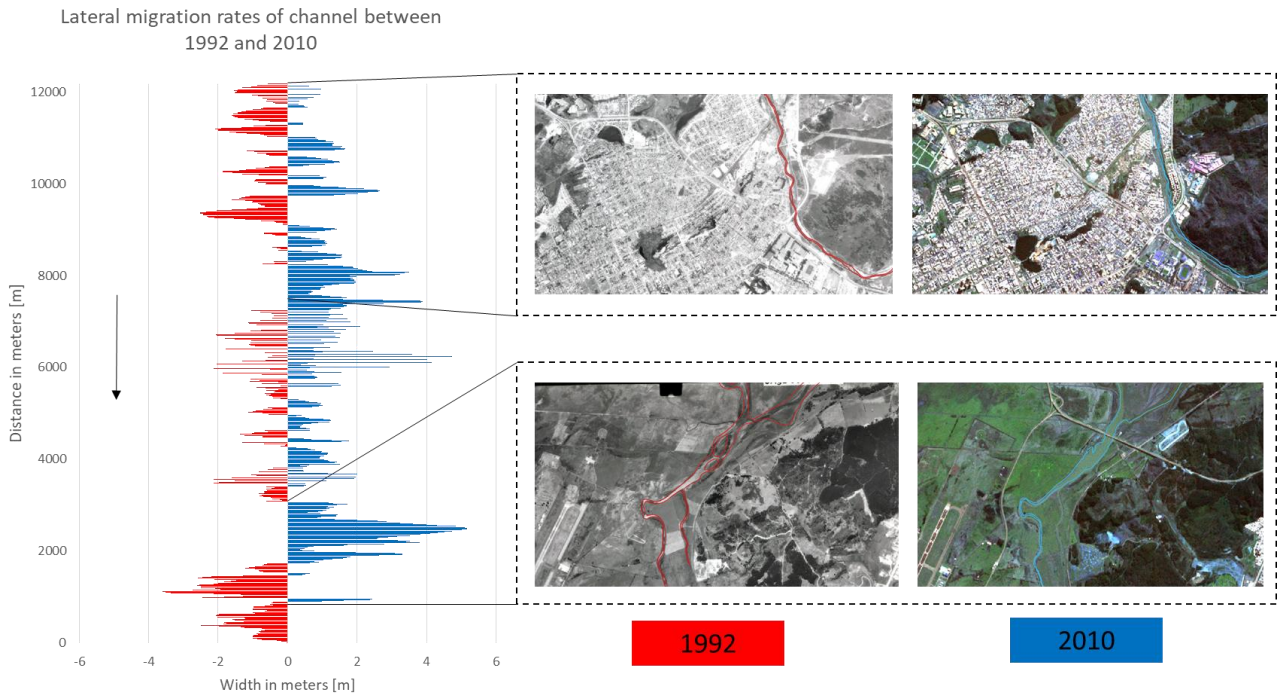
**Figura 4.54** Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 1955 y 1978

La Figura 4.55 muestra las tasas de migración anual del canal entre los años 1978 y 1992 y los sectores dónde el río ha intensificado la migración dentro de su llanura de inundación. Durante este periodo el río ha tenido tasas de migración menores a los otros periodos, a excepción de un sector dónde se produce un cambio de 10 metros por efecto de la urbanización.



**Figura 4.55 Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 1978 y 1992**

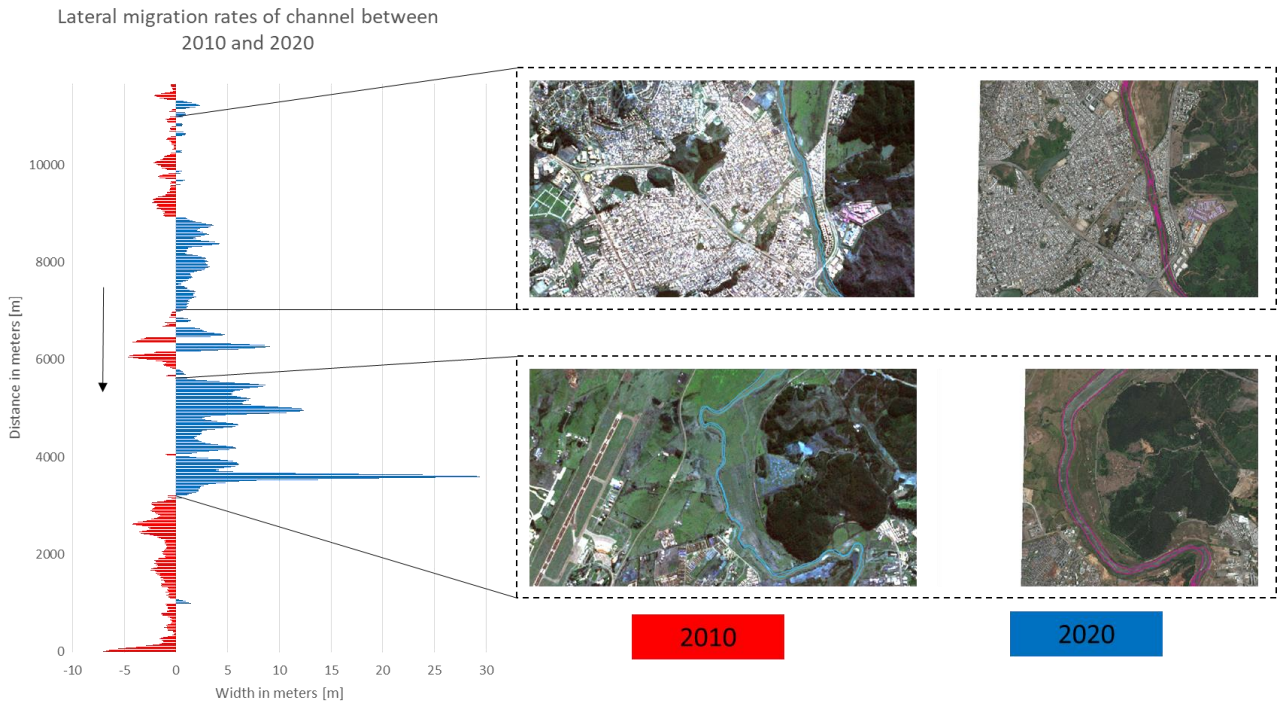
La Figura 4.56 muestra las tasas de migración anual del canal entre los años 1992 y 2010 y los sectores dónde el río más ha migrado dentro de su llanura de inundación. Durante este periodo las tasas de migración varían entre 0 y 5 metros, lo que significa que el río no ha tenido grandes variaciones respecto a los otros periodos, lo cual se atribuye a que la urbanización ya se realizó en sectores aledaños al río por lo que este ya se encuentra semi-confinado.



**Figura 4.56 Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 1992 y 2010**

La Figura 4.57 muestra las tasas de migración anual del canal entre los años 2010 y 2020 y los sectores dónde el río más ha migrado dentro de su llanura de inundación. En el año 2015 la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas inició la canalización del río Andalién en casi toda la parte baja de la cuenca, la que consistió en revestir en hormigón el río en algunos sectores, construir defensas fluviales y taludes a lo largo del río para evitar la inundación de las viviendas aledañas. Es por lo anterior, que las tasas de migración lateral de este periodo son mayores que los otros, ya que se termina de confinar el río Andalién para evitar una crecida como la ocurrida en el año 2006.





**Figura 4.57** Gráfico de las tasas de migración lateral promedio entre 2010 y 2020

#### 4.4.2 Cambio en el uso de la tierra

Se muestran los resultados obtenidos del análisis del cambio en el uso de la tierra que ha tenido la cuenca del río Andalién y específicamente como esto ha afectado al río Andalién en la parte baja.

##### 4.4.2.1 Uso de la tierra año 1997

La Figura 4.58 muestra los tipos de uso de la tierra en la cuenca del río Andalién en el año 1997 y la Figura 4.59 muestra un gráfico con el porcentaje de cada tipo de uso de la tierra respecto al área total de la cuenca.

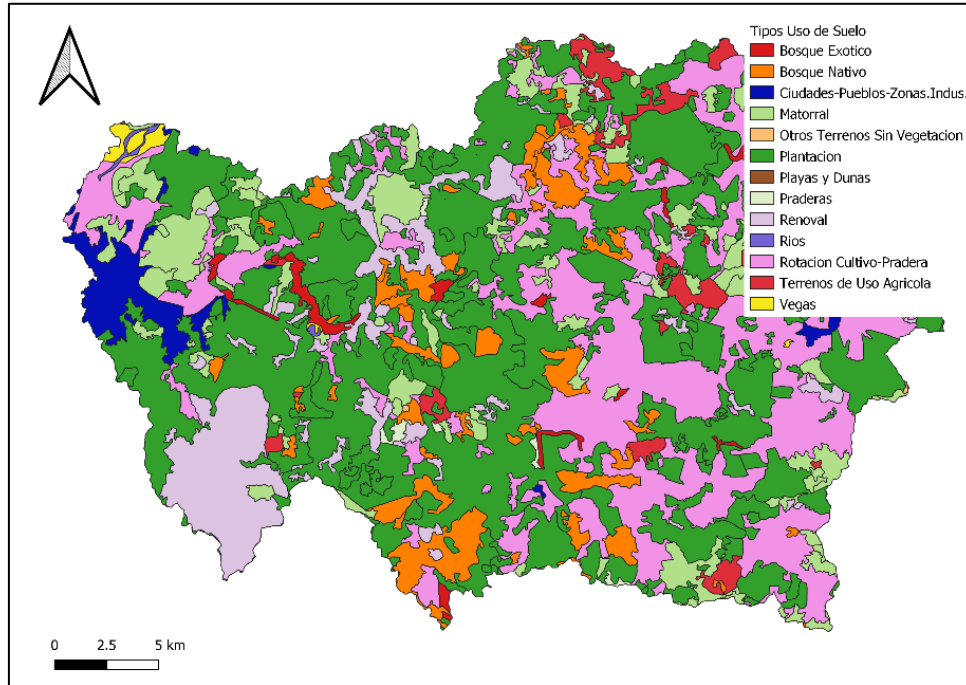


Figura 4.58 Mapa de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 1997

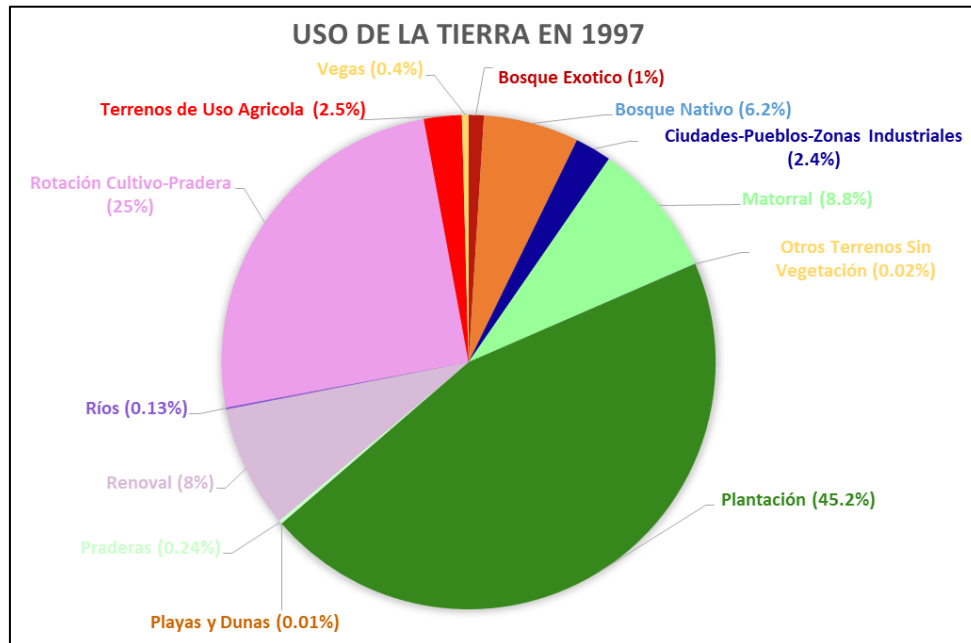
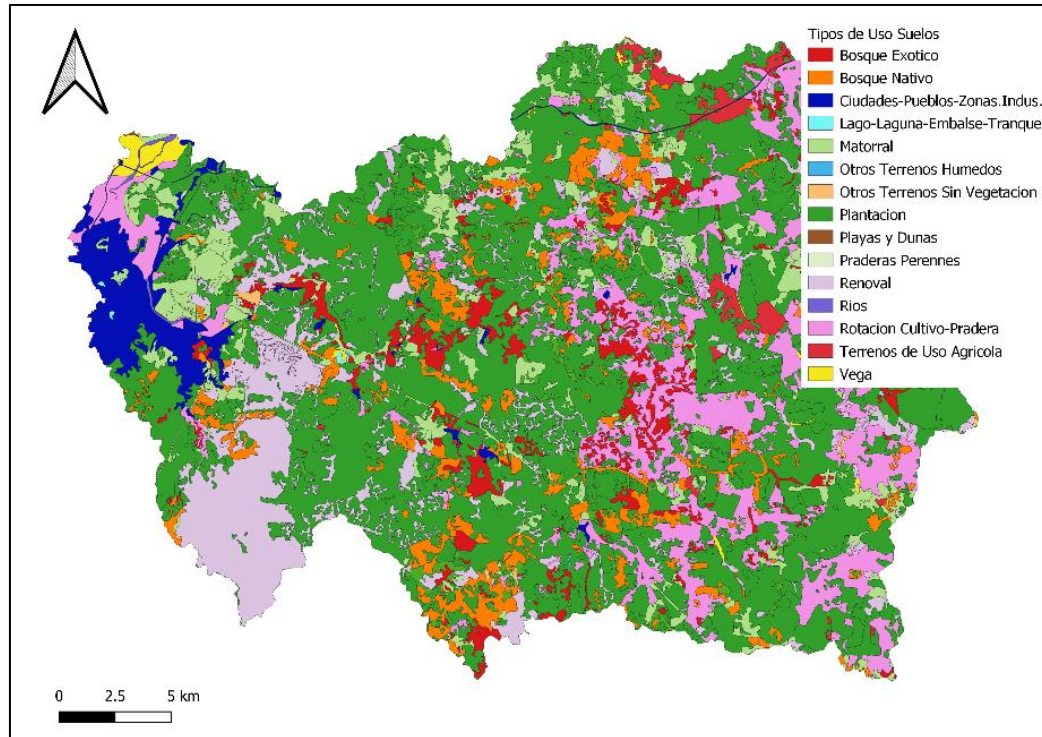


Figura 4.59 Gráfico del porcentaje de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 1997

#### 4.4.2.2 Uso de la tierra año 2008

La Figura 4.60 muestra los tipos de uso de la tierra en la cuenca del río Andalién en el año 2008 y la Figura 4.61 muestra un gráfico con el porcentaje de cada tipo de uso de la tierra respecto al área total de la cuenca.



**Figura 4.60** Mapa de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 2008

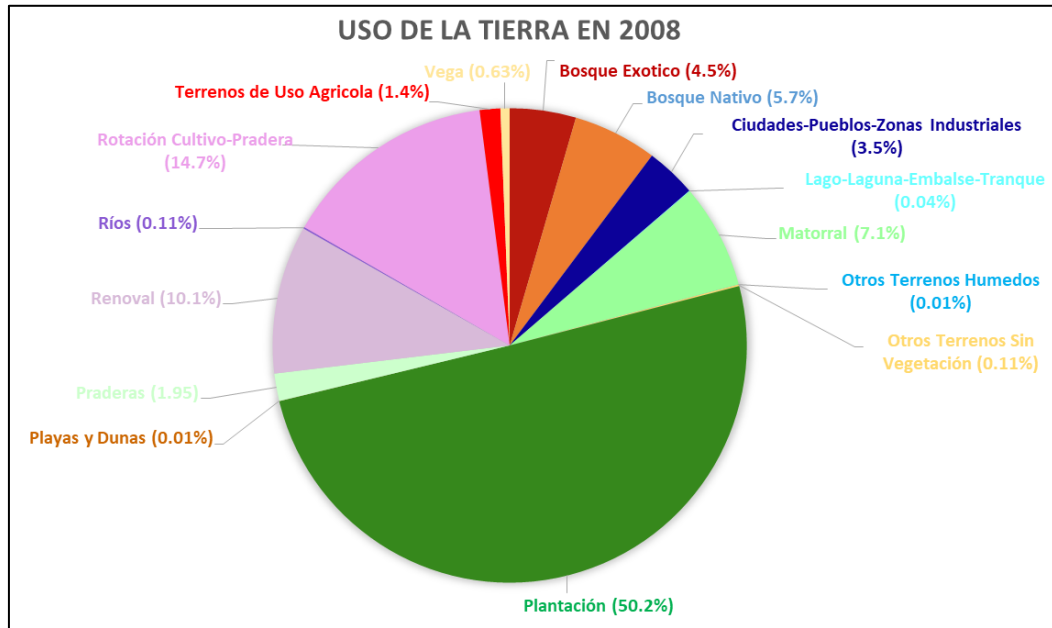


Figura 4.61 Gráfico del porcentaje de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 2008

#### 4.4.2.1 Uso de la tierra año 2015

La Figura 4.62 muestra los tipos de uso de la tierra en la cuenca del río Andalién en el año 2015 y la Figura 4.63 muestra un gráfico con el porcentaje de cada tipo de uso de la tierra respecto al área total de la cuenca.

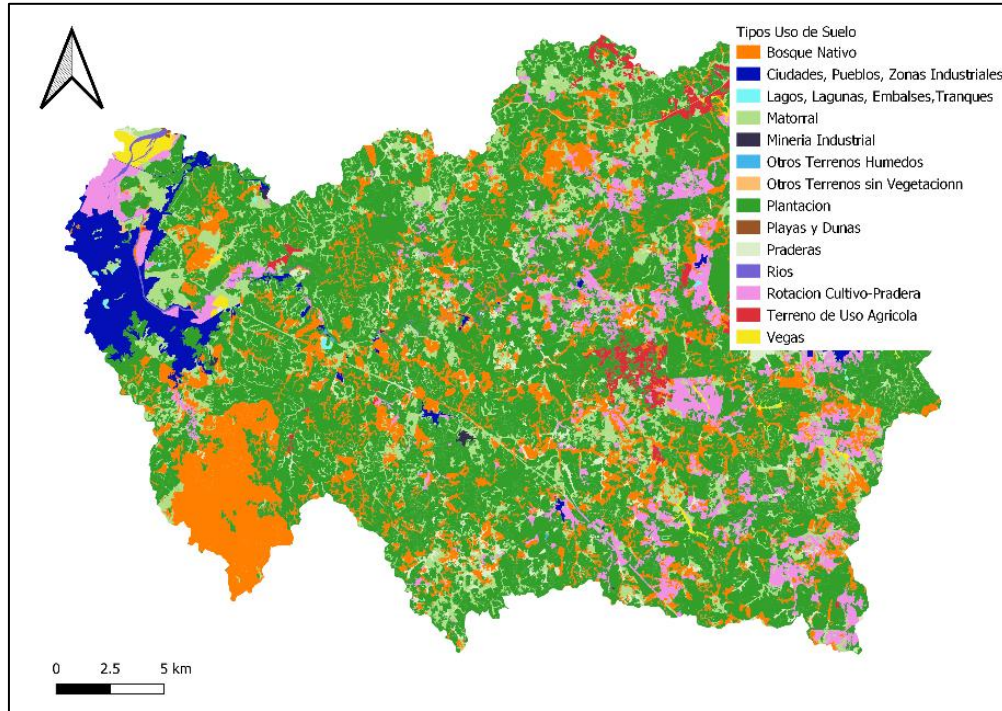


Figura 4.62 Mapa de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 2015

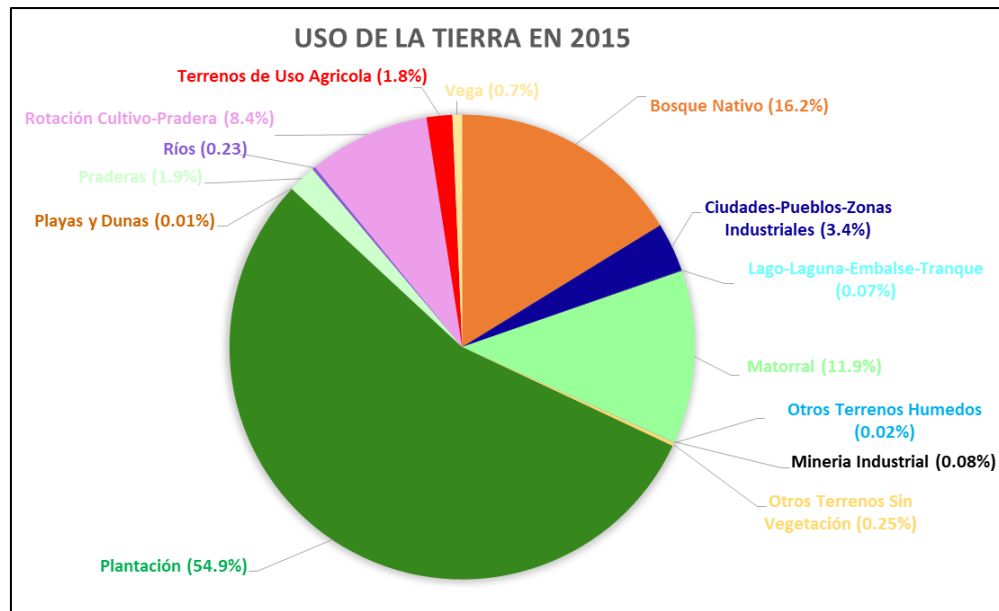


Figura 4.63 Gráfico del porcentaje de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién en 2015

#### 4.4.2.4 Comparación del uso de la tierra

A partir de la Tabla 4.6 se puede realizar la comparación de cómo ha cambiado el uso de la tierra en la cuenca del río Andalién, entre los años 1997, 2008 y 2015. En primer lugar, se puede observar que hay tipos de uso de la tierra que se han extinguido como es el caso del Bosque Exótico y el Renoval, que al año 2015 ya no se encuentran en la cuenca.

A nivel de cuenca, la variación en porcentaje de área de las Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales no ha sido considerable pero si se analiza puntualmente en la zona del río Andalién, se puede observar el considerable cambio en el uso de la tierra. En 1997, el área que ocupaban las Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales era de 18.91 km<sup>2</sup> y en el 2015 era de 26.84 km<sup>2</sup>, lo que significa un crecimiento del 141% en 18 años.

También, a partir de la Tabla 4.6, se visualiza un aumento del área de Plantaciones y Bosque Nativo y una disminución del área de Terrenos de Uso Agrícola y Rotación Cultivo-Pradera.

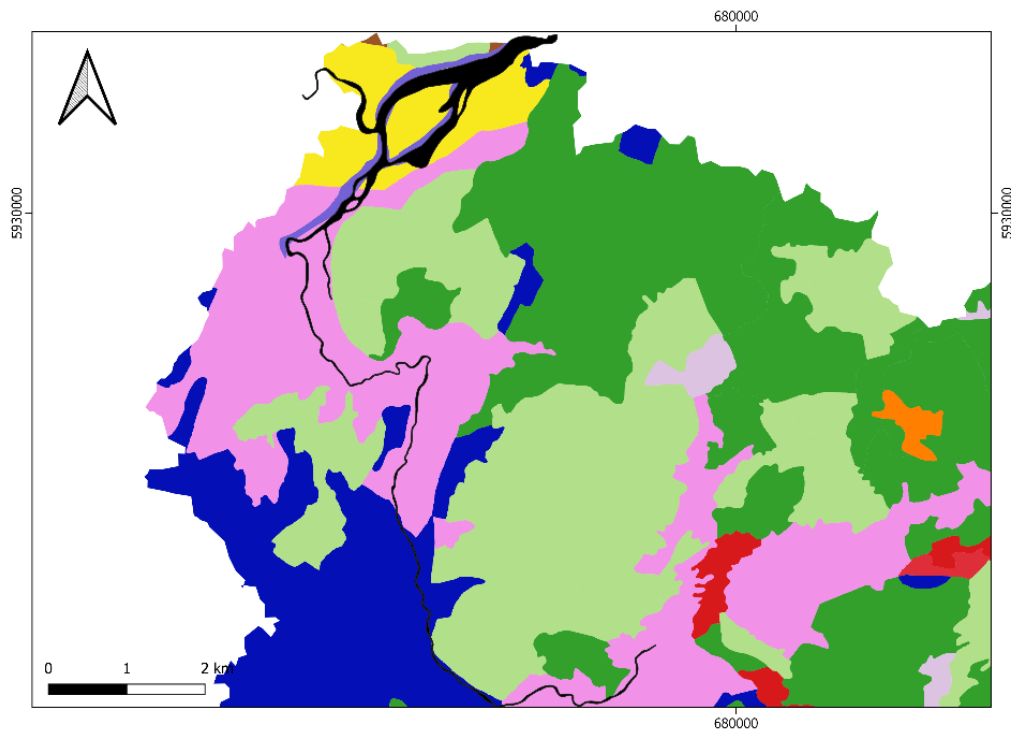
**Tabla 4.6 Comparación del uso de la tierra de los años 1997, 2008 y 2015**

<b>Uso de la Tierra</b>	<b>% año 1997</b>	<b>% año 2008</b>	<b>% año 2015</b>
<b>Bosque Exótico</b>	0.996	4.507	-
<b>Bosque Nativo</b>	6.238	5.734	16.218
<b>Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales</b>	2.391	3.452	3.394
<b>Matorral</b>	8.849	7.120	11.966
<b>Otros Terrenos Sin Vegetación</b>	0.019	0.106	0.252
<b>Plantación</b>	45.176	50.253	54.912
<b>Playas y Dunas</b>	0.005	0.008	0.009
<b>Praderas</b>	0.240	1.869	1.950
<b>Renoval</b>	8.017	10.103	-
<b>Ríos</b>	0.128	0.111	0.228
<b>Rotación Cultivo-Pradera</b>	25.028	14.652	8.443
<b>Terrenos de Uso Agrícola</b>	2.480	1.404	1.788
<b>Vegas</b>	0.434	0.628	0.670
<b>Lago-Laguna-Embalse-Tranque</b>	-	0.043	0.073
<b>Minería Industrial</b>	-	-	0.078
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

#### 4.4.2.5 Comparación del uso de la tierra respecto al canal activo

A partir de los mapas de uso de la tierra de la cuenca del río Andalién, se analizan más en detalle realizando una comparación con los canales activos delimitados para el análisis del historial del río.

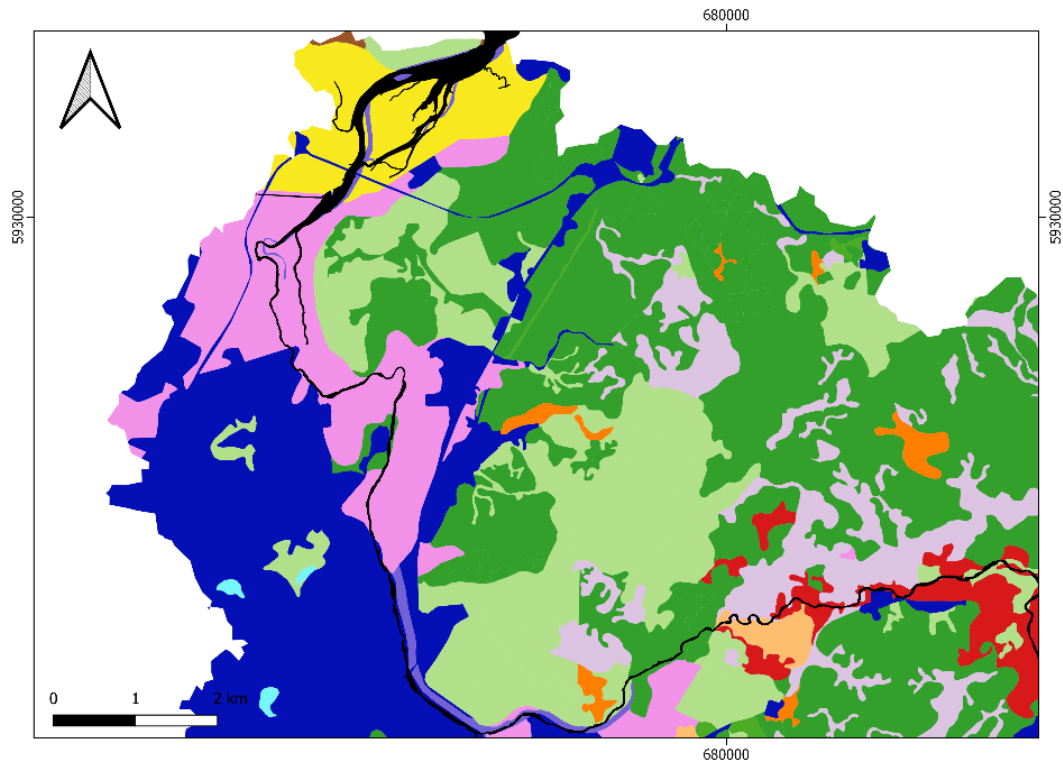
La Figura 4.64 muestra el tipo de uso de la tierra en el año 1997 en la parte baja de la cuenca comparando con el canal activo del año 1992. Se observa que los tipos de uso de la tierra que predominaban en las cercanías de las riberas del río Andalién eran Vegas, Rotación Cultivo-Praderas, Matorrales y Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales. El área del tipo de uso de la tierra de Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales era de 18.91 km<sup>2</sup>.



**Figura 4.64** Mapa de uso de la tierra en la parte baja de la cuenca del río Andalién en 1997 comparando el canal activo del río Andalién en 1992

La Figura 4.65 muestra el tipo de uso de la tierra en el año 2008 en la parte baja de la cuenca comparando con el canal activo del año 2010. Se observa que los tipos de suelo que predominaban en las cercanías de las riberas del río Andalién eran Vegas, Rotación Cultivo-Praderas y Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales. El área del tipo de uso de la tierra de Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales (azul) era de 27.32 km<sup>2</sup>, lo que significa un aumento del área en un 144.5%. Se observa que el área de

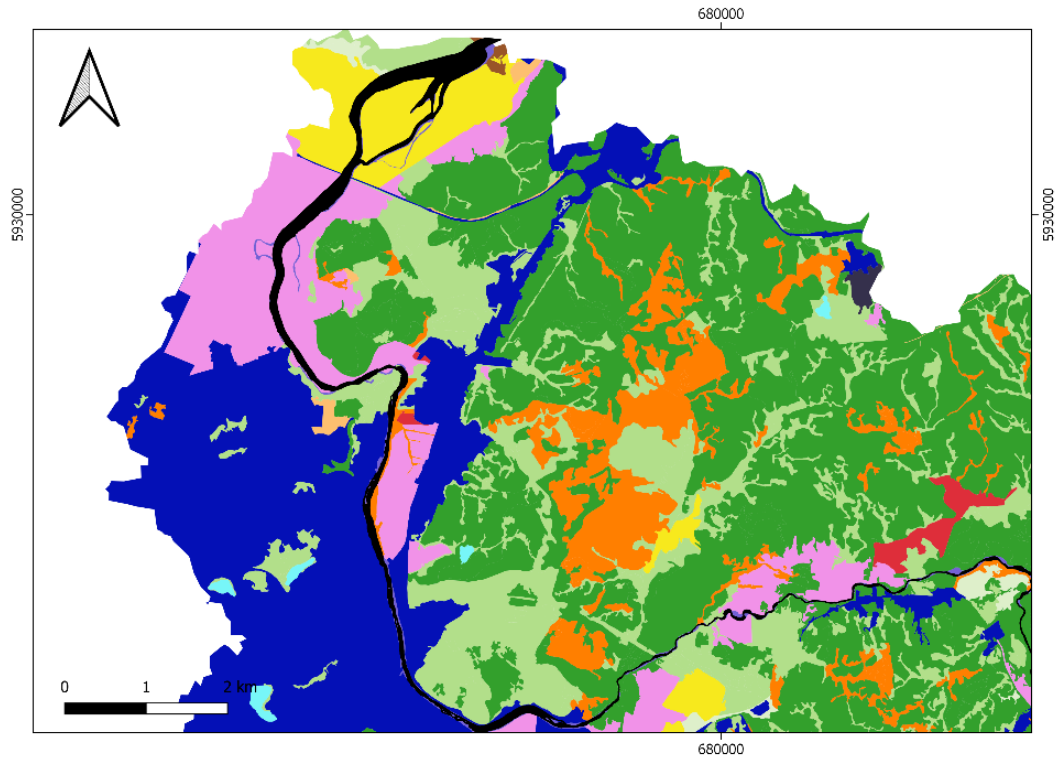
las Vegas (amarillo) corresponde al humedal Rocuant, el cual se encuentra protegido y no ha variado su área con el pasar de los años.



**Figura 4.65** Mapa de uso de la tierra en la parte baja de la cuenca del río Andalién en 2008 comparando el canal activo del río Andalién en 2010

La Figura 4.66 muestra el tipo de uso de la tierra en el año 2015 en la parte baja de la cuenca comparando con el canal activo del año 2020. Se observa que los tipos de la tierra que predominaban en las cercanías de las riberas del río Andalién eran Vegas, Rotación Cultivo-Praderas y Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales, al igual que el año 2008. El área del tipo de uso de la tierra de Ciudades-Pueblos-Zonas Industriales (azul) era de  $26.84 \text{ km}^2$ , lo que significa un aumento del área en un 141.9% respecto del año 1997. Al igual que para el año 2008, el área de las Vegas de la desembocadura no ha variado en el tiempo.





**Figura 4.66** Mapa de uso de la tierra en la parte baja de la cuenca del río Andalién en 2015 comparando el canal activo del río Andalién en 2020

## 4.5 Conclusiones

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del análisis estático de la morfología del río Andalién con la aplicación de la metodología de agregación y desagregación espacial. Se extraen los DGO (canal activo, llanura de inundación y unidades geomórficas), se obtienen las características geomorfológicas a lo largo del río, las cuales son ancho canal activo, ancho llanura de inundación, confinamiento y su causa, forma en planta (*planform*) del río, sinuosidad, pendiente, área captante y potencia de corriente. Se realiza la clasificación con el Marco *River Styles*, obteniendo 12 estilos de ríos. También, se muestran los resultados obtenidos del análisis dinámico, del cual se obtuvo un historial del río Andalién en la parte baja de la cuenca entre los años 1945 y 2020. Se realiza un análisis de la migración que ha tenido el río a partir de las líneas centrales de los canales activos de los años en estudio y del cálculo de las tasas de migración. Se muestran los resultados del análisis del cambio en el uso de la tierra de la cuenca y como ha influido en la migración lateral del río Andalién.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la herramienta *South Rivers Toolbox* en QGIS y la aplicación de la metodología de desagregación y agregación de objetos geográficos se pudo realizar una extracción semiautomática de todas las características geomorfológicas a lo largo del río para realizar un análisis estático de morfología fluvial. Para esto se utilizaron series de tiempo de imágenes satelitales y datos altimétricos (tres modelos de elevación digital). Las características extraídas fueron el canal activo, unidades geomórficas (barras medias, barras laterales, islas, humedal y lagunas), llanura de inundación, sinuosidad a lo largo del río, el grado y causa de confinamiento, los tipos de forma en planta que se encuentran en el canal activo, la pendiente, área de captación y potencia de corriente específica.

Se realizó la calibración y validación de los parámetros con imágenes satelitales de diferentes resoluciones espaciales, fotografías aéreas del evento de precipitaciones extremas del 2006, fotografías del material del lecho, tres modelos de elevación digital y delimitaciones de la llanura de inundación en la parte baja, realizadas por otros autores. Debido a la pandemia por el COVID-19 no se pudieron realizar las visitas a terreno planificadas para calibrar y validar los parámetros.

Con respecto a los resultados obtenidos de los estilos fluviales, se obtuvieron 12 a lo largo del río. Estos, se agrupan en tres zonas marcadas por diferentes características geomorfológicas. La zona alta se caracteriza por ser confinada por *planform*, río sinuoso, baja frecuencia de barras, alta pendiente y un alto valor de potencia de corriente específica, que significa una gran capacidad de arrastre de sedimentos. La zona media se encuentra parcialmente confinada y no confinada, donde la causa de confinamiento es por infraestructura, el valor de la potencia de corriente específica disminuye por lo que se produce una deposición de sedimento que se ve reflejado en la presencia de barras. La zona baja no se encuentra confinada, el ancho de su llanura de inundación alcanza el kilómetro, la pendiente se hace casi cero promoviendo una mayor deposición de sedimentos, lo cual se ve reflejado en la gran isla que se acerca a la desembocadura.

Respecto a los resultados del desarrollo del análisis multitemporal sobre la evolución de la morfología de la cuenca del río Andalién, se obtiene un historial del río en la parte baja de la cuenca entre los años 1945 y 2020 utilizando imágenes históricas georreferenciadas, pudiendo entender como se ha comportado el río a lo largo de los años. La morfología del río Andalién ha variado durante los años

por efecto combinado de la intervención antrópica y el cambio en el uso de la tierra. En 1945 el río migraba dentro de su llanura de inundación sin dificultad y con el paso de los años se ha ido confinando producto de la urbanización cerca de sus riberas y llanura de inundación. En el año 2020, el río se encuentra canalizado en la parte baja y confinado en la parte media producto de la urbanización.

Se concluye que los periodos dónde las tasas de migración fueron mayores fue en los periodos 1945-1955 y 2010-2020, lo cual está directamente relacionado a la alta intervención antrópica y la no correcta planificación y gestión del cauce a medida que la zona urbana se empezó a expandir hacia el río Andalién, lo cual provocó que la Dirección de Obras Hidráulicas tuviera que tomar la decisión de canalizar completamente la parte baja del río Andalién para evitar que se produzcan inundaciones catastróficas como la ocurrida en el año 2006.

Finalmente, se cumplen los objetivos pudiendo evaluar los procesos de ajuste y evolución morfológica de la cuenca del río Andalién, ante cambios en el uso de la tierra y la intervención antrópica. Este es el primer estudio dónde se realiza un análisis integral a nivel de cuenca en el río Andalién. A futuro la Dirección de Obras Hidráulicas, como ente público responsable, contar con una base cartográfica de apoyo para tener una mejor planificación y gestión del corredor fluvial de esta importante red fluvial, pudiendo proyectar o emplazar nuevas obras hidráulicas en un plan de adaptación al cambio climático.

Los ríos están en un constante cambio morfológico producto de la variabilidad climática y la expansión urbana en zonas próximas a los corredores fluviales.

## REFERENCIAS

- Alber, A., y Piégay, H. (2011). Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 343-360.
- Álvez, A., Espinosa, P., Castillo, R., Iglesias, K., & Bañales-Seguel, C. (2022). An Urgent Dialogue between Urban Design and Regulatory Framework for Urban Rivers: The Case of the Andalién River in Chile. *Water*, 14(21), 3444.
- ARRAU INGENIERIA E.I.R.L. (2011). *Estudio de factibilidad y diseño definitivo de las obras de regulación y retención de sedimentos en río Andalién, región del Biobío*. Consultores de Ingeniería Hidráulica y de riego.
- Bailly, P. J., Kinzel, T. A., Feurer, D., y Le Coarer, Y. (2012). 7 Airborne LiDAR Methods Applied to Riverine Environments. *Fluvial remote sensing for science and management*, 141.
- Bizzi, S., Blamauer, B., Braca, G., Bussetini, M., Camenen, B., Comiti, F. y Gurnell, A. M. (2014). *Thematic annexes of the multi-scale hierarchical framework deliverable 2.1 part 2* (Doctoral dissertation, irstea).
- Brierley, G., y Fryirs, K. (2005). *Geomorphology and river management: applications of the river style framework*. Blackwell publishing.
- Brierley, G., Fryirs, K., Marcal, M., y Lima, R. (2019). The use of the River Styles Framework as a tool to 'work with nature' in managing rivers in Brazil: examples from the Macaé Catchment.
- Brierley, G. J., y Fryirs, K. (2000). River styles, a geomorphic approach to catchment characterization: Implications for river rehabilitation in Bega catchment, New South Wales, Australia. *Environmental Management*, 25(6), 661-679.

- Center for agriculture, Food, and the Environment (2014). Stream Power (and River Sensitivity Coarse Screening). University of Massachusetts. EEUU. Recuperado de: [https://extension.umass.edu/riversmart/sites/extension.umass.edu.riversmart/files/fact-sheets/pdf/Task\\_Force\\_StreamPower.pdf](https://extension.umass.edu/riversmart/sites/extension.umass.edu.riversmart/files/fact-sheets/pdf/Task_Force_StreamPower.pdf)
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial* (No. 526.982 C564 1996). Ediciones Rialp.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2021). *Observatorio Georreferenciado*. Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile Recuperado de: <https://snia.mop.gob.cl/observatorio/>
- Gartner, J. (2016). Stream power: Origins, geomorphic applications, and GIS procedures.
- Gilbert, J. T., Macfarlane, W. W., y Wheaton, J. M. (2016). The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks. *Computers & Geosciences*, 97, 1-14.
- Hubert, P. (2000). The segmentation procedure as a tool for discrete modeling of hydrometeorological regimes. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 14(4), 297-304.
- Intergovernmental panel of climate change (IPCC) (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.
- Jaque, E. (2008). Geomorfología de la cuenca del río Andalién, Chile. *Revista Geográfica*, 97-116.
- Link, O., Brox-Escudero, L. M., González, J., Aguayo, M., Torrejón, F., Montalva, G., & Eguibar-Galán, M. Á. (2019). A paleo-hydro-geomorphological perspective on urban flood risk assessment. *Hydrological Processes*, 33(25), 3169-3183.

- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Miller, J., Kim, H., Kjeldsen, T., Packman, J., Grebby, S., y Deraden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of hidrology*, 59-70.
- Nardini, A., y Brierley, G. (2021). Automatic river planform identification by a logical-heuristic algorithm. *Geomorphology*, 375, 107558.
- Nardini, A., Yépez, S., y Bejarano, M. D. (2020). A Computer Aided Approach for River Styles— Inspired Characterization of Large Basins: A Structured Procedure and Support Tools. *Geosciences*, 10(6), 231.
- Nardini, A., Yépez, S., Mazzorana, B., Ulloa, H., Bejarano, M. D., y Laraque, A. (2020). A Systematic, Automated Approach for River Segmentation Tested on the Magdalena River (Colombia) and the Baker River (Chile). *Water*, 12(10), 2827.
- Nardini, A., Yépez, S., y Rogeliz, C. (2019). Caracterización geomorfológica river styles en la Cuenca del rio Magdalena: Caso estudio Magdalena y caja de herramientas para la aplicación automatizada a la cuenca. *GeoMagda ToolBox*.
- Nardini, A., Yépez, S., Zuniga, L., Gualtieri, C., y Bejarano, M. (2020). A computer aided approach for River Style-Inspired characterization of large basins: The Magdalena river (Colombia). *Water*, 1147.
- Peña, E.; Rodríguez R.; Acuña E. y Lictevoud, E. (2017). *Diagnóstico y evaluación de efectos ambientales causados por incendios forestales en la comuna de Florida*. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

- Piégay, H., Arnaud, F., Belletti, B., Bertrand, M., Bizzi, S., Carbonneau, P., Dufour, S., Liebault, F., Ruiz-Villanueva, V., y Slater, L. (2020). Remotely sensed rivers in the Anthropocene: State of the art and prospects. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(1), 157-188.
- Rojas, O. (2015). *Cambios ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile* (Tesis de doctorado en ciencias ambientales). Universidad de Concepción. Concepción, Chile
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J., y Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geograficos. *Revista de geografía Norte Grande*, 177-192.
- Rojas, O., Mardones, M., Rojas, C., y Martinez, C. (2016). Desastres por inundaciones fluviales en un área de expansión urbana: curso inferior de la cuenca del río Andalién Chile-Central (1943-2011). *III Congresso da Sociedade de Análise de Risco Latino Americana SRA-LA, 10 e 13 de maio de 2016, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.*, 1-7.
- Roux, C., Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L., y Piégay, H. (2015). “FluvialCorridor”: a new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology*, 29-37.
- Sechu, G. L., Nilsson, B., Iversen, B. V., Greve, M. B., Børgesen, C. D., y Greve, M. H. (2020). A stepwise GIS approach for the delineation of river valley bottom within drainage basins using a cost distance accumulation analysis. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-20.
- Secretaria Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo (SEREMI MINVU) (2012). Imágenes digitales y cartografía base para el área Metropolitana de Concepción. Región del Biobío, Chile. Recuperado de: [http://geo.minvu.cl/arcgis/rest/services/Vialidad/08\\_PRC\\_Vialidad\\_Biobio/MapServer/10](http://geo.minvu.cl/arcgis/rest/services/Vialidad/08_PRC_Vialidad_Biobio/MapServer/10)
- Vidal, C., & Romero Aravena, H. (2010). Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Bío-bío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción.

- Basnayaka, V., Samarasinghe, J. T., Gunathilake, M. B., Muttill, N., Hettiarachchi, D. C., Abeynayaka, A., & Rathnayake, U. (2022). Analysis of Meandering River Morphodynamics Using Satellite Remote Sensing Data—An Application in the Lower Deduru Oya (River), Sri Lanka. *Land*, 11(7), 1091.
- Wheaton, J. M., Fryirs, K. A., Brierley, G., Bangen, S. G., Bouwes, N., y O'Brien, G. (2015). Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms. *Geomorphology*, 248, 273-295.



## ANEXO 3.1 SOUTH RIVERS TOOLBOX: MODELO PREDICTOR DE LA MORFODINAMICA FLUVIAL

*South Rivers Toolbox* (SRT) es un complemento de QGIS desarrollado por el proyecto Innova Chile CORFO para Bienes públicos de adaptación al cambio climático, SOUTH RIVERS TOOLBOX: modelo predictor de la morfodinámica fluvial. Esta herramienta permite extraer las características geomorfológicas en ríos nacionales como a nivel mundial y los resultados obtenidos permiten realizar un análisis sobre el comportamiento y carácter del río. Esta herramienta es de fácil acceso y puede ser descargada de la página web: <https://vosores.github.io/SouthRiversToolbox/web/plugins.xml> y ejecutada en las versiones 3.5 a 3.10 de QGIS.

Esta herramienta está en proceso de desarrollo y los módulos con las herramientas que posee se muestran en la Figura A3.1.

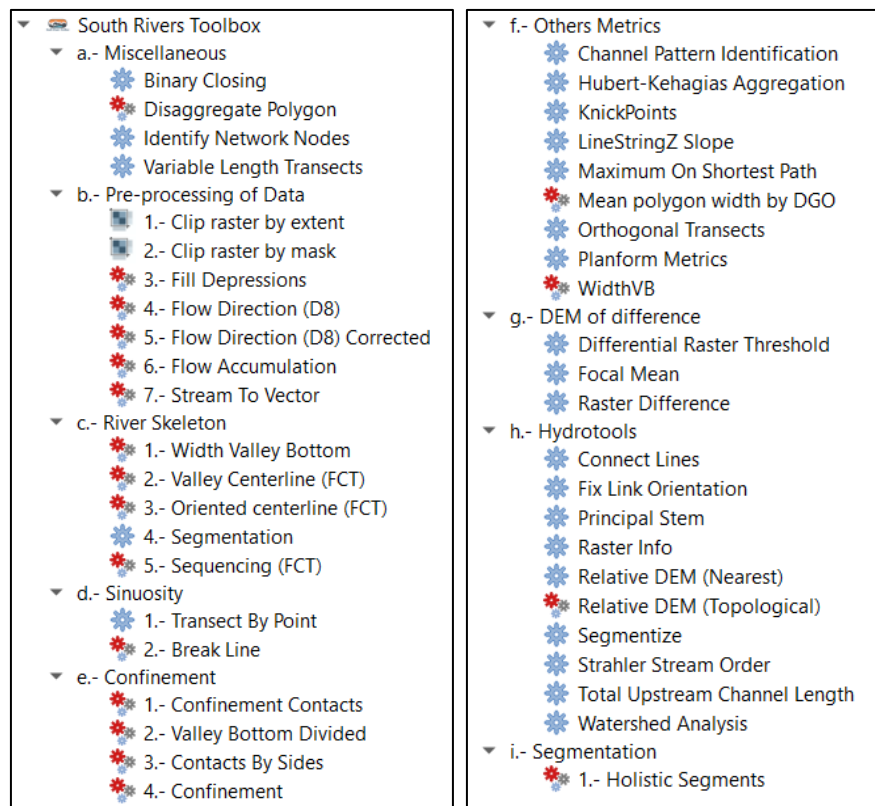


Figura A3.1 Módulos y herramienta del South Rivers Toolbox

Para la caracterización del río Andalién se utilizaron las herramientas del SRT, complementando con otras herramientas. La Figura A3.2 muestra las herramientas utilizadas y en que etapas de metodología de desagregación y agregación de objetos geográficos. Los datos obtenidos del SRT siempre se deben validar con datos y métricas reales de la zona de estudio para así obtener mejores resultados.

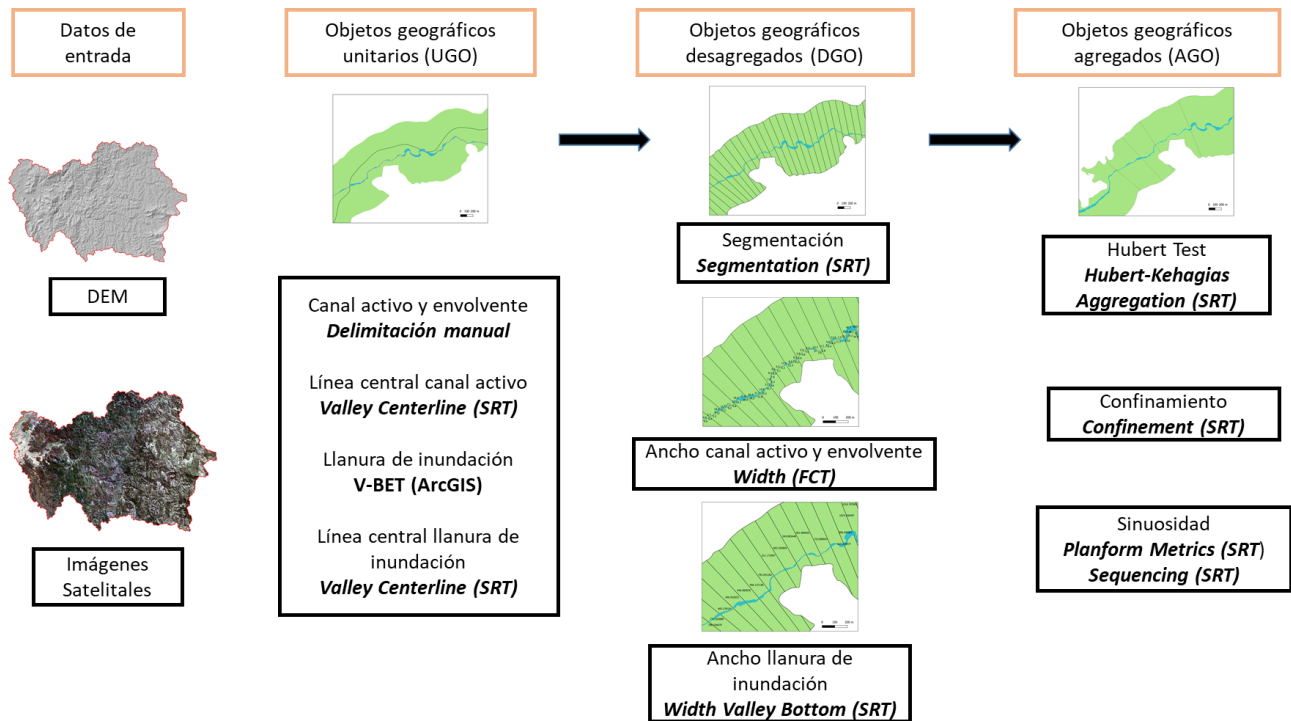


Figura A3.2 Esquema de las principales herramientas del SRT utilizadas en la caracterización del río Andalién

Entre los módulos del SRT se encuentra el de *Pre-Processing of Data*, el cual permite extraer información de la cuenca, es decir, se obtienen las direcciones de flujo, flujo acumulado, corrección del DEM y la red hídrica. Estos datos permiten realizar un análisis hidrológico de la cuenca.

Los módulos *River Skelton*, *Sinuosity*, *Confinement* y *Other Metrics* son los que permiten extraer las características geomorfológicas del río.

## ANEXO 3.2 CÓDIGOS DE LA CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS ESTILOS DE RÍOS

La Tabla A3.1 y A3.2 muestran las características geomorfológicas primarias (confinamiento, causa de confinamiento, forma en planta y material del lecho) y secundarias (humedales, barras laterales, barras medias e islas) clasificadas por códigos numéricos para aplicar la herramienta Agrupamiento en ArcGIS y así clasificar los estilos de ríos. A continuación, se muestran los códigos de clasificación.

- Confinamiento: 0: no confinado, 1: parcialmente confinado, 2: confinado
- Causa de confinamiento: 0: ninguna, 1: confinado por *planform* y 2: confinado por infraestructura
- Forma en planta: 0: monocanal rectilíneo, 1: monocanal de baja sinuosidad, 2: monocanal sinuoso, 3: monocanal de sinuosidad confinada, 4: transición con barras alternas, 5: transición *wandering* (errante) y 6: multicanal con trenzado por islas
- Material del lecho: 7: fino
- Humedales: 0: ausencia y 1: presencia
- Barras laterales: 0: ausencia y 1: presencia
- Barras medias: 0: ausencia y 1: presencia
- Islas: 0: ausencia y 1: presencia

Tabla A3.1 Códigos de las características geomorfológicas

Tramo	Longitud (m)	Confinamiento	Causa del confinamiento	Forma en planta	Material del lecho	Humedales	Barras laterales	Barras medias	Islas
T1	358	1	1	1	7	0	0	0	0
T2	325	2	1	3	7	0	0	0	0
T3	1731	2	1	3	7	0	1	0	0
T4	1703	1	1	5	7	0	1	0	0
T5	473	1	1	0	7	0	1	0	1
T6	308	2	1	3	7	0	1	0	1
T7	593	1	1	1	7	0	0	0	0
T8	576	2	1	3	7	0	0	0	0
T9	301	2	1	3	7	0	1	0	0
T10	295	2	1	3	7	0	1	0	0
T11	433	1	1	1	7	0	0	0	0
T12	2314	2	1	3	7	0	1	0	1
T13	836	2	1	3	7	0	0	0	0
T14	719	1	1	1	7	0	0	0	0
T15	563	2	1	3	7	0	1	0	0
T16	574	2	1	3	7	0	0	0	0
T17	479	2	1	3	7	0	0	0	0
T18	722	2	1	3	7	0	1	0	0
T19	398	2	1	3	7	0	1	0	0
T20	391	1	1	0	7	0	0	0	0
T21	581	1	1	1	7	0	1	0	0
T22	838	2	1	3	7	0	0	0	0
T23	512	1	1	1	7	0	0	0	0
T24	767	1	1	5	7	0	1	1	0
T25	325	0	0	1	7	0	0	0	0
T26	368	0	0	5	7	0	1	0	0
T27	372	1	1	1	7	0	1	0	0
T28	2097	0	0	0	7	0	1	1	0
T29	753	0	0	1	7	0	0	0	0
T30	543	0	0	0	7	0	0	0	0
T31	935	1	1	1	7	0	0	0	0
T32	220	1	1	0	7	0	1	0	0
T33	355	0	0	1	7	0	1	0	0

Tabla A3.2 Códigos de las características geomorfológicas (Continuación)

Tramo	Longitud (m)	Confinamiento	Causa de confinamiento	Forma en planta	Material del lecho	Humedales	Barras laterales	Barras medias	Islas
T34	344	0	0	0	7	0	1	1	0
T35	309	0	0	1	7	0	1	0	0
T36	827	0	0	5	7	0	1	1	0
T37	406	1	3	1	7	0	1	0	0
T38	1601	0	0	5	7	0	1	0	0
T39	657	0	0	1	7	0	1	0	0
T40	334	0	0	5	7	0	1	0	0
T41	453	0	0	0	7	0	1	1	0
T42	1127	0	0	5	7	0	1	1	0
T43	1351	0	0	4	7	0	1	1	1
T44	761	0	0	6	7	0	1	0	1
T45	1229	0	0	1	7	0	1	1	1
T46	1942	0	0	4	7	0	1	0	1
T47	615	1	3	0	7	0	1	1	1
T48	1047	2	3	4	7	0	1	1	1
T49	679	0	0	5	7	0	1	0	0
T50	1007	1	3	1	7	0	1	1	0
T51	914	0	0	0	7	0	1	0	0
T52	675	0	0	1	7	0	1	0	0
T53	319	0	0	0	7	0	1	0	0
T54	1061	0	0	4	7	1	1	1	1
T55	1288	0	0	6	7	1	1	0	1
T56	919	0	0	0	7	1	0	0	0

## ANEXO 4.1 CORRECCIÓN ALTIMÉTRICA DEL TanDEM-X

Debido a que el DEM LIDAR no abarca el 100 % de la zona del río Andalién es necesario combinar los datos altimétricos con el TanDEM-X. Como estos dos DEMs tienen diferentes resoluciones y son captados por diferentes sensores remotos es necesario aplicarle una corrección ortométrica. El TanDEM-X se compone por elevaciones elipsoidales, las cuales son transformadas en elevaciones ortométricas restandoles la ondulación geoidal. La altura geoidal correspondiente a las coordenadas del río Andalién es aproximadamente 20.69 metros y esta altura es restada a las elevaciones del DEM.

La Figura A4.1 muestra un gráfico con las diferencias de elevaciones del TanDEM-X y DEM LIDAR, antes y después de la corrección altimétrica. Las elevaciones en color gris corresponden a las elevaciones del TanDEM-X sin corrección y en color amarillo se muestra la combinación de las elevaciones del DEM LIDAR hasta el km 9 y el TanDEM-X original. Luego de la corrección ortométrica, se obtiene como resultado la línea azul pero aun así se produce una diferencia de altura de 7.9 metros. Esta diferencia se debe a que el DEM LIDAR no posee la interferencia de elevaciones por árboles y edificios a diferencia del TanDEM-X, afectado por una diferencia de 7.9 metros, la cual se asocia a por la interferencia de árboles en la parte alta del río. Las elevaciones corregidas se muestran en color naranja.

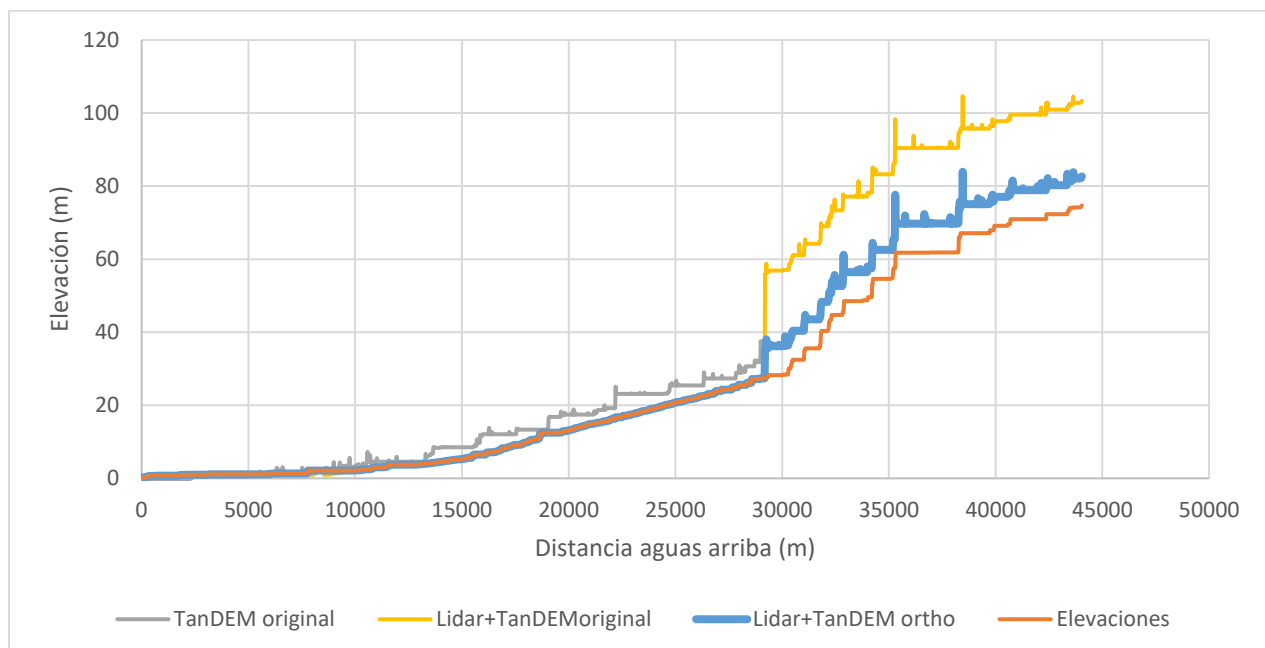


Figura A4.1 Elevaciones del río aplicando corrección altimétrica

## ANEXO 4.2 MÉTRICAS DE LOS ESTILOS DE RÍOS

La Tabla A4.1 y A4.2 muestran los estilos de ríos y sus métricas, información que permite realizar un análisis del comportamiento del río.

**Tabla 4.1 Estilo de río (*River Styles*) de cada tramo y sus atributos más relevantes para la clasificación.**

Tramo	RS princ	RS completo	Distancia (km)	Confinamiento	Causa confinamiento	Planform	Material del lecho	Humedal	Barras laterales	Barras medias	Islas
T1	RS-1	RS-1-1	358	Parcialmente confinado	Planform	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T2	RS-2	RS-2-1	683	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T3	RS-2	RS-2-2	2414	Confinado	Planform	Sinuosidad confinada	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T4	RS-3	RS-3-1	4117	Parcialmente confinado	Planform	Barras alternas	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T5	RS-4	RS-4-1	4590	Parcialmente confinado	Planform	Rectilíneo	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Presente
T6	RS-2	RS-2-3	4898	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Presente
T7	RS-1	RS-1-1	5491	Parcialmente confinado	Planform	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T8	RS-2	RS-2-1	6067	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T9	RS-2	RS-2-2	6368	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T10	RS-2	RS-2-2	6663	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T11	RS-1	RS-1-1	7096	Parcialmente confinado	Planform	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T12	RS-2	RS-2-3	9410	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Presente
T13	RS-2	RS-2-1	10246	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T14	RS-1	RS-1-1	10965	Parcialmente confinado	Planform	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T15	RS-2	RS-2-2	11528	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T16	RS-2	RS-2-1	12102	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T17	RS-2	RS-2-1	12581	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T18	RS-2	RS-2-2	13303	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T19	RS-2	RS-2-2	13701	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T20	RS-4	RS-4-2	14092	Parcialmente confinado	Planform	Rectilíneo	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T21	RS-1	RS-1-2	14673	Parcialmente confinado	Planform	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T22	RS-2	RS-2-1	15511	Confinado	Planform	Sinuosidad restringida	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T23	RS-1	RS-1-1	16023	Parcialmente confinado	Planform	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T24	RS-3	RS-3-2	16790	Parcialmente confinado	Planform	Barras alternas	Fino	Ausente	Presente	Presente	Ausente
T25	RS-5	RS-5-1	17115	No confinado	-	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T26	RS-6	RS-6-1	17483	No confinado	-	Barras alternas	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente

T27	RS-1	RS-1-2	17855	Parcialmente confinado	Planform	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T28	RS-7	RS-7-1	19952	No confinado	-	Rectilíneo	Fino	Ausente	Presente	Presente	Ausente
T29	RS-5	RS-5-1	20705	No confinado	-	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T30	RS-7	RS-7-2	21248	No confinado	-	Rectilíneo	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T31	RS-1	RS-1-1	22183	Parcialmente confinado	Planform	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
T32	RS-2	RS-2-2	22403	Parcialmente confinado	Planform	Rectilíneo	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente

**Tabla 4.2 Estilo de río (*River Styles*) de cada tramo y sus atributos más relevantes para la clasificación.**

(continuación)

Tramo	RS princ	RS completo	Distancia (km)	Confinamiento	Causa confinamiento	Planform	Material del lecho	Humedal	Barras laterales	Barras medias	Islas
T33	RS-5	RS-5-2	22758	No confinado	-	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T34	RS-7	RS-7-1	23102	No confinado	-	Rectilíneo	Fino	Ausente	Presente	Presente	Ausente
T35	RS-5	RS-5-2	23411	No confinado	-	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T36	RS-6	RS-6-2	24238	No confinado	-	Barras alternas	Fino	Ausente	Presente	Presente	Ausente
T37	RS-8	RS-8-1	24644	Parcialmente confinado	Infraestructura	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T38	RS-6	RS-6-1	26245	No confinado	-	Barras alternas	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T39	RS-5	RS-5-2	26902	No confinado	-	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T40	RS-6	RS-6-1	27236	No confinado	-	Barras alternas	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T41	RS-7	RS-7-1	27689	No confinado	-	Rectilíneo	Fino	Ausente	Presente	Presente	Ausente
T42	RS-6	RS-6-2	28816	No confinado	-	Barras alternas	Fino	Ausente	Presente	Presente	Ausente
T43	RS-9	RS-9-1	30167	No confinado	-	Wandering	Fino	Ausente	Presente	Presente	Presente
T44	RS-10	RS-10-1	30928	No confinado	-	Trenzado por islas	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Presente
T45	RS-5	RS-5-3	32157	No confinado	-	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Presente	Presente	Presente
T46	RS-9	RS-9-2	34099	No confinado	-	Wandering	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Presente
T47	RS-11	RS-11-1	34714	Parcialmente confinado	Infraestructura	Rectilíneo	Fino	Ausente	Presente	Presente	Presente
T48	RS-12	RS-12-1	35761	Confinado	Infraestructura	Wandering	Fino	Ausente	Presente	Presente	Presente
T49	RS-6	RS-6-1	36440	No confinado	-	Barras alternas	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T50	RS-8	RS-8-2	37447	Parcialmente confinado	Infraestructura	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Presente	Presente	Ausente
T51	RS-7	RS-7-3	38361	No confinado	-	Rectilíneo	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T52	RS-5	RS-5-2	39036	No confinado	-	Baja sinuosidad	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T53	RS-7	RS-7-3	39355	No confinado	-	Rectilíneo	Fino	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
T54	RS-9	RS-9-3	40416	No confinado	-	Wandering	Fino	Presente	Presente	Presente	Presente
T55	RS-10	RS-10-2	41704	No confinado	-	Trenzado por islas	Fino	Presente	Presente	Ausente	Presente
T56	RS-7	RS-7-4	42623	No confinado	-	Rectilíneo	Fino	Presente	Ausente	Ausente	Ausente



