



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
GEOLOGÍA

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LOS CAMBIOS EN
EL CORREDOR FLUVIAL DEL RÍO LAJA, USANDO EL
SOFTWARE “SOUTH RIVERS TOOLBOX”, CON
IMPACTO EN UNA EXTRACCIÓN SUSTENTABLE DE
ÁRIDOS.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Joaquín Santiago Espinoza Sandoval

Profesor Guía: Dr. Germán Enrique Velásquez Acosta

Profesor Co-Guía: Dr. Santiago Paul Yépez Figueroa

Profesor Comisión: Dr. Joaquín Alejandro Cortés Aranda

Concepción, 2024

DEDICATORIA

Dedicado a mi familia, mis abuelos y mis padres por educarme y llenarme de valores y amor que me han llevado a ser la persona que soy. A mis hermanas que les espera un futuro maravilloso y lleno de éxitos. A mi polola por ser mi refugio y mi lugar seguro todos estos años. A mis amigos de la vida y a los que he tenido la suerte de conocer en esta hermosa etapa por los imborrables recuerdos que me dejan.

Me llevo en el corazón el valioso aprendizaje que me han inspirado cada uno de ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Esta memoria fue auspiciada por el Instituto de Geología Económica Aplicada, en colaboración con la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. Las series temporales de imágenes satelitales de alta resolución espacial, de “nanosatélites *Planet*”, utilizadas para la realización de esta memoria fueron obtenidas a partir del convenio con empresa *Planet* y Facultad de Ciencias Forestales. El acceso al “*South Rivers Toolbox*” (SRT) fue gracias a su diseño como una extensión empaquetada de *software* libre para QGIS.

Extiendo mis agradecimientos a los profesores guía y co-guía de este trabajo, al profesor Dr. Germán Velásquez, por su buena disposición desde un principio permitiendo transformar mi idea inicial en un proyecto significativo, por su constante apoyo y orientación, que se tradujo en reuniones semanales y una motivación continua que me mantuvo proactivo a lo largo de todo el trabajo; y al profesor Dr. Santiago Yépez, por darme la oportunidad y confianza de participar en este proyecto, su disposición y tiempo dedicado me permitieron trabajar muy cómodamente, y por su constante voluntad a abrir las puertas de su oficina cada vez que necesitaba orientación o tenía dudas. El éxito de este trabajo ha sido fundamental gracias a su apoyo, y estoy profundamente agradecido por la oportunidad de aprender y crecer bajo su dirección.

Por último, quisiera agradecer a los miembros del Depto. de Ciencias de la Tierra, académicos, funcionarios y compañeros, por transmitir un ambiente grato e inspirador para el aprendizaje, como también para la distensión y el compartir, ya sea en el aula o en terreno. En especial, agradezco a mis amigos de la carrera y ahora de la vida, por tantas tardes y noches de estudios, de juntas y viajes, con los que transitamos juntos estos bellos años.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Gestión del Agua y Cauces.....	1
1.2. Recursos Hídricos y Extracción de Áridos.....	3
1.3. Planteamiento del Problema	3
1.3.1. Requerimiento de Materia Prima.....	4
1.4. Hipótesis	5
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos	5
1.6. Caso de Estudio	6
1.6.1. Clima	7
1.6.2. Geología.....	7
1.1. Desarrollo del Estudio	8
1.2. Estudios Anteriores.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. Conceptos sobre Geomorfología Fluvial.....	10
2.1.1. Corredor Fluvial	12
2.2. Marco de Desagregación y Agregación del Corredor Fluvial.....	12
2.3. Marco <i>River Styles</i>	15
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Datos de Entrada: Imágenes Satelitales.....	17
3.2. Procesamiento de Imágenes Satelitales	17
3.2.1. Extracción del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).....	18
3.3. Extracción de Métricas Fluviales: Marco de Desagregación y Agregación.....	19
3.3.1. Objetos Geográficos Unitarios (UGO).....	19
3.3.2. Objetos Geográficos Desagregados (DGO)	21
3.3.3. Métricas a Escala Local.....	21
3.3.4. Objetos Geográficos Agregados (AGO).....	28
3.4. Marco <i>River Styles</i>	29
3.4.1. Algoritmo de Clasificación.....	32

4. RESULTADOS	33
4.1. Procesamiento de Imágenes Satelitales y Obtención de Objetos Geográficos Unitarios (UGO).....	33
4.2. Objetos Geográficos Desagregados (DGO): Segmentación.....	35
4.3. Métricas a Nivel de Cuenca.....	36
4.4. Métricas a Escala del Área de Estudio	40
4.4.1. Ancho de los DGO	40
4.4.2. Sinuosidad Local	41
4.4.3. Presencia y Evolución de las Unidades Geomórficas (UG).....	43
4.4.4. Determinación de la Tasa de Migración Lateral Anual.....	45
4.5. Objetos Geográficos Agregados (AGO) y Clasificación <i>River Styles</i>	49
5. DISCUSIÓN	56
5.1. Delimitación de los Objetos Geográficos Unitarios (UGO).....	56
5.2. Limitaciones de la Extracción de la Tasa de Migración Lateral Anual.....	57
5.3. Temporal e Inundaciones del Año 2023.....	58
5.4. Propuesta de las Zonas Prospectos para la Extracción	60
5.5. Identificación de las Zonas Sensibles a la Extracción.....	63
5.6. Comparación con las Zonas de Extracción Actual.....	65
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
REFERENCIAS	71
ANEXOS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. 1: Mapa del área de estudio.....	6
Fig. 1. 2: Promedio mensual de precipitaciones con datos extraídos de CR2MET para la estación fluviométrica del Río Rucue.....	7
Fig. 2. 1: Definición y esquema con las principales características geomorfológicas de un sistema fluvial.....	11
Fig. 2. 2: Metodología de Agregación y Desagregación de UGO.....	13
Fig. 2. 3: Etapas del Marco River Styles	15
Fig. 2. 4: Árbol procedimental marco River Styles modificado de Fryirs & Brierley (2018)	16
Fig. 3. 1: Comparación entre imagen satelital Planet y capa de extracción de índice NDWI.....	19
Fig. 3. 2: Flujo de trabajo para la extracción de la línea central de cada uno de los UGO	21
Fig. 3. 3: Esquema para el cálculo de la sinuosidad	23
Fig. 3. 4: Sección media del río Laja, a partir de la cual se extrajo la migración lateral entre los periodos 2018 y 2023	27
Fig. 3. 5: Flujo de trabajo para la extracción de la tasa de migración lateral anual	28
Fig. 4. 1: Imágenes satelitales de una misma sección del río Laja.....	34
Fig. 4. 2: Imagen satelital de Sentinel-2 capturada el año 2018 que muestra la llanura de inundación discretizada en 791 segmentos de 100 metros de longitud.....	36
Fig. 4. 3: Gráfico que relaciona elevación, pendiente y área de drenaje con la distancia aguas abajo del río Laja.....	37
Fig. 4. 4: Gráfico del stream power specific.....	39
Fig. 4. 5: Gráfico que muestra un comparativo entre el ancho de la llanura de inundación y el ancho del canal activo para el año 2013, 2018 y 2023.....	41
Fig. 4. 6: Gráfico con los distintos grados de sinuosidad a lo largo de todo el corredor fluvial en estudio, desde aguas altas a aguas bajas	42
Fig. 4. 7: Análisis multitemporal de la presencia de UG.....	45
Fig. 4. 8: Gráfico de barras que muestra la tasa de migración anual para el periodo 2013-2018 .	46
Fig. 4. 9: Gráfico de barras que muestra la tasa de migración anual para el periodo 2018-2023 .	48
Fig. 4. 10: Mapa de la cuenca con el confinamiento y su causa.....	50
Fig. 4. 11: Clasificación según tipos de forma en planta de todo el corredor fluvial	52
Fig. 4. 12: Mapa de agregados de material del lecho de la cuenca del río Laja	53
Fig. 4. 13: Mapa de la cuenca del Laja con tramos clasificados según estilos fluviales	55
Fig. 5. 1: Mapa del sector Saltos del Laja con marcadores I, II, III, IV que indican ubicación respectiva de las imágenes del sistema frontal del año 2023	59

Fig. 5. 2: Mapa del área de estudio y gráfico de TMA periodo 2018-2023 con las zonas de baja variación y zonas prospecto de mayor interés	61
Fig. 5. 3: Mapa del área de estudio y gráfico de TMA periodo 2018-2023 con las zonas de alta variación y zonas sensibles.....	64
Fig. 5. 4: Mapa del área de estudio que incluye zonas con extracción de áridos actual y gráfico de TMA periodo 2018-2023 con las zonas de baja variación	66
Fig. A. 1: Mapa geológico de la cuenca del río Laja. Basado del mapa 1:1.000.000 del Sernageomin (2003).....	74
Fig. A. 2: Mapa de la cuenca y tres ejemplos de perfiles transversales realizados en diferentes partes del corredor fluvial	75
Fig. A. 3: Imagen de la cuenca del río Laja con el polígono extraído de la llanura de inundación mediante la herramienta V-BET.....	76
Fig. A. 4: Mapa de la cuenca del río Laja con los 68 tramo homogéneos obtenidos para el corredor fluvial.....	77
Fig. A. 5: Mapa de agregados de unidades geomórficas	78
Fig. A. 6: Figura extraída de la DIA. EXTRACCIÓN MECANIZADA ÁRIDOS TRIBASA RCA N°107/ 1998, que exhibe la ubicación del proyecto de extracción	79
Fig. A. 7: Imagen satelital de Google Earth Pro con fecha 2/27/2020 y que muestra en un polígono rojo la zona donde se llevó a cabo la extracción de material	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1: Imágenes satelitales utilizadas, fecha de captura y resolución.....	17
Tabla 3. 2: Grado de sinuosidad	24
Tabla 3. 3: Tipo de forma en planta y sus características según arquetipo de río	25
Tabla 3. 4: Tamaño de las partículas de material del lecho.....	31

RESUMEN

La transformación de los ríos debido al cambio climático, eventos extremos y la intervención humana, junto con la explotación no regulada de áridos de los cauces, ha generado alteraciones significativas en la morfología y dinámica natural de los ríos. La urbanización, la deforestación y la falta de regulación en la extracción de áridos han llevado a la pérdida de autorregulación de los ríos, causando problemas ambientales a nivel global. La demanda masiva de áridos, esenciales para la construcción, plantea desafíos en la gestión sostenible de los recursos hídricos y destaca la necesidad de abordar estas problemáticas en el ámbito de la investigación y la sustentabilidad.

En este trabajo se realizó un análisis multitemporal, de manera retrospectiva, de una sección específica de 84,7 km del corredor fluvial del río Laja, región del Biobío, utilizando imágenes satelitales de alta resolución, de los años 2013, 2018 y 2023. El enfoque de análisis incluye la caracterización del *planform* y la clasificación de estilos fluviales en función de atributos hidromorfológicos medidos a escala de segmentos, mediante la utilización de herramientas SIG y especialmente del *software South Rivers Toolbox* para QGIS, basándose en los marcos teóricos de Desagregación y Agregación y *River Styles Framework*, los que permiten el procesamiento semi-automatizado de las métricas del corredor fluvial. En particular, se presenta un nuevo enfoque para la obtención de la tasa de migración lateral anual, esto con el objetivo específico de definir zonas prospectos para la extracción de áridos y, al mismo tiempo, identificar zonas sensibles a cambios morfodinámicos, donde la extracción no es recomendada.

Los resultados del análisis incluyen atributos a nivel de cuenca hidrográfica, como *stream power*, confinamiento y *planform*, así como atributos específicos del área de estudio, como ancho, sinuosidad y tasa de migración lateral. Estos atributos se utilizan para clasificar un total de 37 estilos fluviales a lo largo del corredor. Además, se identificaron 9 tramos sensibles a intervenciones, que en total suman 36,6 km y 9 tramos prospecto para la extracción con un total lineal de 48,1 km, de los cuales 5 son de mayor interés. Se destacan tanto el tramo prospecto con ventaja logística como el tramo con mayor estabilidad morfodinámica. Por último, se compara estos resultados con las zonas de extracción existente.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Gestión del Agua y Cauces

La cuenca hidrográfica, definida como el territorio drenado por un río y sus afluentes y que se encuentra delimitado por la línea de cumbres conocida como divisoria de aguas, es reconocida como la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos, sea ésta considerada de forma independiente o como parte de una red interconectada de cuencas (Dourojeanni et al., 2002). A pesar de las variaciones en enfoques y legislaciones de cada país, existe un interés generalizado en la importancia de utilizar las cuencas como nivel base para crear modelos de gestión del agua, controlar su uso adecuado y conservación desde perspectivas tanto productivas como medioambientales y de desarrollo local. Para ello, la óptima asignación del recurso resulta indispensable. De igual modo, existen regulaciones sobre los cuidados del caudal, su flujo y lecho, en particular cuando se requiera una intervención, como lo es la extracción de áridos. Todas estas miradas deben necesariamente poseer un enfoque integralmente sostenible del recurso, priorizando una colaboración y coordinación efectiva entre las instituciones involucradas, con criterios y protocolos de gestión aunados para realizar intervenciones en pro de la protección del recurso y sus cauces.

En Chile, el agua es regulada a través del “Código de Aguas” del año 1981, el cual establece su uso y cuidados, las normas de aprovechamiento, y el entorno en el cual ésta fluye por las diferentes cuencas a lo largo del territorio nacional, así como los derechos de aprovechamiento de aguas, otorgando a través de un acto administrativo, el dominio de su uso, goce y disposición. Según Melo & Vial (2005), la gestión de los recursos hídricos en el país presenta tres características esenciales:

- (1) el régimen de propiedad del agua garantiza a su dueño el uso y goce como cualquier otro bien susceptible de apropiación privada, es un bien principal y no accesorio a la tierra o industria por lo que se puede transferir libremente,
- (2) la aplicación de una economía de libre mercado, entregando a los privados la iniciativa en cuanto a la inversión y

(3) la concepción de un Estado subsidiario aplicando determinadas normativas sectoriales o cumpliendo un rol de apoyo mediante subsidios al agua potable, electricidad y al riego, por mencionar algunos casos.

En ese sentido, el Ministerio de Obras Públicas (MOP), con sus dependencias como la Dirección General de Aguas (DOH), la Dirección de Riego (DR), la Dirección de Planteamiento y el Departamento de Obras fluviales, corresponde al organismo encargado de velar por el uso correcto, administración y gestión de las aguas. Por su parte, la función de proteger y conservar el recurso hídrico es responsabilidad del Ministerio de Medio Ambiente (MMA), tarea que realiza a la par con el Ministerio de Economía a través de la Comisión Nacional de Riego (CNR), la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), y a otras agencias del gobierno como el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), Servicio de Salud, entre otros. Lo mencionado conlleva a una dispersión en las diferentes materias relacionadas con el agua y a una burocracia significativa al abordar problemas tanto de uso consuntivo como no consuntivo del recurso hídrico.

Dentro de los instrumentos que poseen estos organismos para el manejo y administración de las aguas, existen diversas normas, como la Ley N°19.300 de las Bases Generales del Medio Ambiente que otorga al MMA su rol de gestión del recurso del agua y regulación y control de cauces. De igual modo, existe el Decreto N°40 que aprueba el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), en específico los artículos N°155 a N°159, relacionados a cauces, para los respectivos Permisos Ambientales Sectoriales (PAS), los que son articulados y operativizados por la DGA y la DOH, que permiten realizar acciones en los cauces, pudiendo ser a modo de ejemplo, la de realizar modificaciones, obras o extracción de áridos. En ese sentido, una mirada integral hacia el cauce debe considerar la condición espacio temporal de la cuenca, junto a una mirada dinámica de las posibles variaciones que se observen, y el efecto que éstas pueden tener en los cambios de los flujos de agua.

1.2. Recursos Hídricos y Extracción de Áridos.

En Chile, la disponibilidad hídrica, definida como el caudal susceptible a otorgar mediante derechos de aprovechamiento, varía entre las distintas cuencas. La Macrozona Norte no cuenta con caudal disponible para el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento. Dicha tendencia se mantiene en gran parte de la Macrozona Central, aumentando la disponibilidad hacia el sur del país (DGA, 2016). Por consiguiente, desde una perspectiva del manejo del recurso hídrico, es relevante analizar las potenciales alteraciones del sistema fluvial que modifican los caudales en forma permanente o transitoria. Resulta evidente que obras como la extracción de áridos pueden tener un impacto considerable en los cauces y en el medio ambiente circundante, lo que exige una planificación y regulación cuidadosa para garantizar la sostenibilidad de este recurso esencial.

En esa línea de ideas, el MOP desempeña un papel clave en la gestión y regulación de proyectos hídricos y extracción de áridos en nuestro territorio, respaldado por la legislación que incluye los artículos N°155 al N°159 del Reglamento del SEIA, así como los artículos N°41, 66, 171 y 294 del Código de Aguas (Ley N°1.122) y el artículo N°11 de la Ley N°11.402. Estos artículos establecen la autoridad de la DGA para otorgar permisos de construcción de obras hidráulicas, modificaciones en cauces naturales o artificiales que puedan afectar la salud pública y a la propiedad, y para la extracción de ripio o arena de cauces en ríos o esteros. Por su parte, el MOP tiene la responsabilidad de autorizar, controlar, fiscalizar y emitir informes sobre la pertinencia de obras que afecten cauces y la extracción de áridos. Además, dependiendo del tipo de acción, pueden requerirse PAS basados en requisitos técnicos específicos, en los que la DGA o la DOH deben pronunciarse.

1.3. Planteamiento del Problema

En las últimas décadas, los ríos y sus cauces han experimentado transformaciones significativas tanto en su morfología como en su funcionamiento hidrológico. El aumento de las temperaturas globales, por influencia directa o indirecta del ser humano o eventos climáticos extremos, ha desencadenado efectos drásticos en los patrones de precipitación y en la fusión de glaciares, lo que ha resultado en variaciones en los caudales y en la frecuencia e intensidad de eventos tan extremos como inundaciones y sequías. Además, la urbanización acelerada y la expansión de actividades

humanas, como la deforestación y agricultura, han conducido a la alteración de los sistemas fluviales, con la construcción de represas, la canalización de ríos, la instalación de conjuntos habitacionales en las llanuras de inundación de sistemas fluviales y la eliminación de vegetación ribereña, por nombrar algunos. Estos cambios antropogénicos han tenido un impacto significativo en la capacidad de los ríos para autorregularse y mantener su dinámica natural, causando sedimentación excesiva en algunas zonas y alterando la configuración de los lechos fluviales y la distribución de los sedimentos en general.

Asimismo, la explotación de los cauces de los ríos y sus terrazas como fuentes de materiales granulares para áridos, con diferentes usos, es una práctica que carece de una regulación adecuada en la actualidad, lo que a menudo conlleva a realizarla de una manera perjudicial para el balance hídrico de los cauces. Este tipo de extracciones, sujetas normalmente a un ritmo de explotación discontinuo y muy condicionadas por aspectos tales como la accesibilidad y cercanía a los centros consumidores, han llegado a ser agresivas en algunos ríos y consecuentemente se ha convertido en uno de los principales factores que han configurado su morfología actual, fundamentalmente en aquellas áreas en las que la demanda de áridos ha sido elevada (García-Anquela et al., 1985).

Debemos considerar que la arena es el recurso natural más consumido en el mundo después del agua, y que ésta, al ser transportada como sedimento por el agua, por lo general se extrae de entornos acuáticos como ríos y costas (Rentier & Cammeraat, 2022). Esta enorme demanda de áridos, utilizado mayormente como material de construcción, ha provocado que la práctica de su extracción se haya convertido en un problema ambiental a nivel mundial (Asabonga et al., 2016).

1.3.1. Requerimiento de Materia Prima

La demanda de arena y material de construcción como los áridos, está creciendo a un ritmo desmesurado y se espera que el mundo quede sin este recurso para 2050 (Rentier & Cammeraat, 2022). Tan solo entre los años 1900 y 2010, la demanda mundial se multiplicó por 23 (Torres et al., 2017). Una de las problemáticas radica en que muchos países carecen de políticas de regulación para la extracción de arena, por lo que las empresas no cuentan con una estrategia o plan de manejo

adecuado y, en combinación con una alta demanda, da como resultado una minería indiscriminada e ilegal, que termina siendo dañina para el medio fluvial, considerando que incluso bajo circunstancias controladas, la práctica de extraer la arena del lecho y las orillas del río impacta el medio ambiente (Rentier & Cammeraat, 2022). Dentro de este panorama, un enfoque en la extracción sustentable de áridos desde ríos cobra relevancia. Esto ha servido como un catalizador en mi investigación, ya que creo firmemente que es esencial encontrar soluciones que permitan la extracción de áridos de manera responsable y sustentable con el medio ambiente, sin alterar el funcionamiento natural de los ríos ni comprometer su equilibrio hídrico.

1.4. Hipótesis

Es posible identificar secciones sensibles a cambios morfodinámicos a lo largo del corredor fluvial, pensando en una extracción sustentable de áridos, generando zonas prospecto con mayor potencial a acumular sedimentos, sin causar afectación del balance hídrico natural del río y definir zonas sensibles en las cuales no debería llevarse a cabo una actividad minera.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Caracterizar la morfodinámica y trayectorias del “*planform*” en una sección del río Laja.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Clasificar los estilos fluviales a partir del marco *River Styles* de forma semi-automatizada.
- Evaluar de manera retrospectiva los cambios en el *planform* del río en los últimos 10 años.
- Identificar las secciones del río sensibles al cambio morfodinámico y tasas de migración lateral anual.
- Generar zonas prospecto para la extracción sustentable de áridos.

1.6. Caso de Estudio

La cuenca del río Laja es una de las principales subcuencas del río Biobío situándose al norte de esta y siendo, además, su principal afluente; abarca una superficie de aproximadamente 4.667 km² (Pérez Soto, 2018), dividida en dos subcuencas: el de la Laguna del Laja en su sección superior, donde la cabecera correspondiente a la zona de drenaje de dicha laguna se encuentra emplazada en la cordillera Andina, al este del volcán Antuco; y la sección del río Laja, que luego de atravesar la depresión Central, su río principal, confluye en el río Biobío (González et al., 2003). El área de estudio se ubica dentro de la subcuenca inferior (Río Laja, Fig. 1.1), dentro de la región del Biobío y colindando al norte con la región del Ñuble, y corresponde a un tramo del *planform* del río comprendido entre las localidades de Tucapel y Laja, entre las latitudes 37°18'11,12"S y 37°10'6,98"S y las longitudes 71°58'5,35"O y 72°43'18,94"O, abarcando una extensión total de 84,7 km.

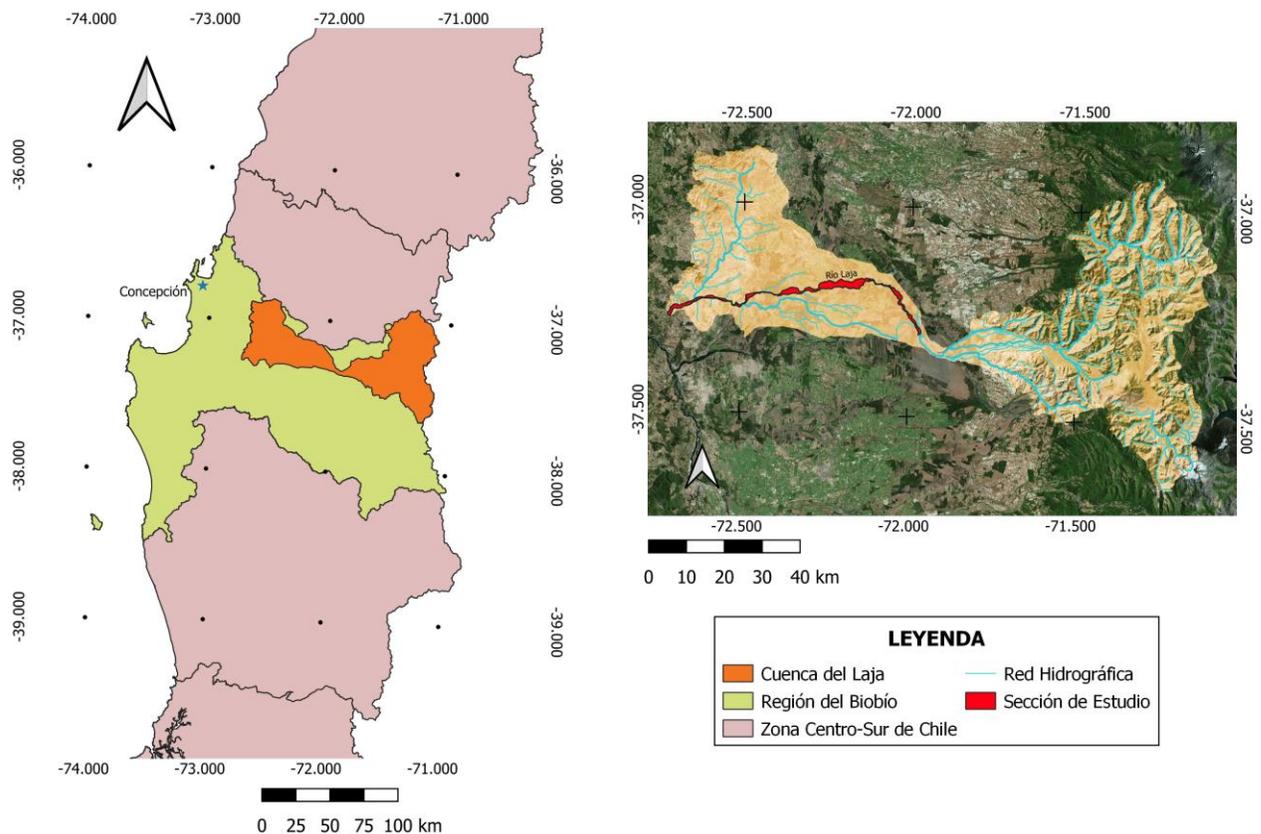


Fig. 1. 1: Mapa del área de estudio. En rojo se destaca el tramo del río a evaluar.

1.6.1. Clima

En general, el clima de la cuenca presenta características de transición entre los climas Mediterráneo y Templado Húmedo, donde las precipitaciones tienden a concentrarse entre los meses de mayo a agosto (DGA, 2004). En las zonas más altas, cerca de la naciente del río en la Laguna del Laja, la diferencia de temperaturas entre el día y la noche, así como entre las estaciones de invierno y verano, es mucho más acentuada en comparación a aguas abajo, donde el clima tiende a estabilizarse, con temperaturas que promedian los 23°C de máxima y los 9°C de mínima en verano, y entre los 11° y 0°C de máxima y mínima en invierno. Por su parte, las precipitaciones suelen superar los 2.000 mm anuales, intensificándose en los meses invernales como se observa en la Fig. 1.2, según datos obtenidos por el *Center of Climate and Resilience Research (CR2)*, en sus estaciones fluviométricas de Río Rucue (aguas arriba) y San Rosendo (aguas abajo).

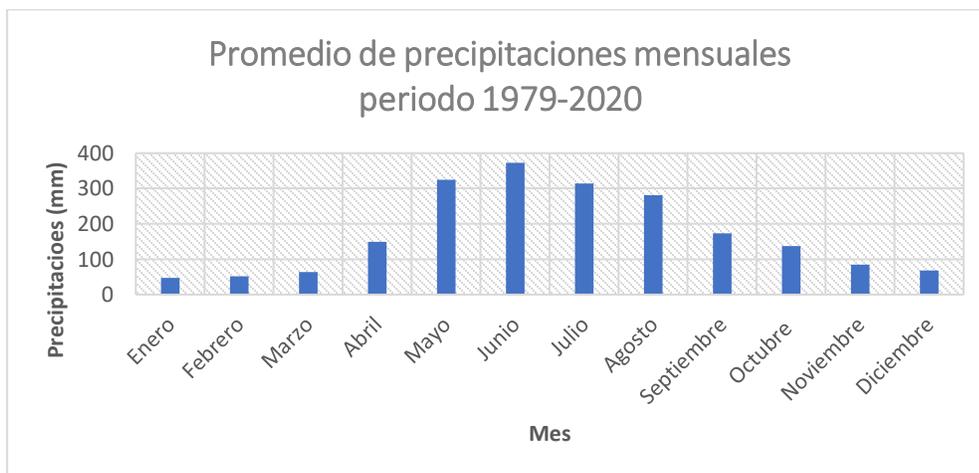


Fig. 1. 2: Promedio mensual de precipitaciones con datos extraídos de CR2MET para la estación fluviométrica del Río Rucue.

1.6.2. Geología

La cuenca del río Laja posee una geología compleja, mostrada en la Fig. A.1 del ANEXO 3.3.1, como resultado de la combinación entre volcanismo y procesos fluvio-aluviales. Inicialmente el valle fue formado por la acción glacial del Pleistoceno y posteriormente por procesos fluviales relativamente recientes. Sin embargo, los rasgos geomorfológicos que conforman esta zona corresponden a unidades geológicas de edades cuaternarias de depósitos volcanoclásticos consolidados y no consolidados que forman un gran abanico desde el tramo superior del valle hasta el extremo occidental de la Cordillera de la costa (Albornoz, 2019).

1.1. Desarrollo del Estudio

Este trabajo se divide en 4 grandes etapas:

- i. La primera etapa consiste en definir el caso de estudio y la obtención de las series temporales de imágenes satelitales (nanosatélites *Planet* y *Sentinel-2*) de la sección del río escogido, además de una revisión del estado del arte en el campo.
- ii. La segunda etapa implica la generación de mosaicos de imágenes satelitales para la sección de estudio, para el periodo que consta entre los años 2013-2023.
- iii. La tercera etapa se basa en el procesamiento de dichas imágenes mediante la utilización del *software South Rivers Toolbox (SRT)*, herramienta que permite semi-automatizar el tratamiento de distintos atributos, volviéndolo un análisis más objetivo. Dicha caja de herramientas se fundamenta a partir del Marco de Agregación y Desagregación desarrollado por Alber & Piégay (2011) y de la aplicación del Marco *River Styles* (Biererley & Fryirs, 2005). El primero consiste en la delimitación y caracterización de métricas fluviales basadas en datos brutos a escala regional. Posee cuatro componentes principales: objetos geográficos unitarios (UGO), objetos geográficos desagregados (DGO), métricas a escala local y objetos geográficos agregados (AGO) (Yépez et al., 2022). El segundo marco, por su parte, tiene como objetivo comprender el carácter y comportamiento de un río analizando varios atributos, como el grado de confinamiento, el *planform*, el material del lecho y las unidades geomórficas. Estos atributos se agrupan en estilos fluviales utilizando una herramienta de QGIS llamada "*Attribute based clustering*", lo que permite identificar grupos de ríos con atributos similares (Yépez et al., 2022).
- iv. La última etapa consta de la extracción de las tasas de migración lateral del río en la sección de interés, y subsiguientemente, la generación de zonas del río susceptibles y favorables para una extracción sustentable de áridos.

1.2. Estudios Anteriores

Algunas investigaciones importantes realizadas en la cuenca en estudio y que se encuentran disponibles digitalmente, corresponden a la publicación de Thiele et al. (1998) sobre la evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle, donde analiza la interrelación

entre volcanismo, procesos de remoción en masa y sedimentos aluvio-fluviales. Posteriormente, González et al. (2003) realiza una evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca, enfocándose en las características fisicoquímicas de los suelos y análisis texturales de sedimentos. Mardones & Vargas (2005) desarrollan una evaluación de los efectos hidrológicos superficiales de la cuenca y el impacto que generan los usos eléctrico y agrícola en el balance hidrológico a lo largo del corredor fluvial. En esta misma línea, Muñoz et al. (2014) publica un análisis hidrológico del sistema Laja y los impactos por cambios antropogénicos, comparando el comportamiento del régimen hídrico bajo condiciones naturales y bajo condiciones de operación de las centrales hidroeléctricas. Por último, y más recientemente, el trabajo realizado por Nardini et al. (2023) aborda el tema de la identificación automatizada de tramos de ríos y su tipo de configuración planimétrica utilizando un algoritmo y herramientas digitales basadas en parámetros geomorfológicos. Este análisis se aplicó en las cuencas de los ríos Laja, Biobío y Duqueco.

La DGA por su parte, ha realizado diversos estudios en la zona. El primero data del año 1970 y tiene como objetivo realizar un análisis de los recursos hidráulicos del río Laja. Posteriormente el año 2004, publican un extenso informe sobre la clasificación de los cuerpos de agua según objetivos de calidad para la cuenca del río Biobío, donde se realiza una caracterización geológica, hidrogeológica y geomorfológica que incluye al Laja como principal afluente. Finalmente, para el año 2018 se publica un proyecto de sectorización hidrogeológica del acuífero del río Laja.

Para nuestro conocimiento, hasta la fecha el único trabajo realizado en la zona de estudio orientado a la automatización de métricas fluviales del canal del río ha sido el trabajo de Nardini et al. (2023). Sin embargo, los autores hacen un modelamiento estático de tres ríos: Duqueco, Laja y Biobío, sin hacer un estudio retrospectivo y multitemporal como el que se propone en la presente investigación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos sobre Geomorfología Fluvial

La geomorfología fluvial, como rama de la ciencia, se dedica al estudio de los accidentes geográficos, formas y relieves generados por los ríos en la superficie terrestre. En el núcleo de esta disciplina reside la comprensión de los procesos que dan origen y configuran estas características fluviales (Kellerhals & Church, 1989). Es precisamente en esta perspectiva que se da origen al estudio evolutivo de la morfología fluvial, la cual ha sido tradicionalmente investigada mediante el análisis de los cambios en el cauce y en la llanura de inundación entre dos o más periodos temporales a partir de la interpretación de fotografías aéreas o la repetición de observaciones topográficas (Llena et al., 2018).

Dentro de un sistema fluvial, se encuentran elementos geomorfológicos clave que componen el paisaje, como el canal activo, la llanura de inundación y las unidades geomórficas tanto del río, e.g., barras e islas, diferenciadas por la aparición y desarrollo de vegetación ribereña en estas últimas, como de la llanura de inundación (humedales, arcos, paleocanales, etc). Estos elementos pueden clasificarse en función de su grado de confinamiento, sinuosidad, forma en planta (*planform*) y potencia de corriente (*stream power*), lo que proporciona una comprensión más detallada de su comportamiento y métricas (Fig. 2.1) (Nardini & Brierley, 2021).

Termino	Definición
Canal activo	Río en periodo de aguas bajas, incluyendo barras medias y laterales.
Envolvente canal activo	Canal activo más islas.
Barras / islas	Unidades geomorfológicas. Las barras se pueden clasificar como barras medias, barras puntuales, barras laterales sin vegetación y barras laterales con vegetación. Las islas forman los multicanales.
Multicanal	División del canal activo en 2 o más canales.
Llanura de inundación	Zona de baja pendiente que se puede inundar cuando el río lleva caudales altos.
Paleocanal	Canal que perteneció al canal activo.
Puntos inflexión	Puntos dónde el río cambia de concavidad.
Línea inflexión	Línea que une los puntos de inflexión.
Sinuosidad	Grado de curvatura del canal activo con respecto a la línea de inflexión.
Forma en planta (planform)	Configuración en planta de un río, la cual depende del número de canales, unidades geomorfológicas y sinuosidad.

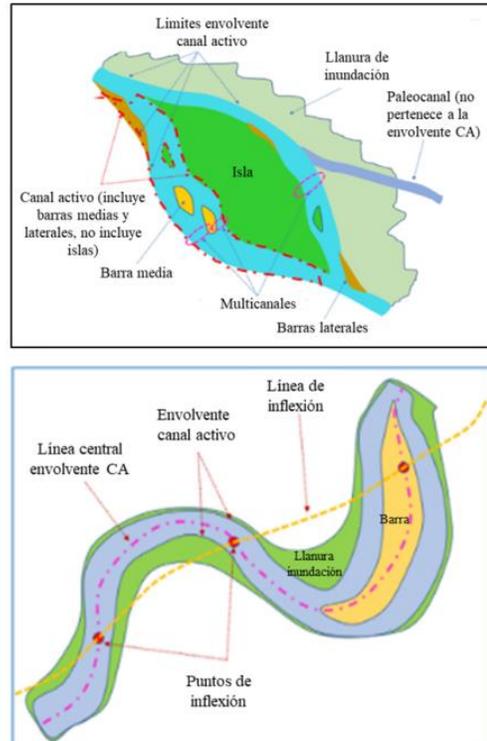


Fig. 2. 1: Definición y esquema con las principales características geomorfológicas de un sistema fluvial. Extraído de González (2021) y basado en Nardini & Brierley (2021).

La extraordinaria diversidad de formas y procesos fluviales presenta desafíos significativos en el desarrollo de un enfoque flexible y genérico para la clasificación de ríos. Este desafío se complica debido a la variabilidad temporal, ya que los ríos pueden tener diferentes configuraciones en diferentes momentos. A medida que los ríos cambian con el tiempo, también lo hace su categoría de clasificación, lo que sugiere que la capacidad de cambio y la dinámica del sistema pueden ser, en sí mismas, una base para clasificarlos. Brierley & Fryirs (2005) postulan que los enfoques prácticos para la clasificación de ríos deben ir más allá de la descripción del carácter visual de un tramo específico e incluir la interpretación del comportamiento del río, incorporando una visión holística espacial y temporal a nivel de cuenca, lo que permite explicar por qué se ha adoptado esa morfología particular e incluso predecir la respuesta del río ante alguna perturbación. Esta interpretación puede relacionarse con factores como la ubicación en la cuenca, los controles aguas arriba y aguas abajo, las fuerzas impulsoras y resistivas, los patrones de sedimentos y flujo, régimen hidrológico y la evolución del río mismo.

2.1.1. Corredor Fluvial

El concepto de corredor fluvial va emparejado con el propio concepto de río, pero representa mucho más que una simple masa de agua que circula por un cauce. Abarca más bien el conjunto del ámbito fluvial, es decir, el río en su canal de estiaje, la vegetación ribereña y la superficie que ocupan las aguas durante las crecidas. Se trata de un corredor ecológico que vertebró el territorio, uniendo valles con llanuras y zonas de alta montaña con cabeceras de río en sectores litorales, donde los cursos fluviales desembocan finalmente, ya sea en el mar o en otros corredores fluviales, que tarde o temprano terminan llegando a aquel.

Si bien los ríos constituyen una pequeña fracción (0,49%) del agua dulce superficial en el planeta, desempeñan un papel importante en sustentar la vida en la Tierra y el desarrollo humano (Gleick & White, 1993). Sin ir más lejos, el Foro Mundial para la Naturaleza (WWF) estima que 2.000 millones de personas en el mundo dependen directamente de los ríos para proveerse de agua potable. El rol que cumplen estas redes hídricas va desde la biodiversidad y hábitat de plantas y animales, a servicios ecosistémicos como mitigación de inundaciones y recargas de acuíferos, hasta el suministro de agua dulce y de transporte y comercio para la actividad humana.

Los corredores fluviales desempeñan un papel fundamental en la acumulación de áridos, ya que la mayoría del material pétreo utilizado en la construcción se obtiene de estos entornos. Esto se debe a que, debido a los procesos erosivos a los que están sometidos, los áridos depositados en estos ambientes poseen características deseables para su uso en la construcción, como su angularidad y composición mineral. Estas características los hacen más adecuados que otros tipos de ambientes acumuladores de áridos, como las zonas desérticas, donde los áridos tienen un origen más bien eólico (Rentier & Cammeraat, 2022).

2.2. Marco de Desagregación y Agregación del Corredor Fluvial

Alber & Piégay (2011) desarrollan un marco metodológico SIG (Fig. 2.2) bajo la necesidad de automatizar la caracterización a gran escala de sistemas fluviales basado en procedimientos de desagregación y agregación espacial desde una perspectiva geomorfológica. La desagregación

espacial implica la discretización longitudinal de objetos geográficos en unidades espaciales de resolución relativamente alta para caracterizar continuamente las características fluviales a lo largo de las redes de ríos. Dado que los ríos son heterogéneos y están organizados jerárquicamente, la agregación espacial tiene como objetivo delinear unidades espaciales estadísticas basadas en patrones o procesos a escalas apropiadas.

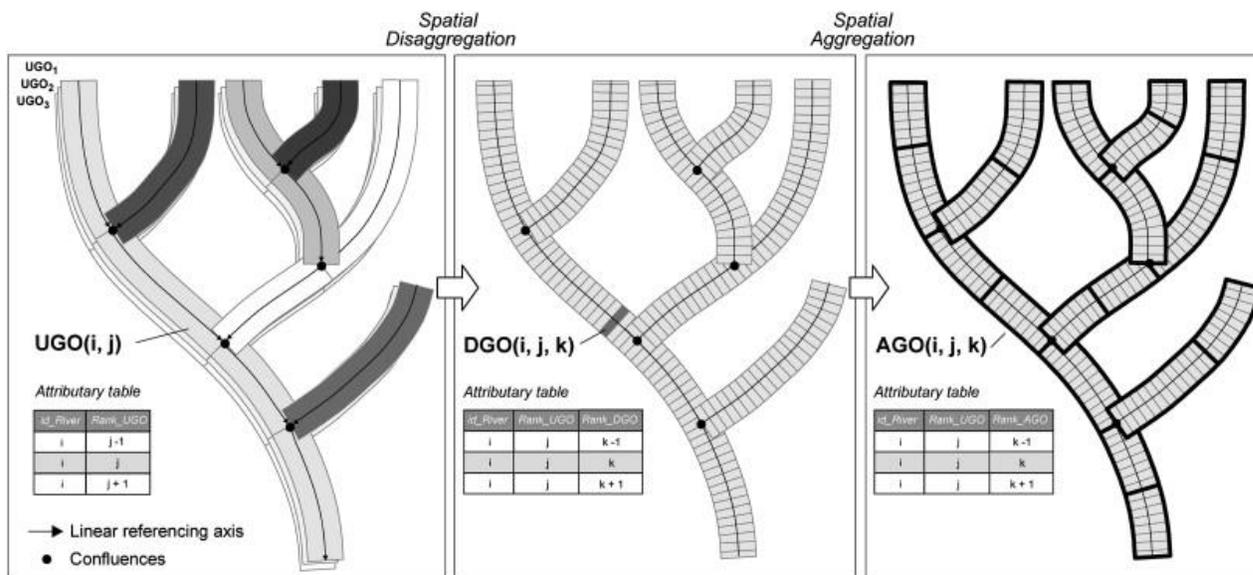


Fig. 2. 2: Metodología de Agregación y Desagregación de UGO. Extraído de Alber & Piégay (2011).

Los 4 componentes principales de esta metodología son:

- **Objetos Geográficos Unitarios (UGO):** corresponden a las unidades espaciales lineales y poligonales que delimitan componentes biofísicos (canal activo, llanura de inundación, barras, islas, entre otros) como un todo a lo largo de las redes de drenaje.
- **Objetos Geográficos Desagregados (DGO):** son los segmentos equidistantes resultantes de la discretización longitudinal de los UGO, y cuya segmentación se realiza a una longitud obtenida a partir del ancho y largo del río. Poseen dos funciones: (i) caracterizar UGO y sus cambios longitudinales con una alta resolución espacial de forma continua y, de manera más general, (ii) proporcionar sistemas de referencia lineal para atributos a lo largo de las redes de arroyos.

- **Métricas a Escala Local:** los atributos del corredor fluvial y su llanura de inundación se calculan de manera sistemática en cada DGO. Algunos de estos atributos pueden medirse directamente, mientras que otros más complejos dependen de una combinación de atributos simples. Dentro de las métricas a aplicar en este estudio se encuentran el ancho de los UGO, el área de drenaje (AD), la elevación y pendiente, *stream power* (potencia de corriente), confinamiento local, sinuosidad local, forma de planta y, finalmente, la tasa de migración lateral anual. Todos estos parámetros (salvo el último) se encuentran semi-automatizadas en SRT (Yépez et al., 2022) y disponibles en su repositorio para mayor detalle: <https://github.com/vosores/SouthRiversToolbox>. De igual forma, se describirán en mayor detalle en el capítulo de Metodología.
- **Objetos Geográficos Agregados (AGO):** La agregación espacial de atributos tiene como objetivo delimitar objetos geográficos agregados basados en patrones estadísticos o procesos para responder a preguntas a escalas apropiadas. Se busca especialmente la obtención de segmentos que sean homogéneos en relación con dos atributos esenciales: el ancho de la llanura de inundación y la forma en planta. Para generar los AGO del primer atributo se aplica la prueba estadística de Hubert (Hubert, 2000), y para el segundo se realiza una revisión visual de los segmentos.

El trabajo de Alber & Piégay (2011) ha sido automatizado mediante un *software* de uso abierto llamado Fluvial Corridor de Roux et al. (2015), caja de herramientas desarrollada para ArcGIS. El paquete permite al usuario extraer una amplia variedad de características fluviales, como los principales componentes de corredores fluviales a partir de datos DEM y capas vectoriales, lo que facilita un enfoque personalizado según los datos disponibles y el contexto geográfico. Esta herramienta es pionera en la caracterización planimétrica y longitudinal de redes fluviales a múltiples escalas, y además, permite agregar características espaciales en segmentos homogéneos y métricas esenciales para análisis de paisajes fluviales y procesos bio-geomorfológicos.

2.3. Marco *River Styles*

El Marco *River Styles* (RS), desarrollado por Brierley & Fryirs (2005), se presenta como una valiosa herramienta geomorfológica para evaluar diversos aspectos, como el carácter, comportamiento, evolución y estado de los ríos en toda una cuenca fluvial. Su principal objetivo es facilitar la gestión sostenible de los corredores fluviales. El RS se compone de cuatro etapas fundamentales (Fig. 2.3), aunque este estudio se enfoca en la implementación de la primera etapa en una sección del río Laja.

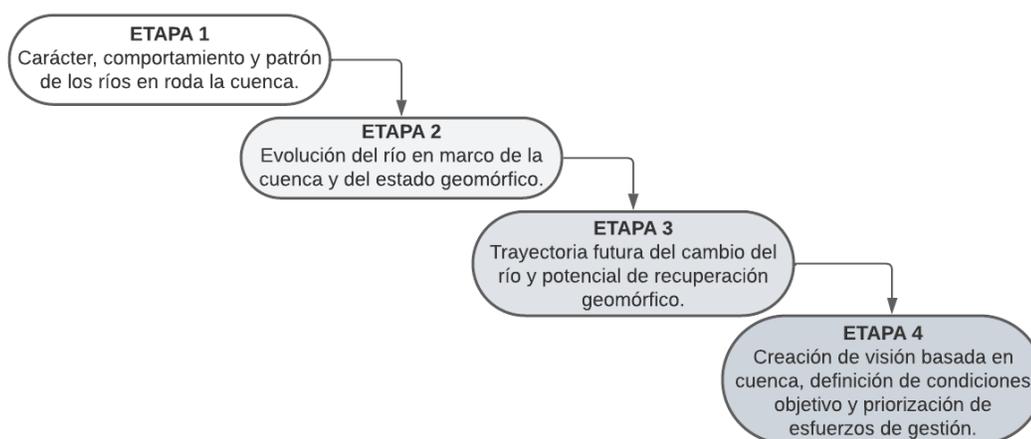


Fig. 2. 3: Etapas del Marco *River Styles*. Modificado de Brierley & Fryirs (2005).

En esta primera etapa se lleva a cabo la clasificación y caracterización de los estilos fluviales presentes en el cauce. Estos estilos fluviales actúan como registros que describen el carácter y el comportamiento del río a nivel de segmentos específicos. Para definir estos estilos fluviales, se utilizan una serie de métricas que abordan aspectos como la configuración de la llanura de inundación, la morfología del cauce, las unidades geomórficas, la textura del material del lecho, el grado de confinamiento, entre otros. Es importante mencionar que algunos de estos análisis pueden ser semiautomatizados, dependiendo de la disponibilidad de datos y el *software* utilizado, como se ha señalado en investigaciones anteriores (Fryirs et al., 2019).

En el siguiente diagrama de flujo (Fig. 2.4) se presentan los atributos que deben ser evaluados a nivel de segmentos de forma homogénea:

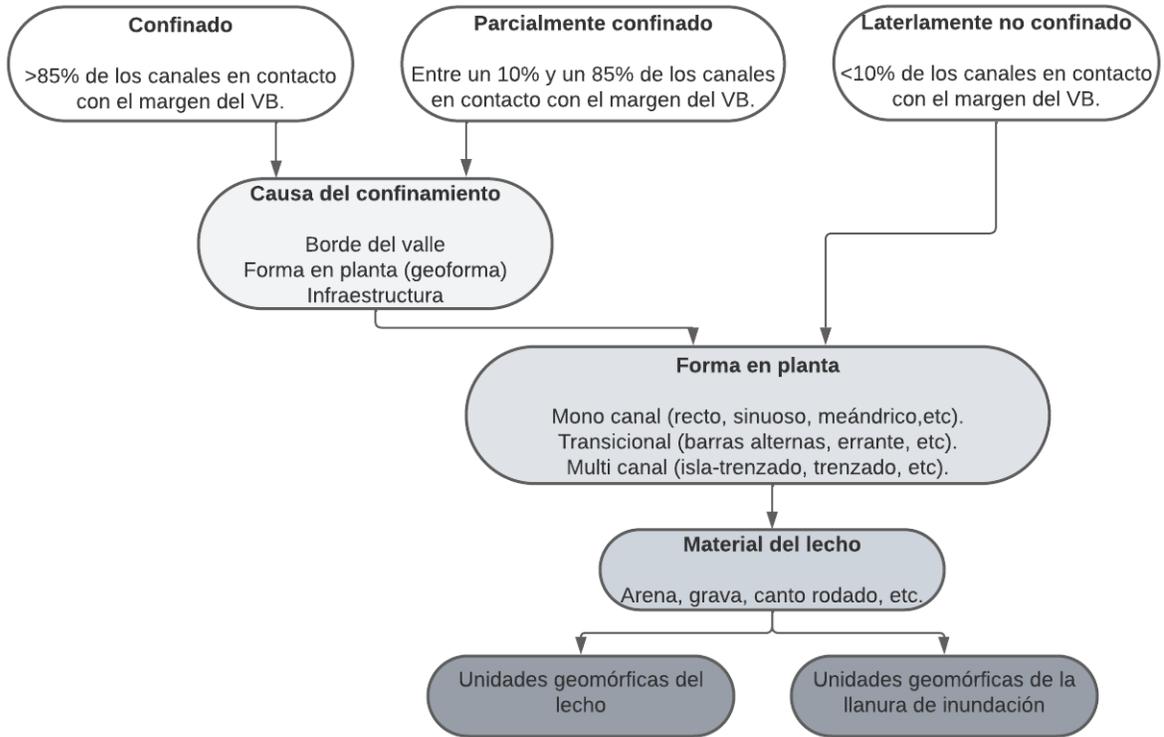


Fig. 2. 4: Árbol procedimental Marco *River Styles* modificado de Fryirs & Brierley (2018).

3. METODOLOGÍA

Para la generación de un mapa que ilustre la ubicación de zonas más factibles y las más sensibles a la extracción de áridos, en este trabajo se realizaron las siguientes actividades.

3.1. Datos de Entrada: Imágenes Satelitales

Los datos de entrada utilizados para la extracción de los parámetros geomorfológicos corresponden a dos tipos de imágenes satelitales. Las primeras, son imágenes multiespectrales de *Sentinel-2*, con reflectancia a nivel de suelo, lo que permite corregir los efectos atmosféricos y garantizar una mayor precisión en la cantidad de luz reflejada por la superficie terrestre, además de una cobertura de nubosidad de hasta 9,4% y una resolución de 10 m por píxel. El segundo tipo son series temporales de imágenes satelitales de alta resolución espacial de nanosatélites *Planet*, obtenidas a partir del convenio entre la empresa *Planet* y la Facd. De Ciencias Forestales. Estas imágenes pertenecen a la constelación de satélites *RapidEye*, poseen una resolución de 5 y 3 metros por píxel y contienen 4 bandas espectrales, tanto para el espectro infrarrojo como visible. Además, contiene los archivos *Analytic SR (Reflectance Surface)* que corrigen efectos atmosféricos y topográficos, representando datos de reflexión de luz solar en la superficie terrestre. En la siguiente tabla (Tabla 3.1) se resumen las imágenes utilizadas junto con su fecha de captura:

Tabla 3. 1: Imágenes satelitales utilizadas, fecha de captura y resolución

Fecha	Satélite	Resolución
30 noviembre 2013	<i>Planet</i>	5m
18 diciembre 2013	<i>Planet</i>	5m
15 diciembre 2018	<i>Sentinel-2</i>	10m
30 septiembre 2023	<i>Planet</i>	3m

3.2. Procesamiento de Imágenes Satelitales

En el proceso inicial de tratamiento de imágenes satelitales, se llevó a cabo la creación de mosaicos para cada uno de los tres periodos temporales a analizar, vale decir, de los años 2013, 2018 y 2023. Las imágenes *Planet*, a diferencia de la obtenida a través de *Sentinel-2*, no abarcan la totalidad del área de estudio, por lo que deben ser combinadas. Para el caso de estudio del año 2013, esta tarea

implicó la incorporación de imágenes tomadas en dos fechas diferentes: el 18 de diciembre y el 30 de noviembre de 2013, lo que representa un lapso de 18 días entre ambas capturas. Es relevante destacar que, según los registros proporcionados por el Servicio Climático de la Dirección Meteorológica de Chile, no se reportaron precipitaciones significativas entre estas fechas. Por lo tanto, se puede inferir que el nivel de caudal del río Laja, objeto de estudio, no debería haber experimentado variaciones sustanciales en ese período de tiempo.

3.2.1. Extracción del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

El segundo procesamiento de las imágenes satelitales corresponde a la obtención del índice NDWI, el cual es utilizado como una herramienta de teledetección para el reconocimiento y mapeo de cuerpos de agua, identificando la cantidad de agua presente en la vegetación o suelo, y que permite determinar el nivel de saturación de humedad del suelo.

Existen diferentes métodos para obtener el índice normalizado de agua, que varían según la combinación de bandas espectrales que se realice, sin embargo, para este caso se utiliza el método desarrollado por Mcfeeters (1996), el cual es especialmente útil para cuerpos de agua con densa vegetación circundante, y es, además, el más utilizado. La relación de bandas es la siguiente:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (3.1)$$

Esta relación matemática se describe como la diferencia normalizada entre las bandas espectrales verde (Green) y la de infrarrojo cercano (NIR), y se realiza mediante la herramienta *BandMath* del complemento *Orfeo Toolbox* (OTB). Mcfeeters la describe así con el propósito de maximizar la reflectancia del agua y la vegetación aplicando banda del espectro visible y minimizándolo en el NIR (Aguayo et al., 2018). Los valores del índice poseen un rango desde el -1 al +1. Valores menores a 0 se asocian a superficies brillantes con presencia de agua, en cambio, valores mayores a 0 indican, en su defecto, la presencia de vegetación. Entre más cercano sea el valor a +1, mayor será el contenido o presencia de agua. Este índice nos permite delimitar el canal activo.

3.3. Extracción de Métricas Fluviales: Marco de Desagregación y Agregación

Tal como vimos en la sección 2.2, el marco desarrollado por Alber & Piégay (2011) consta de 4 componentes esenciales.

3.3.1. Objetos Geográficos Unitarios (UGO):

- **Extracción del Canal Activo (CA)**

Para calcular el CA se emplea un mosaico de imágenes satelitales generadas a partir del procesamiento del índice NDWI. De esta forma, se realiza la reflectancia de la vegetación mediante la combinación de diversas bandas espectrales. En particular, se utiliza la banda de infrarrojo cercano (NIR) para mejorar la distinción entre los cuerpos de agua y la vegetación. Una vez obtenido el ráster procesado con el índice NDWI (Fig. 3.1), se filtran los valores menores o iguales a 0 (umbral que debe ser ajustado de ser necesario) mediante la herramienta *raster calculator*. Finalmente, la capa resultante se vectoriza y se depura para eliminar los píxeles que posean una reflectancia similar a la del canal activo, pero que no pertenezcan a él. Esto incluye áreas como suelos húmedos o zonas sombreadas que la herramienta podría interpretar incorrectamente.

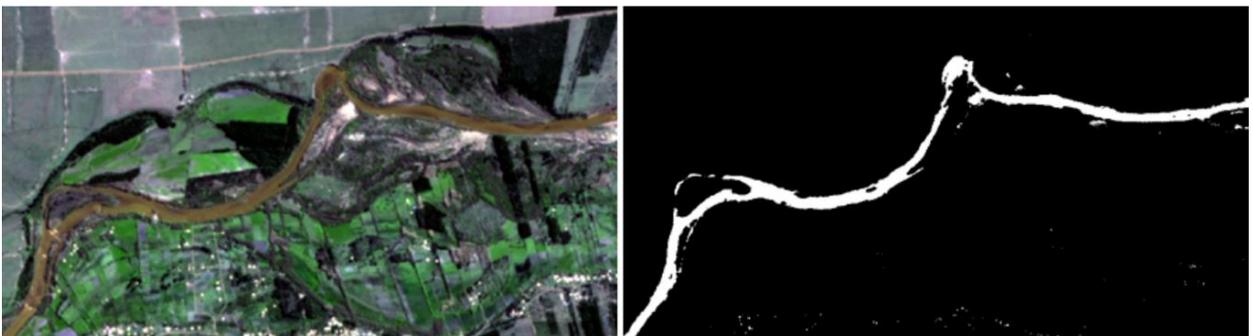


Fig. 3. 1: Comparación entre imagen satelital Planet (izq.) y capa de extracción de índice NDWI (der.).

- **Envolvente del Canal Activo**

Corresponde al polígono que delimita el contorno exterior del conjunto de canales, barras e islas, y se obtiene mediante la creación de una capa vectorial que replica el canal activo, llenando todos los anillos interiores del polígono original, que en este contexto son las barras e islas. Este polígono abarca incluso las barras laterales.

- **Unidades geomórficas**

Unidades que se encuentran en el interior de la envolvente, y que corresponden a barras e islas. Su identificación se realiza de forma manual, a través de la revisión de imágenes satelitales mediante el *plug-in OpenLayers* de QGIS, o el *software* de *Google Earth Pro*, específicamente mediante la herramienta “deslizador de tiempo” que permite la visualización de imágenes de diferentes tiempos, abarcando periodos tanto de aguas altas como de aguas bajas.

- **Llanura de inundación (VB)**

En este caso, la llanura de inundación fue extraída a partir del trabajo gemelo realizado en paralelo por la estudiante Carrasco, Z. (2023). Se delimita usando el *software* ArcGIS con la herramienta *Valley Bottom Extraction Tool* (V-BET) desarrollada por Gilbert et al. (2016), esta trabaja con una pendiente transversal máxima y soluciona los problemas de escala al dividir el corredor fluvial en 3 secciones, cada una con una pendiente y ancho de llanura máximos (Salas, F., 2021). A partir de esta delimitación base se emplearon diversos métodos para ajustar y calibrar la delimitación de la llanura (Ver sección ANEXO 3.3.1). Esto incluyó la revisión visual de un mapa geológico (Sernageomin, 2003) para garantizar de manera visual que el polígono no excediera los límites de las unidades geológicas identificadas. Además, se llevaron a cabo perfiles transversales a lo largo del río utilizando un DEM como referencia, permitiendo la observación y corrección manual de las zonas donde se detectaron terrazas y laderas que influían en la delimitación de la llanura.

- **Línea Central (CL)**

Es una polilínea que se utiliza como eje de referencia para guardar las métricas desagregadas a lo largo del río. Se delimita mediante la creación de polígonos de Voronoi originados a partir del polígono de la envolvente, la cual consiste en una construcción geométrica basada en distancias euclidianas, trazando mediatrices en los segmentos de unión. El flujo de trabajo para la extracción de la CL se muestra en la Fig. 3.2.

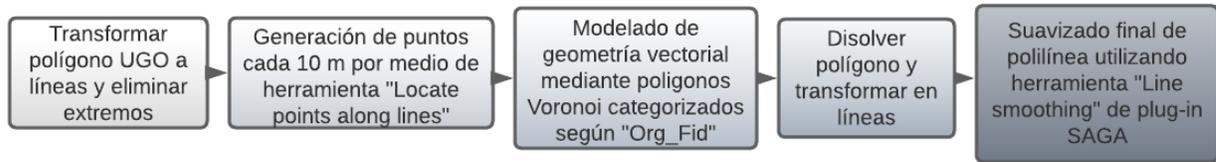


Fig. 3. 2: Flujo de trabajo para la extracción de la línea central de cada uno de los UGO.

3.3.2. Objetos Geográficos Desagregados (DGO)

La desagregación espacial consiste en la discretización longitudinal de los objetos geográficos unitarios en unidades espaciales de relativamente alta resolución (Salas, 2021). La segmentación se lleva a cabo cada 100 metros, y se realiza mediante la herramienta *Segmentation* incluida en la función *River Skeleton* del *software* SRT. Para ello, se utilizan como datos de entrada el UGO a segmentar, como la llanura de inundación o la envolvente, y su respectiva línea central, la cual es previamente secuenciada gracias al conjunto de herramientas *Fluvial Corridor Toolbox* de Roux et al. (2015), que permite ordenar y orientar la polilínea según la dirección del flujo, es decir, desde aguas arriba a aguas abajo. Este ordenamiento da como resultado una numeración en orden ascendente en dirección aguas abajo con un código único generado en el campo DGO de la tabla de atributos de cada uno de los polígonos segmentados, vale decir, la llanura de inundación, el canal activo y su envolvente. Por último, es importante obtener una única segmentación y codificación para los DGO, por lo que se debe intersectar el polígono inicialmente segmentado, en este caso el de la llanura de inundación, con el resto de los polígonos UGO.

3.3.3. Métricas a Escala Local

Se calculan atributos del corredor fluvial y su llanura de inundación de forma sistemática en cada DGO. A continuación, se describe el cálculo de cada métrica considerada en el análisis:

- **Ancho de los DGO:** para calcular el ancho de la llanura de inundación, empleamos la herramienta *Width Valley Bottom* de SRT. Esta herramienta determina el ancho promedio en cada tramo de 100 m de los DGO obtenidos previamente. Para realizar esta

cuantificación, se requieren como datos de entrada el VB, junto a su correspondiente polígono segmentado y su CL.

Para determinar el ancho de cada lado de la llanura de inundación, se procede a dividir los polígonos del VB y del VB segmentado por la línea central correspondiente. Una vez que se han separado estos polígonos, se calcula la línea central de cada uno utilizando la herramienta *Valley Centerline* del SRT. Posteriormente, se aplica la herramienta *Width Valley Bottom* del SRT a cada uno de estos polígonos separados, lo que permite obtener el ancho de la llanura de inundación de cada lado de manera individual.

Una vez obtenido el ancho del *Valley Bottom*, se procede a intersectar este polígono al polígono representativo de la envolvente del canal activo, para de esta forma obtener resultados correlativos para el ancho de ambos DGO.

- **Área de drenaje (AD):** es un parámetro que permite calcular el área total de la cuenca y el área captante a lo largo del río. Este dato es calculado para posteriormente obtener 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. Se genera una red de puntos 25 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 (González, 2021).
- **Elevación:** de forma análoga al área de drenaje se extraen las elevaciones cada 20 metros sobre la línea central de la envolvente de canales activos directamente desde el DEM, y se realiza una corrección de errores cuando existen elevaciones mayores a la inmediatamente anterior, desde aguas arriba hacia aguas abajo, igualando el valor de aguas arriba (Salas, 2021).

- **Pendiente:** se calcula a partir de los datos de elevación, con la siguiente ecuación.

$$\frac{H_j - H_i}{20} \quad (3.2)$$

Donde H_i y H_j son elevaciones en m s.n.m. contiguas sobre la línea central de la envolvente de canales activos, y el punto i está 20 metros aguas arriba del punto j . Se aplican las herramientas de *HydroTools* desarrolladas para Excel para realizar un suavizado a la pendiente, promediando valores 200 metros aguas arriba y aguas abajo de cada punto (Gartner, 2016).

- **Sinuosidad local:** para obtener el grado de sinuosidad a lo largo del eje del río, se requieren tres elementos: la CL del canal activo, el polígono segmentado correspondiente al ancho del canal y el polígono segmentado asignado al ancho del VB. Matemáticamente, la sinuosidad se define como el cociente entre la longitud de la curvatura (σ) y la longitud del segmento (δ) correspondiente a la línea de inflexión, tal como se observa en la Fig. 3.3. Para modelar la sinuosidad se necesita la herramienta *Planform Metrics* de la función *Other Metrics* de SRT, la cual nos entregará los elementos necesarios para calcular el grado de sinuosidad. Los puntos de inflexión que el programa no coloque de manera precisa deben ser ajustados de forma manual, para lo cual se procura trabajar a una escala constante. Una vez corregidos estos puntos, procedemos al cálculo de la sinuosidad local a través de la herramienta *Local Sinuosity* de SRT en QGIS. Los valores resultantes registrados en una tabla de atributos se procesan en Excel para identificar los diferentes grados de sinuosidad (Tabla 3.2). En el caso de la sinuosidad restringida, la identificamos visualmente al observar los segmentos en donde la línea de inflexión se extiende más allá de los límites de la llanura de inundación.

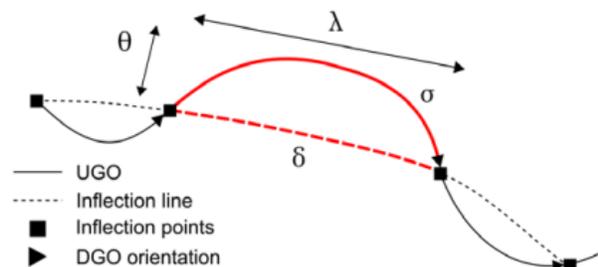


Fig. 3. 3: Esquema para el cálculo de la sinuosidad. Extraído de Nardini et al. (2019).

Tabla 3. 2: Grado de sinuosidad. Modificado de Nardini & Brierley (2021).

Grado de Sinuosidad	Rango de Valores
Rectilíneo	$S \leq 1,05$
Baja sinuosidad	$1,05 < S < 1,3$
Sinuoso	$1,3 \leq S \leq 1,5$
Meándrico	$1,5 < S \leq 2$
Tortuoso	$S > 2$
Sinuosidad restringida	Si el canal se encuentra restringido al VB

- **Potencia de corriente (*stream power*):** corresponde a 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). Se calcula para los puntos cada 20 metros sobre la línea central de la envolvente de canales activos, según la Fórmula 3.3 planteada por Bagnold (1966).

$$\Omega = \rho g Q S$$

(3. 3)

Donde Ω es la potencia de la corriente, ρ es la densidad del agua (1.000 kg/m^3 a 4°C), g es la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$), Q es el caudal formativo *bankfull*, S es la gradiente de energía (equivalente a la pendiente del canal para flujo uniforme).

Por su parte, para obtener valores más acotados y cercanos a la realidad, se calcula la potencia de corriente específica ω , que se entiende como el cociente de la potencia de corriente Ω y el ancho del canal activo W , en unidades de *watts* por metro cuadrado, como se muestra en la Fórmula 3.4.

$$\omega = \frac{\Omega}{W}$$

(3. 4)

- **Confinamiento local:** se crea un modelo que automatiza el proceso en el *software* QGIS llamado *Local Confinement*, este algoritmo evalúa cada 10 metros, si existe algún contacto entre el buffer de la envolvente de canales activos y la llanura de inundación, ya sea en un

lado del cauce o en ambos, el resultado es una línea central binaria con valores de 0 para no confinado y 1 para confinado (Salas, 2021).

- **Forma en planta:** La forma en planta es uno de los atributos clave en la clasificación *River Styles* ya que permite categorizar los diferentes tramos de un río según varios criterios, como el número de canales, islas, barras laterales, barras puntuales, barras medias, humedales, el ancho del canal activo y la sinuosidad. La clasificación de la forma en planta se realiza mediante una hoja de cálculo de Excel diseñada por Nardini & Brierley en 2021. Esta hoja de cálculo emplea una ventana móvil que clasifica conjuntos de Objetos Geográficos Diferenciados (DGO) según los arquetipos predefinidos.

Una de las métricas esenciales para determinar la forma en planta implica clasificar si un tramo del río tiene un solo canal (patrón monocanal) o múltiples canales (patrón multicanales). Para llevar a cabo esta clasificación, se utiliza la herramienta Mono-Multicanal del *software* SRT. Esta herramienta requiere como datos de entrada el polígono segmentado de la envolvente del canal activo y una capa que contenga todos los objetos geográficos medios segmentados, como islas y barras medias. El algoritmo determina si un DGO es monocanal o multicanales según si el porcentaje de una barra media o isla supera el 10 % del área del DGO.

Los tipos de forma en planta se dividen en tres clasificaciones principales: monocanal, transicional y multicanales. Estas clasificaciones se subdividen aún más para determinar la forma específica del canal en cada caso. La Tabla 3.3 detalla cómo se realiza esta clasificación en función de si es monocanal, de transición o multicanales, respectivamente.

Tabla 3. 3: Tipo de forma en planta y sus características según arquetipo de río. Extraído de Salas (2021).

Arquetipos	Tipo de forma en planta	Características
Mono-canal	Sinuosidad restringida	Prevalece el monocanal (90 %) Tipo de sinuosidad “confinada” Baja presencia de barras
	Rectilíneo	Prevalece el monocanal (90 %) $S^{\circ} < 1,05$ Tipo de sinuosidad recto Baja presencia de barras

	Baja sinuosidad	Prevalece el mono-canal (90 %) $1,05 \leq S^\circ < 1,3$ Tipo de sinuosidad recto Baja presencia de barras
	Sinuoso	Prevalece el monocanal (90 %) $1,3 \leq S^\circ < 1,5$ Tipo de sinuosidad recto Baja presencia de barras
	Meándrico	Prevalece el monocanal (90 %) $1,5 \leq S^\circ < 2$ Tipo de sinuosidad "Meándrico" Baja presencia de barras Alta presencia de barras puntuales
	Tortuoso	Prevalece el monocanal (90 %) $S^\circ \geq 2$ Tipo de sinuosidad "Tortuoso" Baja presencia de barras Lateralmente inactivo
	Errante (<i>wandering</i>)	Prevalece el monocanal (65 %) Ni meándrico ni tortuoso Alta frecuencia de barras laterales y pocas barras medias Existe un canal dominante
Transicional	Barras alternas	Prevalece el monocanal (65 %) Ni meándrico ni tortuoso Alta frecuencia de barras alternas Ausencia de barras medias e islas
	Serpenteante (<i>swallowing</i>)	Prevalece el monocanal (65 %) Ni meándrico ni tortuoso Ausencia de islas esporádicas, solo una isla grande dentro de una ampliación
Multi-canal	Trenzado	Multicanal Barras medias prevalecen como elemento separador en lugar de islas Ausencia de un canal dominante Ancho envolvente mucho mayor que ancho de un canal, pero no mucho mayor que la suma de los canales
	Trenzado por isla	Multicanal Islas prevalecen como elemento separador en lugar de barras medias Ancho de islas similar al ancho total de los canales Distancia entre canales no exagerada
	<i>Anabanching</i>	Multicanal Suficientes islas como separadores Existe un canal dominante Canales largos Distancia entre canales considerablemente alta Alta varianza en el número de canales
	Anastomosado	Multicanal Ausencia de barras Suficientes islas como separadores Ausencia de un canal dominante Ancho envolvente mucho mayor que la suma del ancho de los canales Canales largos

- Tasa de migración lateral anual:** para llevar a cabo el análisis de la migración lateral, se evaluaron dos escenarios diferentes: uno que abarca el período 2013-2018, y otro para el periodo 2018-2023, ambos con una diferencia de 5 años entre ellos. En cada uno de estos casos, se emplearon las CL correspondientes a los años mencionados. La migración lateral se determina a partir del polígono que se encuentra encerrado entre ambas CL, proceso que se repite para cada periodo y es realizado en ArcGIS. Una vez obtenido el polígono, se introduce un campo llamado *side* a la tabla de atributos, el cual asigna valores binarios según la dirección hacia la cual se ha movido el canal principal. Se utiliza +1 para indicar movimientos hacia la derecha y -1 hacia la izquierda, siempre considerando la dirección del flujo. Luego, se crea un nuevo CL basado en el polígono recién formado. Para ello, es importante aplicar una capa *buffer* (Fig. 3.4) que cumpla la función de evitar que el nuevo polígono se cierre en los puntos de intersección de ambos CL, y así no tener problemas en el proceso de poligonizado con *Voronoi*. Este último polígono es segmentado cada 100 m, al igual que el resto de DGO, y se extrae su ancho. Se intersectan los polígonos de ancho con el polígono original que contiene el campo *side*, y es el producto de este campo multiplicado por el ancho y dividido la diferencia de años, en este caso 5 para cada periodo, que se obtiene la tasa de migración lateral anual. El flujo de trabajo se ilustra en la Fig. 3.5.

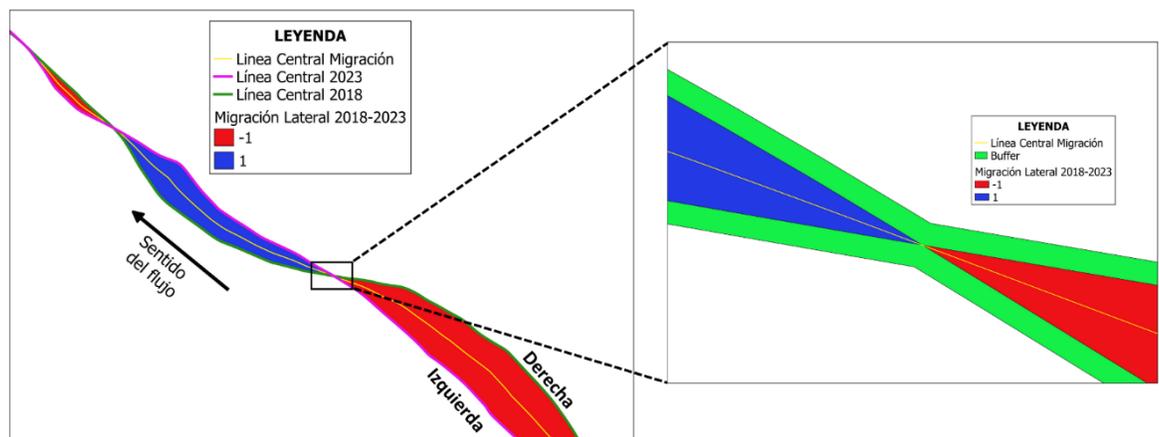


Fig. 3. 4: Sección media del río Laja, a partir de la cual se extrajo la migración lateral entre los periodos 2018 y 2023. La imagen a la izquierda muestra la identificación de cada polígono mediante colores según la dirección de desplazamiento (izquierda o derecha) de la línea central del cauce; mientras que la imagen de la derecha corresponde a un acercamiento que exhibe la capa *buffer* aplicada para evitar intersecciones entre los polígonos.

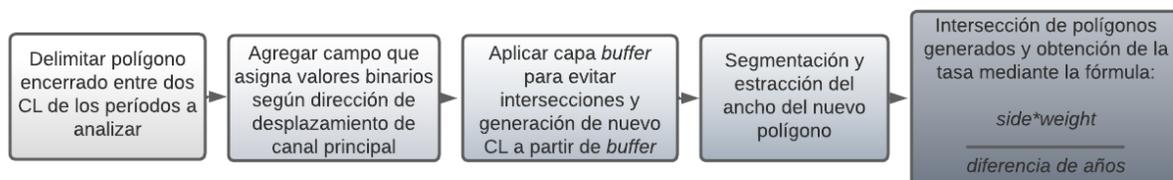


Fig. 3. 5: Flujo de trabajo para la extracción de la tasa de migración lateral anual.

3.3.4. Objetos Geográficos Agregados (AGO)

La agregación espacial de atributos tiene como objetivo delimitar objetos geográficos agregados (AGO, del inglés *Aggregated Geographical Object*) basados en patrones estadísticos o procesos para responder a preguntas a escalas apropiadas (Alber & Piégay, 2011). En particular, se busca obtener segmentos homogéneos con respecto a dos atributos clave, el ancho de la llanura de inundación y la forma en planta, para generar los AGO del primer atributo se aplica la prueba estadística de Hubert (Hubert, 2000), y para el segundo se realiza una revisión visual de los segmentos (Salas, 2021).

- **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 (González, 2021).

A continuación, se explican brevemente los procesos de obtención de segmentos homogéneos para el ancho de la llanura de inundación y la forma en planta.

- **Ancho de la llanura de inundación:** en primera instancia se aplica la herramienta “*Hubert-Kehagias Aggregation*” en SRT la que incorpora mejoras a la prueba de Hubert, para obtener segmentos óptimos (Kehagias et al., 2006), el problema es que resultan demasiados segmentos AGO, ya que su sensibilidad para detectar puntos de cambio es muy grande, y no es posible modificar los parámetros (todos están dados por defecto), tener un número elevado de AGO no es conveniente pues se pierde el análisis holístico, priorizando el detalle local. Alternativamente se aplica la herramienta “*Hubert test*” del conjunto de *Fluvial Corridor Toolbox* en ArcGIS, que igualmente automatiza el proceso, y permite ajustar el valor de Alpha, se determina visualmente que el Alpha 0,8 reproduce bien los puntos de quiebre y un número razonable de segmentos AGO (Salas, 2021).
- **Forma en planta:** al tratarse de atributos categóricos para cada DGO, no es posible aplicar la prueba de Hubert, pero teniendo en cuenta que el algoritmo para identificar la forma de fondo funciona en base a una longitud significativa (L_s) para cada DGO, ya existe intrínsecamente un grado de agregación en la definición de la forma en planta. Luego se realiza una inspección visual, cuidando que ningún AGO tenga una extensión menor a dos DGO, es decir, se realiza una agregación manual en base a una longitud mínima de 200 metros, en el caso de encontrar un AGO con una longitud menor, estos se agregan al segmento adyacente, al que mayor similitud tiene la forma en planta (evaluado con el VF) (Salas, 2021).

3.4. Marco *River Styles*

El marco *River Styles* descrito por Brierley & 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 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 (González, 2021).

A continuación, se detalla el proceso para obtener los atributos necesarios para el árbol procedimental ilustrado en el apartado 2.3 del Marco Teórico:

- **Confinamiento:** se calcula de forma automatizada mediante el conjunto de herramientas del módulo *Confinement* de SRT, sobre cada segmento del río. En términos generales, el primer paso es detectar las zonas de contacto entre el envolvente del canal activo (con un buffer de 10 metros) y la llanura de inundación, para esto se utiliza la herramienta de *confinement contacts*. El segundo paso es dividir el polígono de la llanura de inundación en dos polígonos de lado derecho e izquierdo, según la línea central de la envolvente del canal activo, con la herramienta *Valley Bottom divided*. El tercer paso es determinar para cada DGO de la llanura de inundación, si existe confinamiento por el lado derecho o izquierdo, esto se realiza con la herramienta *Contacts by sides* que crea dos columnas para *C_left* y *C_right* con presencia (1) o ausencia (0) de confinamiento. Finalmente, el último paso contempla integrar el confinamiento en los segmentos, para esto la herramienta *confinement* evalúa la numerosidad de DGO con confinamiento dentro del tramo del río, y designa la clasificación según los porcentajes de la Fig. 2.4 (Salas, 2021).
- **Causa del confinamiento:** se calcula de forma semi-automatizada por inspección visual de las imágenes satelitales, el modelo de elevación digital y las herramientas SIG. Utilizando el polígono de contacto entre el canal activo y la llanura de inundación obtenido con anterioridad, este se intersecta con la línea del borde del VB, para trabajar con elementos de línea en lugar de polígonos, sobre esta línea de contactos se crea una nueva columna que identifica la causa del confinamiento, se definen tres opciones, confinado por valle, confinado por forma en planta y confinado por infraestructura (Fig. 2.4), se completa la

información analizando las imágenes satelitales en conjunto con el DEM. Posteriormente, se calcula el largo de la línea (categorizada según la causa de confinamiento) y se agrega la información en cada segmento que posee un confinamiento total o parcial. Cuando existe más de una causa de confinamiento en un segmento, se prioriza aquella con mayor longitud (Salas, 2021).

- **Forma en Planta:** se utiliza la misma agregación que tuvo anteriormente, ya que al tratarse de un atributo que participó en la definición de los segmentos, posee una agregación igual o mayor a los segmentos, por lo que solo es necesario disolver los DGO y luego intersecar esta capa con la segmentación para obtener la misma codificación.

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 en base a estimaciones a través de imágenes satelitales o mediante la adquisición de tomas de muestra en terreno para determinar su granulometría y tipo de suelo, siguiendo la clasificación que se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3. 4: Tamaño de las partículas de material del lecho. Basado en escala granulométrica de Wentworth (1922).

Clase	Tamaño (mm)
Roca	-
Bloques	>256
Bloques y cantos rodados	>64
Cantos rodados	64 -256
Grava	2-64
Arena y grava	0,00625 - 64
Arena	0,0625 - 2
Material fino	<0,0625

- **Unidades geomórficas (UG):** se refiere a las UG en el lecho del río, como islas y barras de todo tipo, y en la llanura de inundación, como paleocauces, meandros cortados, entre otros. Para obtener la matriz del procedimiento *River Styles*, estas UG se desagregan mediante intersección con el VB desagregado y se identifican con el código DGO. Se evalúa la presencia de cada UG en los DGO con un atributo binario (1/0), donde una

presencia superior al 10% del área de la envolvente se considera (1), de lo contrario, es (0). A nivel de segmento, si más del 30% de los DGOs presentan el atributo, el tramo del río se clasifica como significativo (1), de lo contrario, es no significativo (0).

Si solo se requiere conocer la presencia de UG en un área específica (área de estudio), basta con ejecutar la herramienta *Holistic Segments* del SRT, que utiliza la envolvente del canal activo, su línea central y el UG en cuestión, para generar una polilínea que indica con un atributo binario (0 para ausencia y 1 para presencia) la existencia de la UG requerida. De esta manera, se obtienen los tramos con ausencia de UG, con presencia de barras, con presencia de islas y los que presentan tanto de barras como islas, mediante la intersección de ambas.

3.4.1. Algoritmo de Clasificación

El conjunto de atributos a escala de segmento descritos en el apartado anterior se ordena en una matriz implementada en Excel, que referencia el número de segmentos en sentido ascendente desde aguas arriba hacia aguas abajo, y para cada segmento se asigna el valor del atributo. En este punto es necesario tener una codificación para cada métrica, ya que el algoritmo que designa los estilos de río solo acepta valores numéricos. A continuación, la tabla es exportada al *software* QGIS para realizar la unión de atributos con un elemento de línea, en este caso se utiliza la línea central del VB segmentado. Finalmente, se aplica el algoritmo de “Agrupamiento” desarrollado en ArcGIS, el cual utiliza la polilínea con todos los atributos. Así el programa aplica una clasificación no supervisada (*cluster*) y entrega una codificación de RS para cada combinación de atributos posible. Para tener una visión más general, se agrupa en un RS principal, que contempla los cuatro primeros atributos del árbol procedimental y luego se realiza una subclasificación, que incluye las unidades geomórficas (Salas, 2021).

4. RESULTADOS

4.1. Procesamiento de Imágenes Satelitales y Obtención de Objetos Geográficos Unitarios (UGO)

Cada uno de los UGO fue obtenido para las tres escenas en estudio, vale decir, 2013, 2018 y 2023, a excepción de la llanura de inundación, la cual se utilizó la extraída por Carrasco (2023) correspondiente al año 2019, ya que esta no sufre variaciones significativas en su extensión (Ver ANEXO 4.1).

Los primeros objetos en ser obtenidos a través del procesamiento y análisis espectral de imágenes satelitales son el canal activo y su envolvente. Las imágenes seleccionadas buscaron representar épocas del año con similar comportamiento hidrológico, con caudales que rondan entre los 20 y 30 m³/s, según las estaciones fluviométricas de Tucapel, Saltos del Laja y Puente Perales. Aunque todas estas imágenes se capturaron durante períodos de aguas bajas en el sistema fluvial, en algunos casos se complementó el análisis con imágenes de aguas altas para un enfoque más detallado a nivel de barras. El resultado de este procesamiento se muestra en la Fig. 4.1, la cual exhibe una zona media del segmento en estudio, cercano al sector Saltos del Laja.

La escena con mayores problemas de detección del canal activo es la correspondiente al año 2013, donde el programa no logra diferenciar con precisión los cuerpos de agua con las plantaciones agrícolas. Esto puede tener múltiples factores, por ejemplo, una resolución espectral limitada, problemas con la reflectancia, contaminación atmosférica, errores en corrección radiométrica, o mala calibración del sensor remoto a la hora de la toma de imágenes, por nombrar algunos. En ese sentido, este escenario requirió de un mayor depurado para eliminar zonas aledañas que no fuesen parte del canal activo, así como también para delimitar contorno de este. Vale decir que, por su ubicación, el problema persiste para todo el tramo en estudio, ya que este se encuentra rodeado en su mayoría de plantaciones agrícolas.

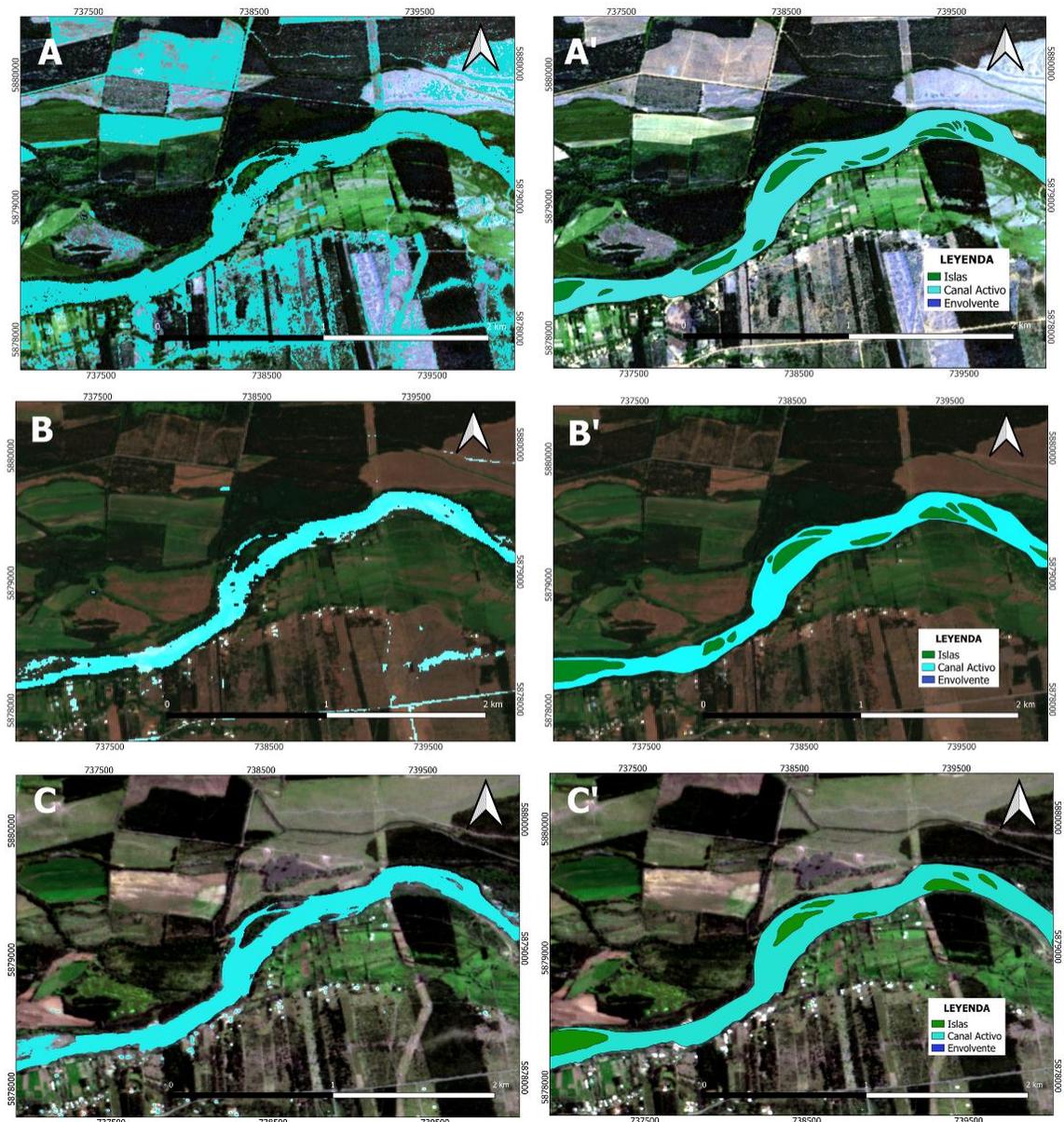


Fig. 4.1: Imágenes satelitales de una misma sección del río Laja. En A, B y C se muestra el procesamiento mediante el índice NDWI para las escenas de 2013, 2018 y 2023, respectivamente. En A', B' y C' se observa cada una de estas escenas posterior a ser depuradas y con el canal activo, su envolvente y las islas ya delimitadas.

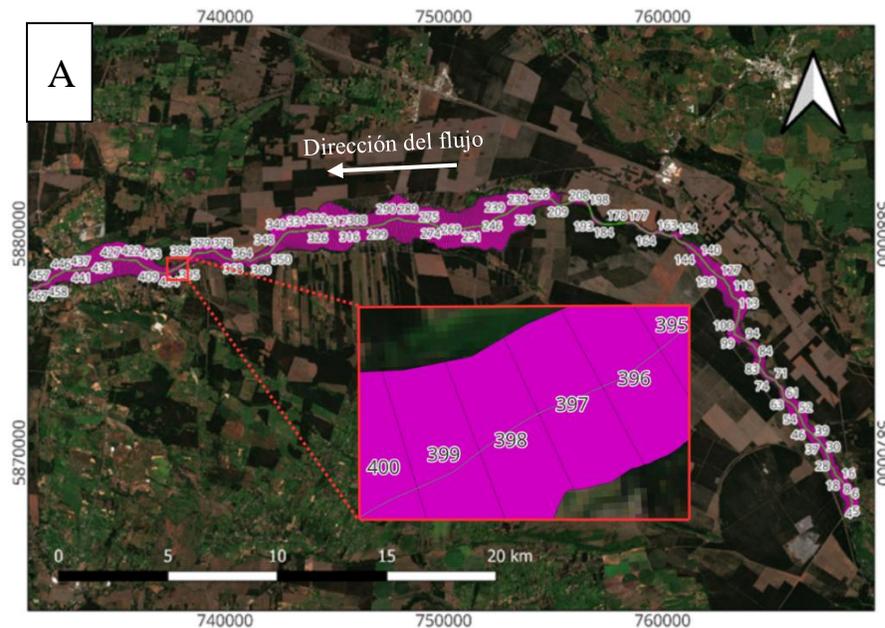
En cuanto al segundo mosaico, a pesar de que este es el de menor resolución espacial (10m), posee menos problemas que el primero para diferenciar las zonas con vegetación y las zonas cubiertas por agua. En ese sentido, el desafío que presenta está en línea con su resolución, ya que al poseer un pixelado de 10x10 metros, los contornos tanto con la llanura de inundación como con las islas y barras suele ser difuso e impreciso. Esto requiere igualmente un tratamiento manual para corregir y delimitar correctamente los diferentes objetos geográficos unitarios.

Finalmente, el tercer mosaico de imágenes, correspondiente al año 2023, es el que presenta menos problemas en su procesamiento, y la vectorización a partir del análisis NDWI resulta casi automatizada. Esto puede deberse, en parte, a la combinación de una muy buena resolución espacial (3m) con un amplio rango espectral.

Por último, una vez realizado el procesamiento con imágenes satelitales y posterior depurado de los cuerpos de agua, se procede a la vectorización de las capas resultantes. Es así como se obtiene la envolvente del canal activo y las islas (Fig. 4.1). Posteriormente, el canal activo se obtiene mediante el procesamiento de las capas previas utilizando herramientas de geoprocreso.

4.2. Objetos Geográficos Desagregados (DGO): Segmentación

La Fig. 4.2 muestra a la llanura de inundación segmentada cada 100 metros sobre su línea central. Considerando una dirección desde aguas arriba hacia aguas abajo, se obtuvieron un total de 791 segmentos DGO, partiendo desde el Puente Río Laja en la comuna de Tucapel, hasta el Puente Ferroviario Laja, que une las comunas de San Rosendo con Laja, en la zona de confluencia con el Río Biobío.



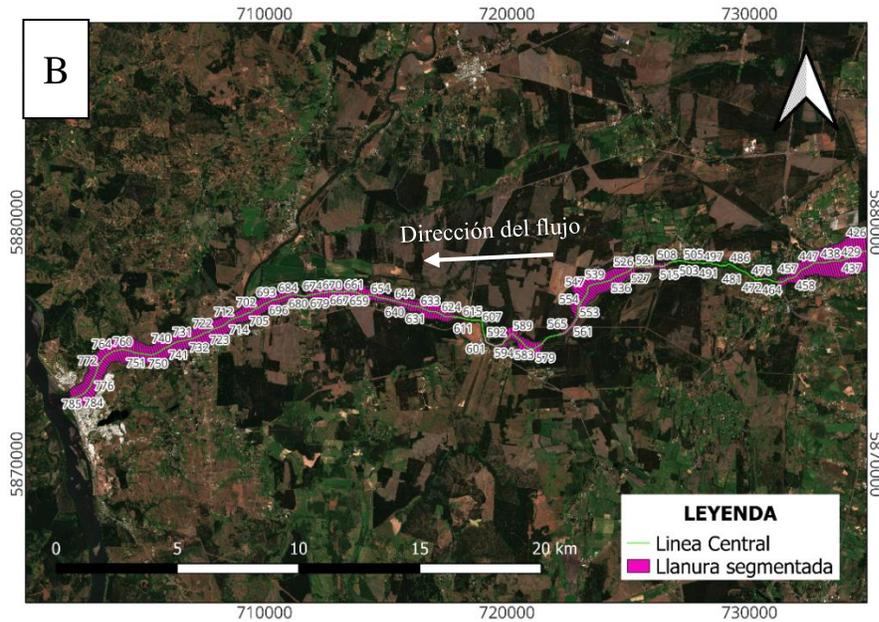


Fig. 4.2: Imagen satelital de *Sentinel-2* capturada el año 2018 que muestra la llanura de inundación discretizada en 791 segmentos de 100 metros de longitud. La imagen A corresponde a la zona oriental y la imagen B a la zona occidental del tramo en estudio. El recuadro en rojo corresponde a un *zoom* para observar en mayor detalle.

4.3. Métricas a Nivel de Cuenca

Las métricas presentadas a continuación se analizan a nivel de cuenca, buscando así obtener una visión general y realizar un análisis holístico que permita comprender de manera integral el funcionamiento hidrológico del corredor fluvial en su conjunto. Los cálculos de las métricas, a nivel de cuenca, han sido extraídas de la tesis de pregrado de Carrasco (2023), siguiendo la metodología detallada en la sección 3.3.3.

- **Área de drenaje, elevación y pendiente:**

En términos de elevación, la región se encuentra a una altura cercana a los 1.200 m s.n.m., en las proximidades del sector de la Laguna Laja. La variación altimétrica sigue una tendencia que se asemeja a una curva exponencial decreciente (Fig. 4.3), con una pendiente más pronunciada en la primera mitad del tramo del río. Dicha pendiente se suaviza continuamente aguas abajo, con la excepción de los 105 km, donde se observa una abrupta caída que coincide con la presencia de la cascada de los Saltos del Laja. Finalmente, la elevación desciende a aproximadamente 80 m s.n.m en la zona de confluencia con el río Biobío, resultando en un desnivel total de alrededor de 1.100 m.

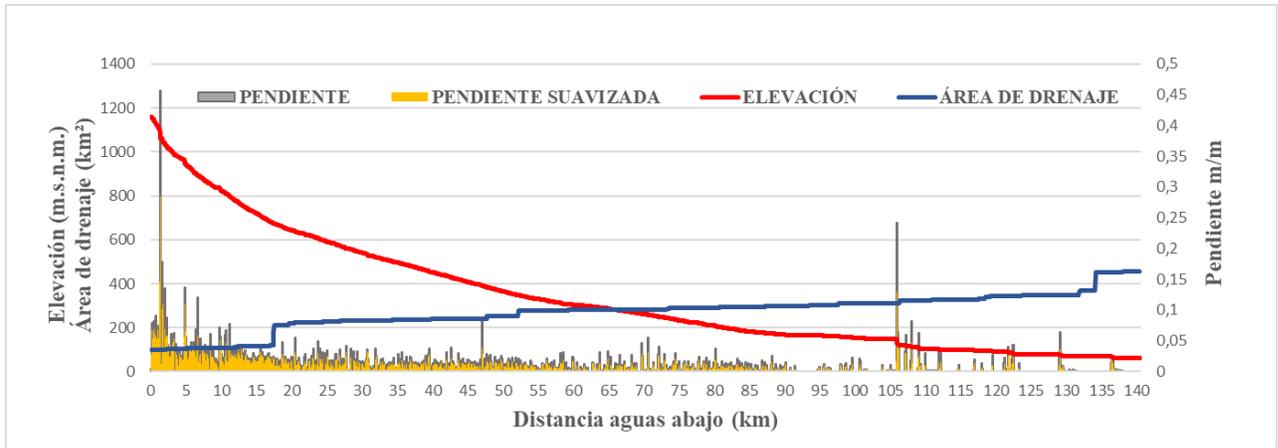


Fig. 4.3: Gráfico que relaciona elevación, pendiente y área de drenaje con la distancia aguas abajo del río Laja (eje X). El eje Y izquierdo muestra los km de elevación y del área de drenaje, mientras que el eje Y derecho representa la pendiente en m/m. Imagen tomada de Carrasco (2023, en preparación).

En relación con la pendiente, esta alcanza su valor máximo de en la naciente del río, lo que se correlaciona con su origen en la zona montañosa de la Cordillera de Los Andes, específicamente en las laderas del volcán Antuco. Luego, la pendiente tiende a disminuir aguas abajo, experimentando solo un aumento en el tramo del Salto del Laja, donde la caída abrupta del agua provoca, al contrario que con la elevación, un incremento pronunciado en la pendiente.

Finalmente, en lo que respecta al área de drenaje (AD), en la región cordillerana, esta abarca alrededor de 100 km² y exhibe un crecimiento relativamente lineal, con variaciones que coinciden principalmente con las confluencias de afluentes. La primera confluencia de importancia se presenta a los 18 km del recorrido del cauce, con el río Polcura, el cual evacúa sus aguas desde el norte, duplicando el área a aproximadamente 200 km². Luego, el área aumenta de manera gradual aguas abajo, y al llegar a los 50 km, se encuentra con el tributario del río Rucue procedente del sur, elevando el AD a alrededor de 280 km². La expansión continúa de manera constante, atravesando todo el Valle Central de Chile, hasta que a unos 7 km de la confluencia con el Biobío, recibe las aguas del río Claro desde el norte, marcando el segundo incremento más significativo en el AD y superando los 430 km² de área drenada total.

- ***Stream power y stream power specific:***

El cálculo del *stream power* permite identificar tramos específicos del río donde se registra una notable capacidad de disipación de la energía del flujo de agua a lo largo del lecho. Esta energía ejerce una influencia significativa en la capacidad del flujo para erosionar y transportar sedimentos; en términos generales, un aumento en el *stream power* suele indicar una mayor capacidad de transporte de sedimentos.

La Fig. 4.4 presenta la potencia de la corriente específica calculada cada 20 m sobre la línea central de la envolvente del canal activo. Carrasco (2023) no utiliza el caudal *bankfull* a lo largo del corredor fluvial, ya que este dato requiere mucho tiempo de análisis y dificultad para la toma de datos en terreno, por lo que se utiliza una ecuación empírica basada en el caudal promedio y el área de drenaje. Sin embargo, esta aproximación presenta desafíos, ya que la cuenca no es homogénea. La potencia de corriente específica se considera "gruesa", utilizándose más para comparar zonas dentro de la cuenca que para realizar comparaciones con otros ríos (Salas, 2021).

A lo largo del corredor del río Laja, se han identificado hasta ocho secciones que presentan un *peak* en el valor de la potencia de corriente (Fig. 4.4). Los primeros cinco puntos se encuentran fuera del área de estudio, en los primeros 20 km del curso fluvial, donde se localiza la zona más elevada de la cuenca. Estos valores se explican principalmente por la pronunciada pendiente de este tramo inicial (ver Fig. 4.3). Además, la presencia de elementos naturales y artificiales contribuye a explicar valores elevados en secciones específicas, como en la sección 2 del río (Fig. 4.4), donde se encuentra el valor más alto de todo el corredor debido al Salto Las Chilcas. El tramo 3 (Fig. 4.4) se explica por la presencia de un embalse y represa artificial, que modifica el cauce y provoca un desnivel y confinamiento significativos, resultando en valores elevados.

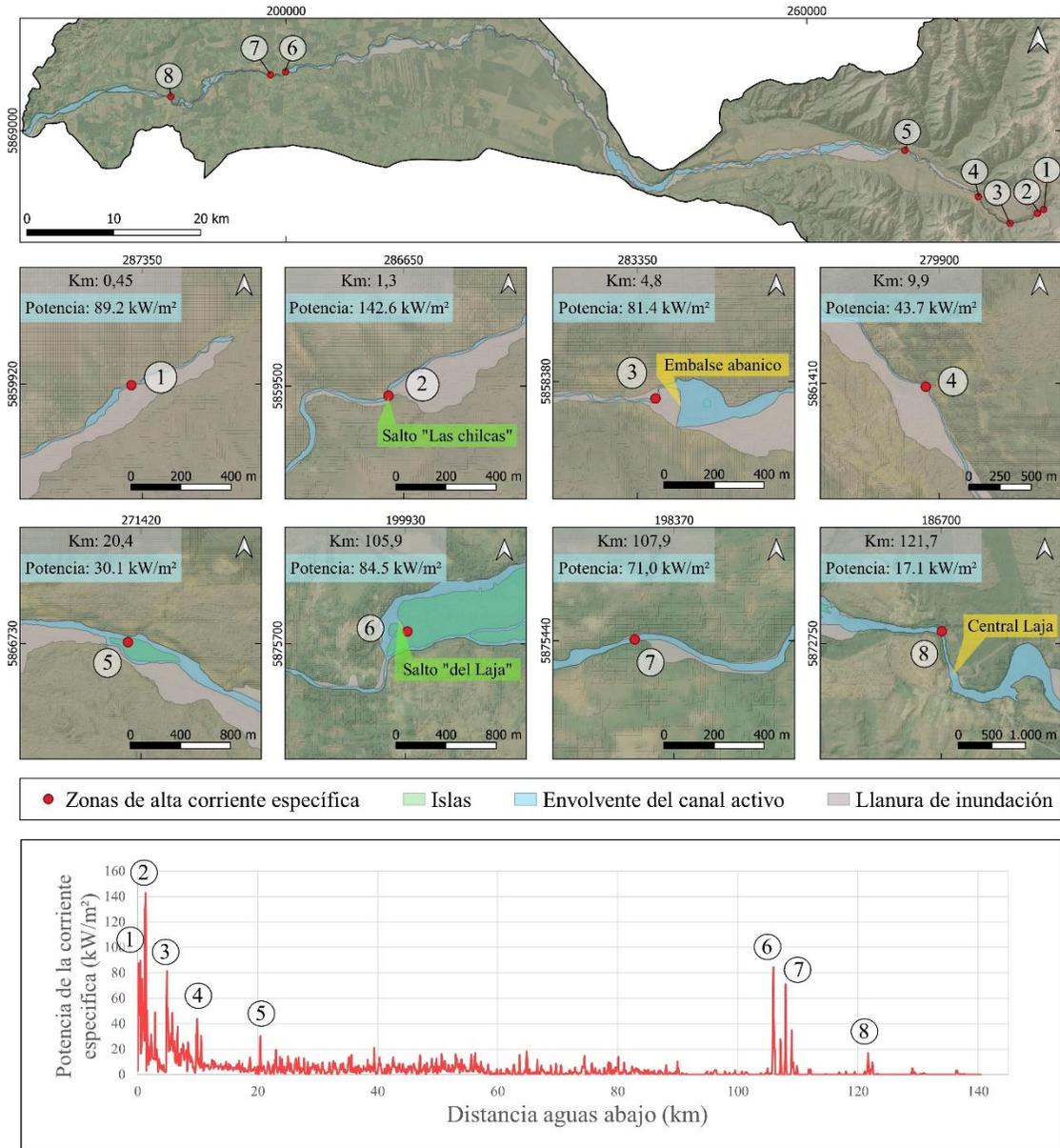


Fig. 4.4: Gráfico del *stream power specific*. En la parte superior se muestra un mapa de la cuenca completa del Laja que contiene puntos donde la potencia de corriente específica es considerablemente mayor. Estos puntos se muestran a mayor detalle en los recuadros debajo del mapa principal. En la parte inferior se presenta el gráfico de la potencia de la corriente específica v/s la distancia aguas abajo, e incluye cada uno de los puntos con su respectivo *peak* mostrados en el mapa. Imagen tomada de Carrasco (2023, en preparación).

Dentro del área de estudio, los valores tienden a situarse por debajo de los 20 kW/m², principalmente debido a la baja pendiente del Valle Central, a pesar de contar con un mayor caudal, predominando la depositación de sedimentos. Esto es observable por el incremento en la presencia de UG como barras laterales, puntuales e islas. Sin embargo, hay tres tramos

(6, 7 y 8) con un mayor poder de arrastre. El tramo 6, ubicado en la zona del Salto del Laja, representa el valor más alto en la parte media-baja de la cuenca. El tramo 7, a dos kilómetros del punto anterior, se correlaciona con un estrechamiento y confinamiento pronunciados del cauce principal. Por último, la sección 8, aunque posee un potencial relativamente bajo, es considerablemente más elevada que lo normal en la zona baja, debido a la presencia de la Central Laja y su represa, que provocan modificaciones y un mayor potencial de arrastre justo después de ésta.

4.4. Métricas a Escala del Área de Estudio

4.4.1. Ancho de los DGO

Lo primero que se obtiene es el ancho de la llanura de inundación, una métrica calculada a nivel de segmentos (DGO), donde se extrae el ancho promedio de cada uno de estos segmentos, de 100 metros de longitud. Una vez obtenido el ancho de la llanura, se procede a intersectar esta llanura segmentada con el polígono del canal activo, de manera que se cuente con ambos polígonos correlacionados. El resultado de este proceso se puede observar en la Fig. 4.5.

A partir del gráfico, se pueden identificar zonas en las cuales el ancho del canal activo se aproxima al ancho de la llanura de inundación, por ejemplo, a partir de los 47 km. Este tramo corresponde a la zona cercana a los Saltos del Laja, donde el cauce muestra un mayor grado de confinamiento debido a la incisión del terreno, creando laderas que restringen el canal activo. En contraste, aguas arriba se observa una situación opuesta, especialmente entre los 20.000 y 45.000 m, donde la llanura se extiende lateralmente, desplazando el canal hacia la zona sur de la llanura. Adicionalmente, se puede realizar una comparativa entre los tres periodos de tiempo analizados, cuyo ancho se mantiene relativamente constante, salvo específicas excepciones como a los 25 km, donde el ancho del canal activo más actual (2023) experimenta un ensanchamiento casi del doble de metros respecto al de los periodos anteriores.

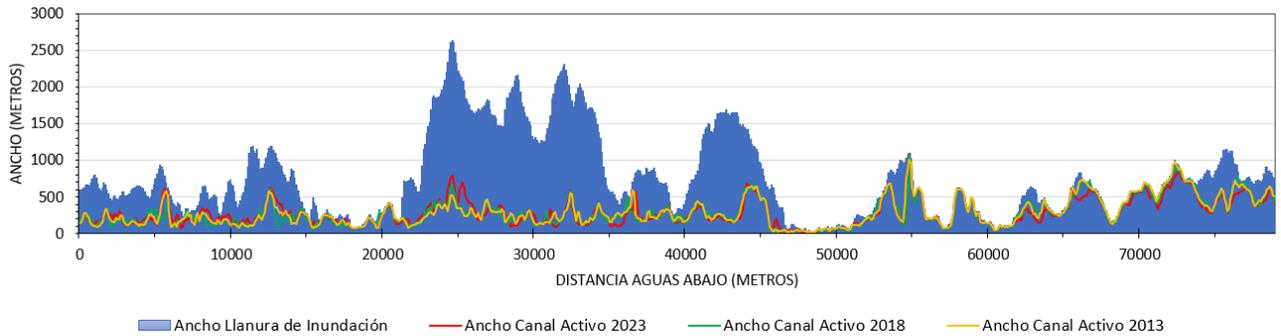


Fig. 4.5: Gráfico que muestra un comparativo entre el ancho de la llanura de inundación (barras azules) y el ancho del canal activo para el año 2013 (líneas amarillas), 2018 (líneas verdes) y 2023 (líneas rojas).

4.4.2. Sinuosidad Local

Se decidió realizar la extracción de la sinuosidad local sólo para una de las tres escenas temporales en estudio, ya que la variación retrospectiva, i.e., 2023 versus 2013, es despreciable en la escala de resolución considerada. La extracción se llevó a cabo para la escena correspondiente al año 2013, ya que estas imágenes cuentan con una muy buena resolución espacial.

En la Fig. 4.6 presenta un gráfico que ilustra la sinuosidad local a lo largo de todo el tramo de estudio, desde aguas arriba a aguas abajo. Los diferentes tipos de sinuosidad, como se definen en la Tabla 3.2, se distinguen mediante el uso de colores. Además, se realiza un *zoom* a un área específica, ubicada aproximadamente a la mitad del tramo de estudio, que se destaca por ser el único tramo que posee el estilo de sinuosidad meándrica.

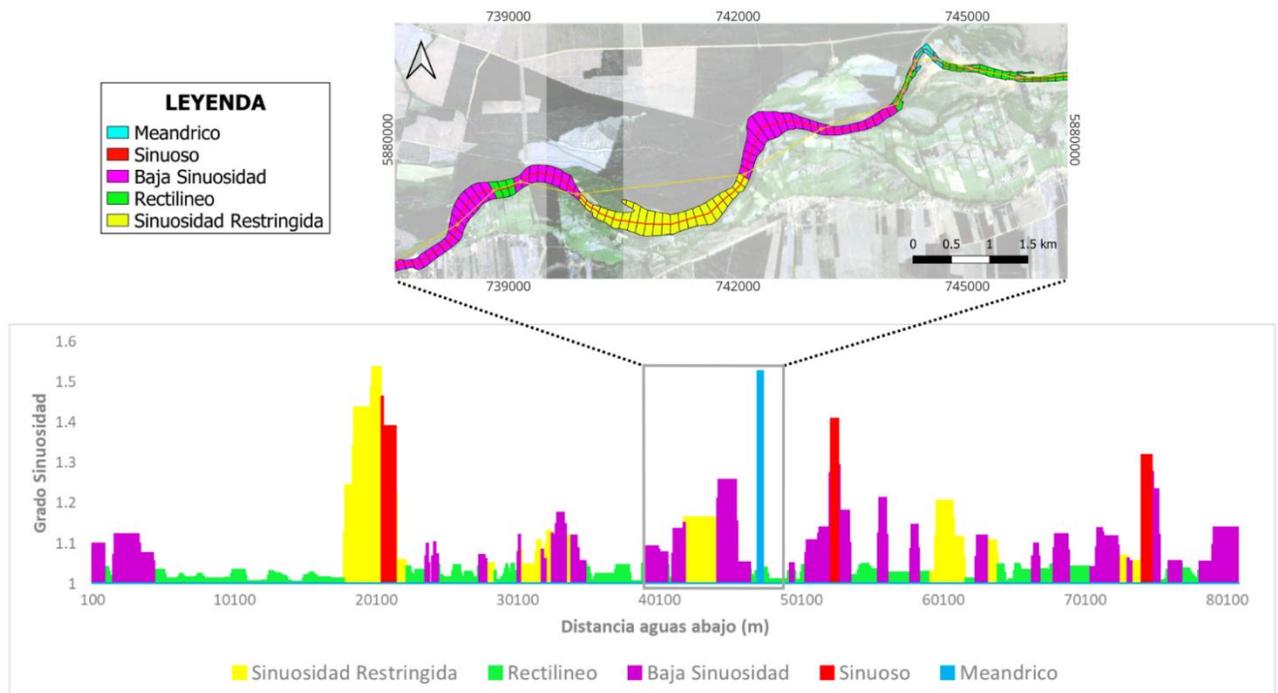


Fig. 4.6: Gráfico con los distintos grados de sinuosidad a lo largo de todo el corredor fluvial en estudio, desde aguas altas a aguas bajas. El recuadro resaltado sirve de *zoom* a un área específica del río que muestra los puntos de inflexión utilizados y las rectas que los unen, a partir de los cuales se construye la métrica de sinuosidad. Además, esta sección posee la particularidad de ser la única zona que alberga un tramo de sinuosidad meándrica.

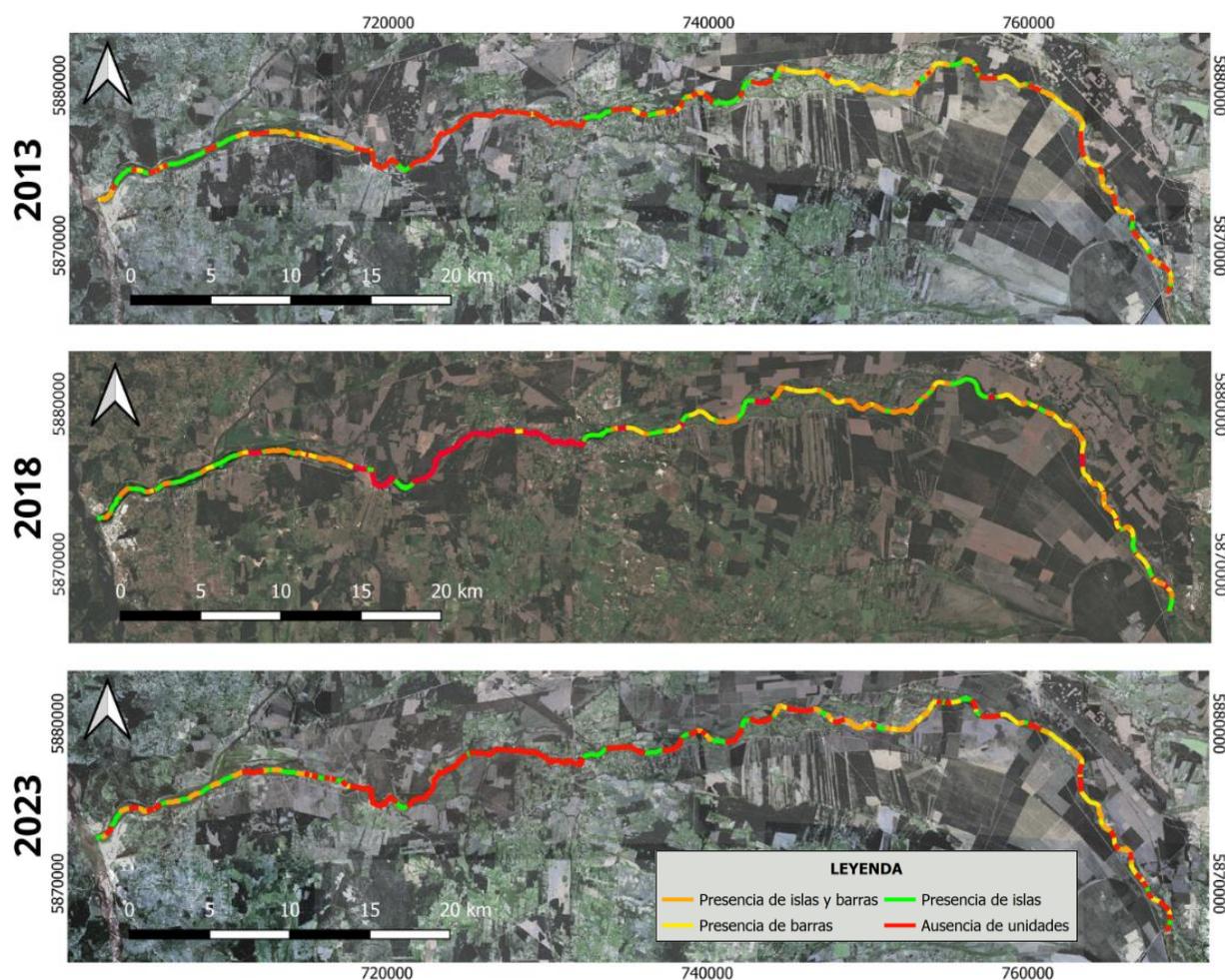
Para el cálculo de la sinuosidad en el área comprendida entre San Rosendo y Tucapel (Fig. 4.6), se obtuvieron 265 puntos de inflexión en un total de 263 tramos en que fue dividida la línea central con su respectivo valor de sinuosidad local (Ver Tabla 3.2). Al intersectar estos tramos con los DGO, se obtuvo que de los 808 DGO considerados según la segmentación cada 100 m. La mayoría se distribuyó entre tramos rectilíneos y de baja sinuosidad, con 393 y 256, respectivamente. En contraste, los segmentos sinuosos (22) y meándricos (4) sólo sumaron 26 entre ambos, lo que evidencia un predominio de distribución longitudinal, por sobre un desplazamiento transversal a lo largo del cauce fluvial. Por último, para el caso de los tramos con sinuosidad restringida, los cuales fueron determinados mediante una observación manual, basada en el ancho del canal activo y el ancho de la llanura de inundación, y considerando la recta que une los puntos de inflexión, se obtuvo que 133 segmentos cumplen con esta característica de alto confinamiento con desplazamiento transversal lo suficientemente amplio como para superar los límites de la llanura.

4.4.3. Presencia y Evolución de las Unidades Geomórficas (UG)

En la Fig. 4.7 se presenta el análisis multitemporal (2013, 2018 y 2023) de la presencia y ausencia de UG (islas y barras) en el área de estudio. El sector de Tucapel, más aguas arriba, exhibe una diversidad considerable en la presencia de barras, principalmente laterales, e islas, como también con ausencia de estas en algunos tramos. Es relevante notar que las barras laterales son predominantes en esta región, fenómeno que podría vincularse con la alta sinuosidad del área. Es un tramo que se ha mantenido relativamente estable con los años, salvo sectores específicos, donde se han perdido algunas barras, aumentando levemente los tramos con ausencia de unidades para el año 2023. En la sección media-alta del área de estudio, es donde se ven las mayores variaciones temporales, lo que coincide con las zonas de mayor migración lateral (ver figuras 4.8 y 4.9). Si bien esta área destaca por la presencia frecuente de barras medianas en conjunto con islas, es también la zona donde más se pierden estas barras para el año reciente, reemplazadas en su mayoría por secciones ausentes de unidades. La zona media-baja en estudio (Saltos del Laja), es la que presenta mayor estabilidad en el tiempo, predominando la ausencia de unidades producto del entallamiento del río, salvo pequeñas excepciones como algunas islas habitadas en el sector de la cascada. Hacia la zona baja, pasado el Puente Perales, se observa la coexistencia de barras (laterales y medias) e islas en similar proporción, sin embargo, gran parte de las barras desaparecen para 2023, ya sea por erosión o por el desarrollo de vegetación, transformándose en islas. Los últimos kilómetros hasta la desembocadura también son relativamente estables con la presencia dominante de las islas.

A nivel temporal, y en rasgos generales, según se evidencia en el gráfico de la Fig. 4.7, las variaciones sugieren una disminución marcada en la presencia de barras, siendo más pronunciada entre 2013 y 2018 y menos evidente entre 2018 y 2023. Lo mismo ocurre con los tramos con presencia simultánea de barras e islas, pero con una disminución más leve. Estos cambios pueden interpretarse de dos formas: como una respuesta a la inestabilidad morfológica debida al aumento del poder erosivo, resultando en la desaparición de barras, o como una estabilidad duradera que permite el desarrollo de vegetación en las barras, transformándolas en islas. Aparentemente, ambos fenómenos coexisten simultáneamente en distintas zonas; por ejemplo, en los primeros tramos, se observa una erosión y pérdida significativa de barras, mientras que en la zona media a baja, más

estable, se evidencia un notorio crecimiento de vegetación y aparición de islas, cubriendo lo que antes se consideró como barra, lo cual se refleja en el aumento de la presencia de islas indicado en el gráfico. En el caso de la erosión, se observa un incremento en la ausencia de ambas UG en los últimos años, llegando al 37% en 2023, es decir, un crecimiento de 7 puntos porcentuales respecto a 10 años antes. Es importante destacar que estos cambios pueden estar relacionados a las épocas del año de la toma de imágenes y su régimen respectivo (aguas altas y bajas), especialmente la más reciente, capturadas durante el mes de septiembre, poco después de la ocurrencia de dos intensos temporales en la zona, tal como se discute en el apartado 5.3, lo que probablemente influyó en la modificación tanto de barras como de islas, incluida la erosión de la vegetación de estas últimas.



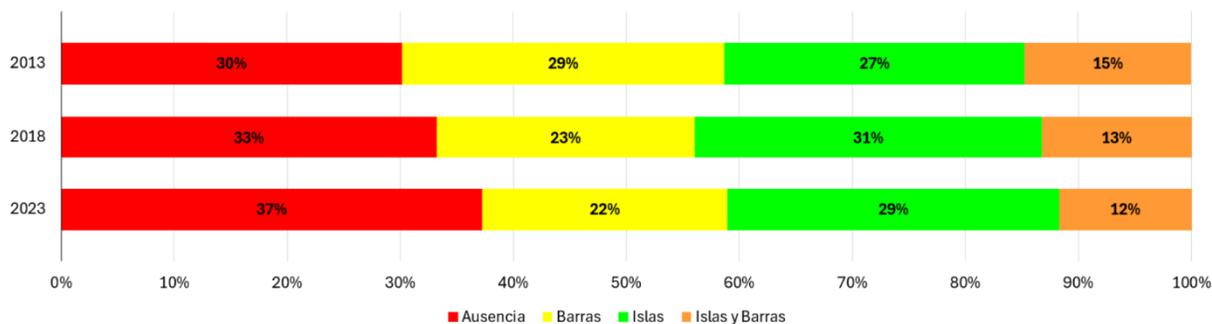


Fig. 4.7: Análisis multitemporal de la presencia de UG. En la parte superior se muestra el tramo de estudio en las 3 series temporales (2013, 2018 y 2023) con el tramo coloreado según su estado respectivo. Abajo se muestra un gráfico de barras de cada año representado, con los porcentajes respectivos a cada una de las condiciones.

4.4.4. Determinación de la Tasa de Migración Lateral Anual: Nuevo Enfoque Propuesto

Como se explicó en la metodología, la nueva manera de calcular la Tasa de Migración Lateral Anual dio como resultado dos polígonos de migración aguas abajo, con respecto a la línea central del canal activo (Fig. 4.8 y 4.9), en donde cada polígono representa la migración hacia la derecha (azul) o izquierda (rojo), respectivamente. Estos gráficos ilustran el proceso de migración a lo largo de un período total de 10 años, dividido en dos segmentos temporales de 5 años cada uno: 2013-2018 (Fig. 4.8) y 2018-2023 (Fig. 4.9).

Para la determinación de la tasa de migración, en el primer periodo (2013-2018, Fig. 4.8), se obtuvieron 293 polígonos, cada uno delimitado por las intersecciones de las líneas centrales del año 2013 y 2018. De este total, 147 polígonos reflejan un desplazamiento a la derecha del cauce (barras en azul) de referencia inicial, mientras que los restantes 145 lo hicieron hacia la izquierda (barras en rojo). Sin embargo, si consideramos el área total abarcada por los polígonos, según su dirección de desplazamiento, el resultado muestra una leve superioridad del área cubierta por los tramos que migren hacia la izquierda, con 479.620 m² sobre los 463.976 m² de los polígonos con migración diestra, lo cual totaliza un área de 943.596 m².

Tasa de Migración Lateral Anual Periodo 2013-2018

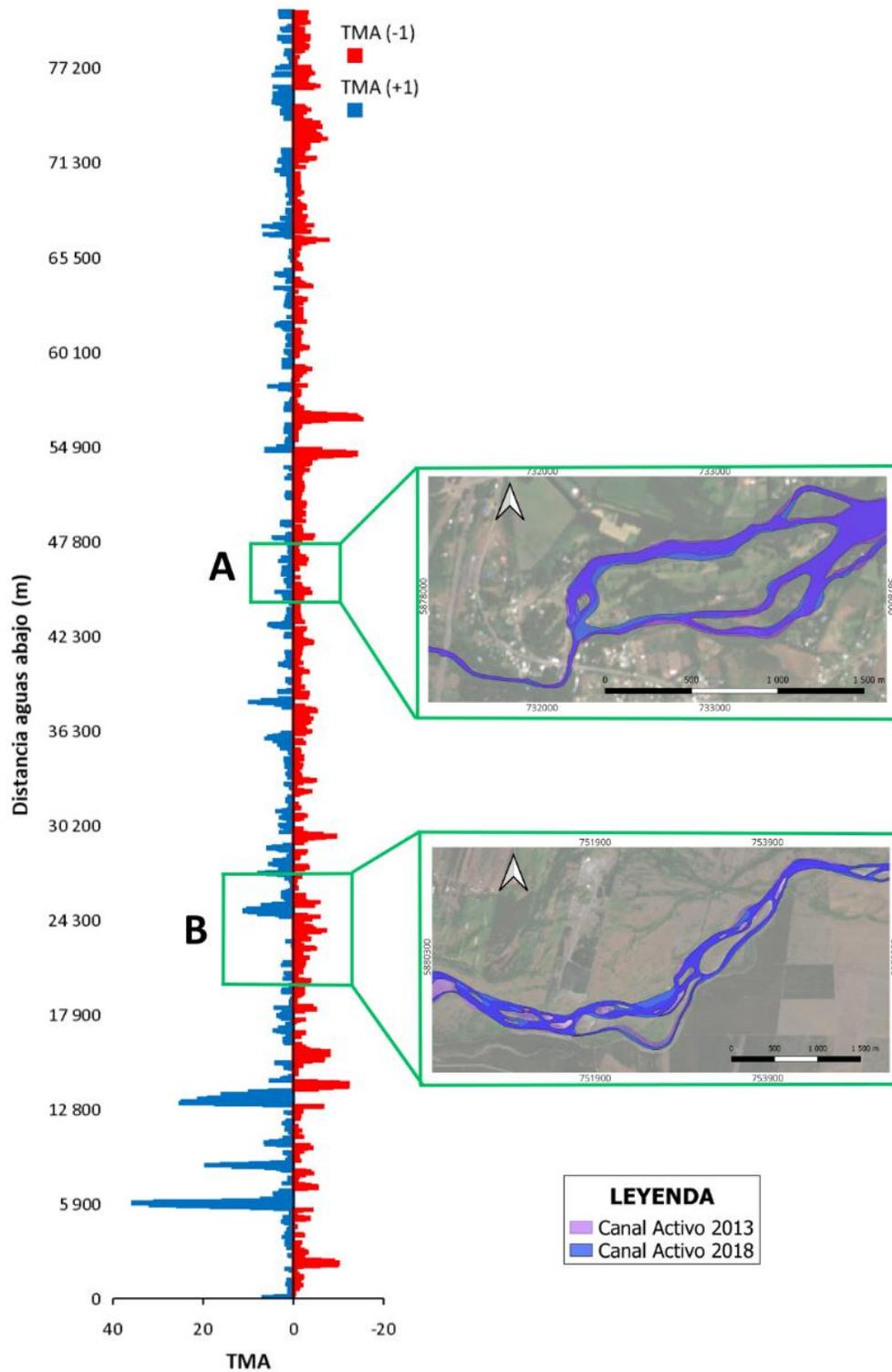


Fig. 4.8: Gráfico de barras que muestra la tasa de migración anual para el periodo 2013-2018. El recuadro en verde A representa un área con bajo tasa de migración anual (TMA), mientras que el recuadro en verde B representa un área con alto TMA.

Por su parte, el segundo periodo (2018-2023, Fig. 4.9) arrojó 262 polígonos, 131 para cada lado. En este caso, el área total de migración abarcada es bastante superior a la del periodo anterior, con 1.631.200 m². Nuevamente es el lado izquierdo el que cubre una mayor área con 828.024 m² versus 803.176 m² del lado diestro. Estos números evidencian un notable aumento en la tasa de migración para el segundo periodo de estudio, lo que también se puede reflejar comparativamente en el aumento de intensidad de los *peaks* en los valores negativos durante el periodo 2018-2023.

Ambos gráficos cuentan con dos recuadros en verde que funcionan como un acercamiento a áreas específicas del corredor fluvial. Para ambos periodos de tiempo se compararon las mismas secciones, escogidas por la diferencia en el comportamiento de la migración lateral de cada una. Mientras que las imágenes A y A' muestran el tramo conocido como Saltos del Laja, donde se evidencia una alta estabilidad tanto para el periodo 2013-2018 (A) como el periodo 2018-2023 (A') debido al confinamiento del cauce por las laderas del valle; el tramo B y B', situado aguas arriba del otro, experimenta una variación mucho más importante. Si bien para el periodo 2013-2018 (B) la migración del canal activo no es tan significativa, para el periodo 2018-2023 (B') sufre una modificación migrando hacia el norte, posiblemente como resultado de intervenciones de origen antrópico en las proximidades del cauce. Este cambio se refleja en los *peaks* azules de la Fig. 4.9 en el tramo B', siendo la zona con mayor TMA para ese periodo.

Si consideramos la migración de forma longitudinal, en ambos casos (Fig. 4.8 y 4.9) se observa que, en el primer tramo, comprendido hasta los 30 km desde aguas arriba, existe una mayor variabilidad en la magnitud de la migración lateral del cauce. En contraste, en los tramos posteriores la migración tiende a estabilizarse, salvo excepciones, sobre todo para el intervalo comprendido entre los 55 y 70 km, donde casi no se observa migración lateral a lo largo de los años.

Tasa de Migración Lateral Anual
Periodo 2018-2023

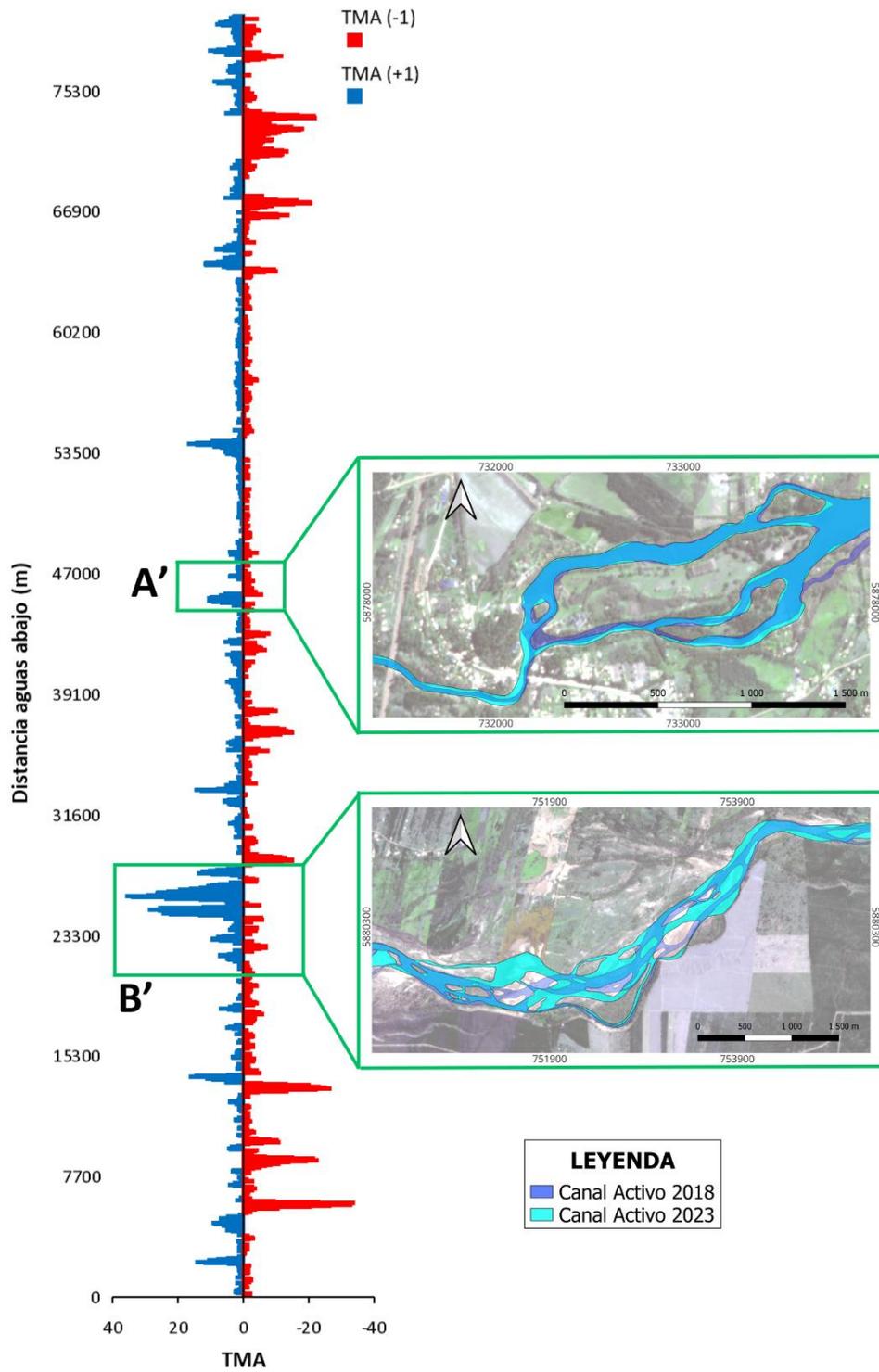


Fig. 4.9: Gráfico de barras que muestra la tasa de migración anual para el periodo 2018-2023. El recuadro en verde A' representa un área con bajo TMA, mientras que el recuadro en verde B' representa un área con alto TMA.

4.5. Objetos Geográficos Agregados (AGO) y Clasificación *River Styles*

Los siguientes atributos corresponden a la etapa de agregación de los objetos inicialmente desagregados, clasificados según diversas métricas como confinamiento y su causa, *planform* y material del lecho. La intersección de estas dos últimas métricas resulta en la obtención de tramos homogéneos (ver ANEXO 4.5), utilizados como unidad base para la categorización de estilos fluviales. La métrica de presencia de UG no se abordará en esta sección, ya que fue descrita con mayor detalle haciendo énfasis en el área de estudio en la sección anterior, de todos modos, si se quiere revisar el resultado a nivel de cuenca y en tramos homogéneos, se encuentra disponible en el ANEXO 4.5 (Fig. A.5). Estos atributos, obtenidos por Carrasco (2023), se presentan aquí para contextualizar la caracterización a nivel de cuenca hidrográfica, con énfasis en la zona de estudio, siguiendo el diagrama de flujo de la Fig. 2.4.

- **Confinamiento y su causa:**

El confinamiento y su causa a lo largo de todo el corredor fluvial es variable. Tanto la zona alta (Fig. 4.10(A)) como la zona baja (Fig. 4.10(G)) de la cuenca se encuentran en mayor proporción confinadas. La causa del confinamiento en la zona alta responde a la morfología de valle que incide en la región cordillerana, principalmente por la ribera norte del río, mientras que el de la zona baja igual es de valle, pero asociado a terrazas fluviales, además de geoformas como barras laterales formadas por la depositación de sedimentos provenientes de las zonas altas. En las zonas medias el grado de confinamiento es menor y la causa del mismo se atribuye a terrazas fluviales y geoformas, con la excepción de la zona de Tucapel, donde la infraestructura de la Central Laja confina artificialmente el cauce.

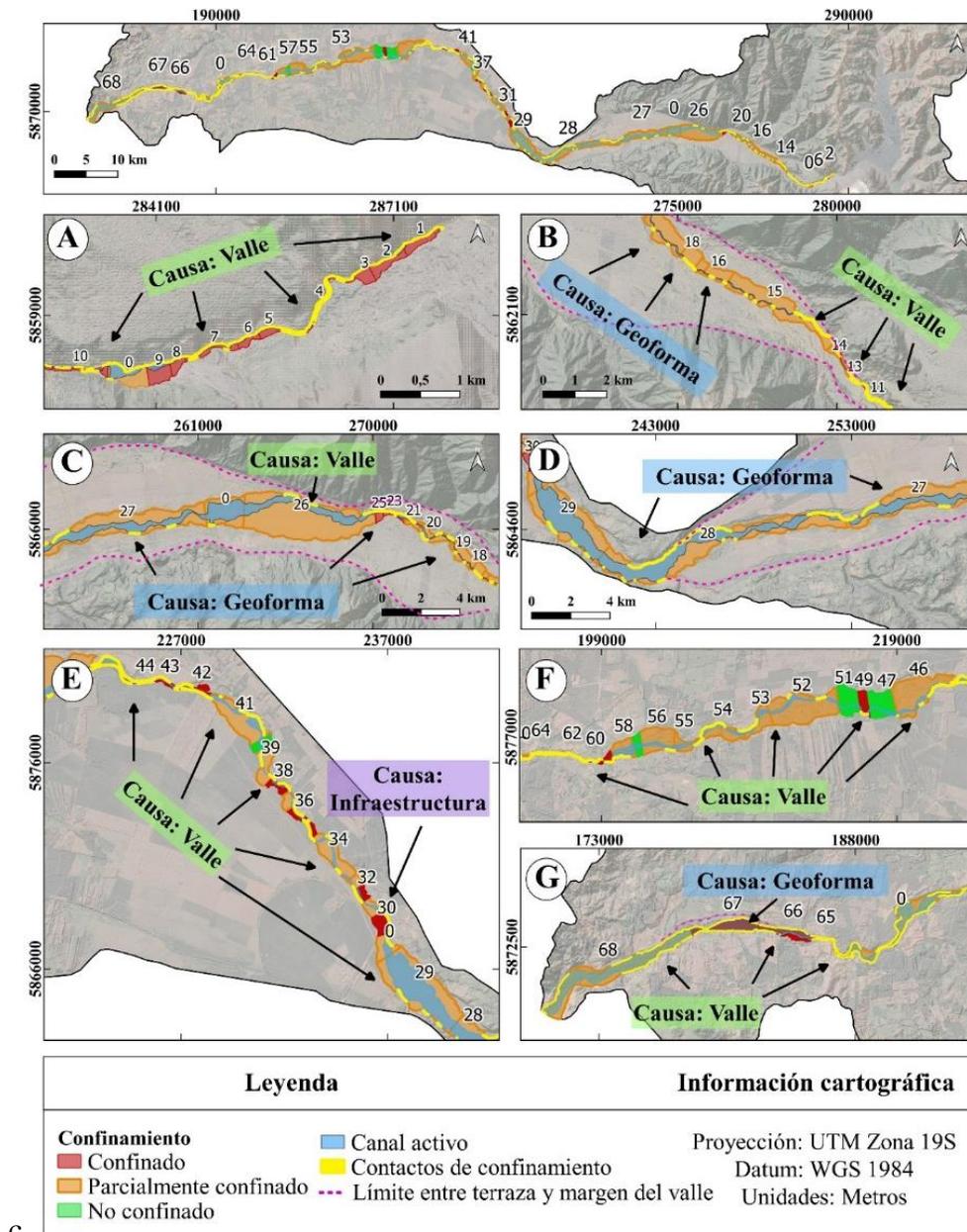


Fig. 4.10: Mapa de la cuenca con el confinamiento y su causa. La numeración creciente de los segmentos indica la dirección del flujo. Imagen tomada de Carrasco (2023).

- **Forma en planta (*planform*):**

Se clasificaron un total de 8 tipos de forma en planta a lo largo del corredor fluvial, de los cuales dos corresponden a multicanal, dos a transicional y cuatro a monocal (Fig. 4.11). Dentro de todos los tipos de forma en planta mostrados en la Tabla 3.3, las variaciones presentes en el río Laja incluyen isla-trenzado, *anabranching*, errante, barras alternas, sinuosidad restringida, sinuoso, baja sinuosidad y recto.

Los primeros 20 km del corredor se caracterizan por comportarse principalmente como monocal, siendo en su mayoría tramos de baja sinuosidad con algunos segmentos rectos, sinuosos y de sinuosidad restringida, además de algunos de transición. Se caracteriza por una baja presencia de barras e islas, y por encontrarse en gran parte confinado morfológicamente a las laderas del valle, lo que limita su capacidad para migrar lateralmente con demasiada libertad. Luego de esta sección inicial, lo sigue un tramo de unos 37 km de multicanal, con un extenso segmento inicial del tipo isla-trenzado, y finaliza los últimos km en *anabraching*, justo hasta el emplazamiento de la central hidroeléctrica Laja. Se distingue por la gran cantidad de barras e islas que dividen el cauce, resultando en mayores anchuras del canal activo, y se benefician por la extensa llanura de inundación que permite su migración lateral. Además, coincide con bajos valores de *stream power specific* (Fig. 4.4) lo que vincula procesos de sedimentación con la formación de barras e islas.

Posterior a la Central, se observa una gran variedad de formas en planta, predominando la errante, de baja sinuosidad e isla-trenzado, respectivamente. Esta zona, nuevamente caracterizado por una amplia llanura de inundación, permite que el o los canales divaguen con cierta libertad, dejando en el camino barras e islas debido a su baja pendiente y poder de arrastre. Aproximadamente a los 110 km de recorrido fluvial, comienza un largo tramo de sinuosidad restringida, caracterizada por un único canal bien encauzado y casi sin presencia de barras e islas. Esta forma en planta se mantiene hasta la altura del Puente Perales, a partir del cual cambia a una de isla-trenzado hasta la confluencia con el río Biobío.

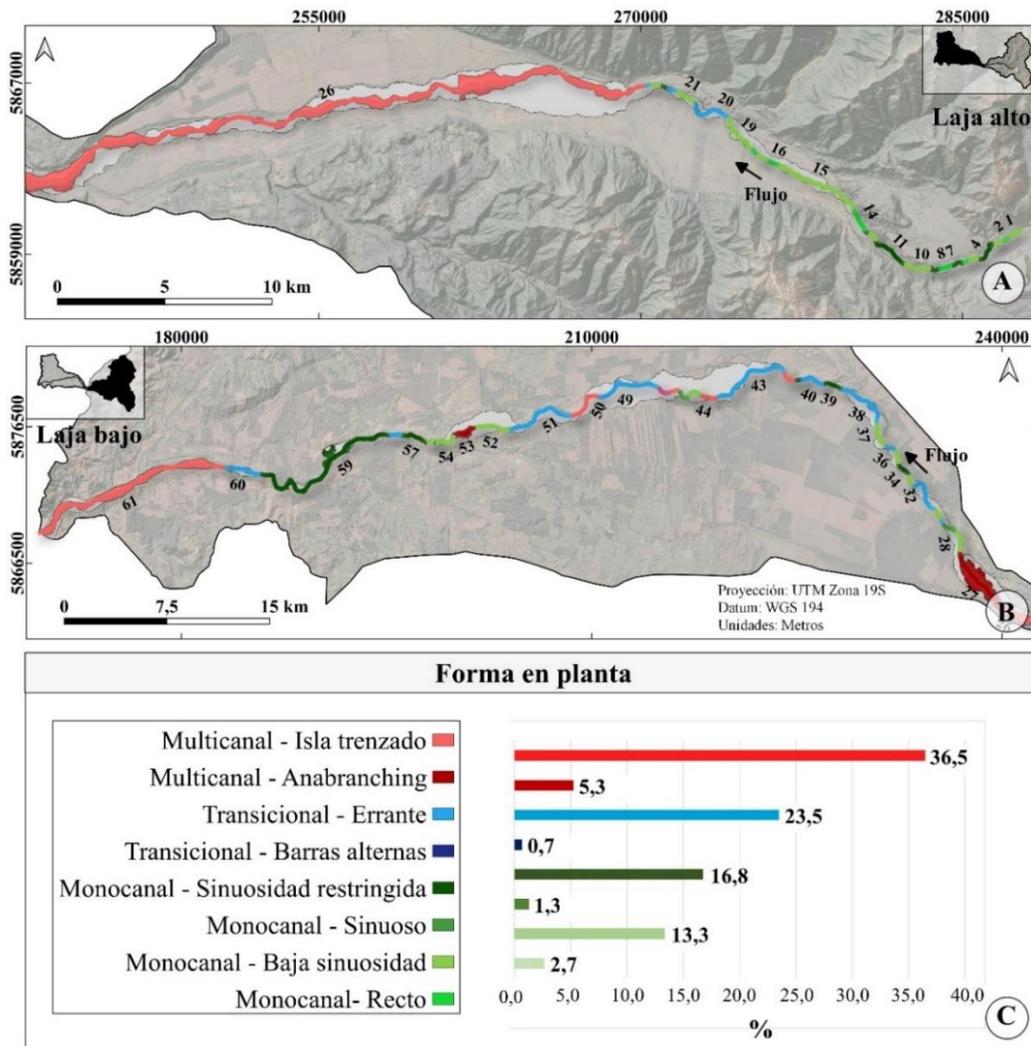


Fig. 4.11: Clasificación según tipos de forma en planta de todo el corredor fluvial. El recuadro B corresponde a los *planform* dentro del área de interés. El recuadro C corresponde a un gráfico con los porcentajes que cubren cada uno de los *planform* total del corredor fluvial. En tonos rojos se muestran los multicanales, en azules los transicionales y en verdes los del tipo monocanal. Imagen tomada de Carrasco (2023, en preparación).

- **Material del lecho:**

En relación con la identificación del material del lecho (Fig. 4.12), los tipos de granulometría según la clasificación de Wentworth (ver Tabla 3.4), observados a través de imágenes satelitales a lo largo del corredor fluvial del río Laja, incluyen arena, arena y grava, cantos rodados, bloques y cantos rodados. Los bloques y cantos rodados se evidencian en dos ubicaciones específicas: en la parte inicial del río en su tramo más elevado (TML-1), y en la zona de Saltos del Laja (TML-4), coincidiendo con las áreas de mayor potencial de arrastre (ver Fig. 4.4), es decir, aquellas donde la corriente tiene la

fuerza suficiente como para desplazar sedimentos de mayor tamaño. En la mayor parte de la zona alta y media de la cuenca (TML-2), predomina el sedimento de tipo cantos rodados, de menor diámetro y forma más redondeada que los bloques, extendiéndose a lo largo de los primeros 12 km del corredor dentro del área de estudio. Posteriormente, predomina el tipo de arena y grava desde la zona media hasta la baja de la cuenca (TML-3 y TML-5), cuando el material de mayor tamaño ya se ha depositado, mientras que el material más fino aún tiene la capacidad de transportarse más lejos. La excepción es el tramo de los Saltos del Laja, como se mencionó anteriormente, y los últimos 10 km del cauce hasta la desembocadura en el Biobío (TML-6), donde el tipo de material pasa a ser arena, es decir, más fino que los anteriores.

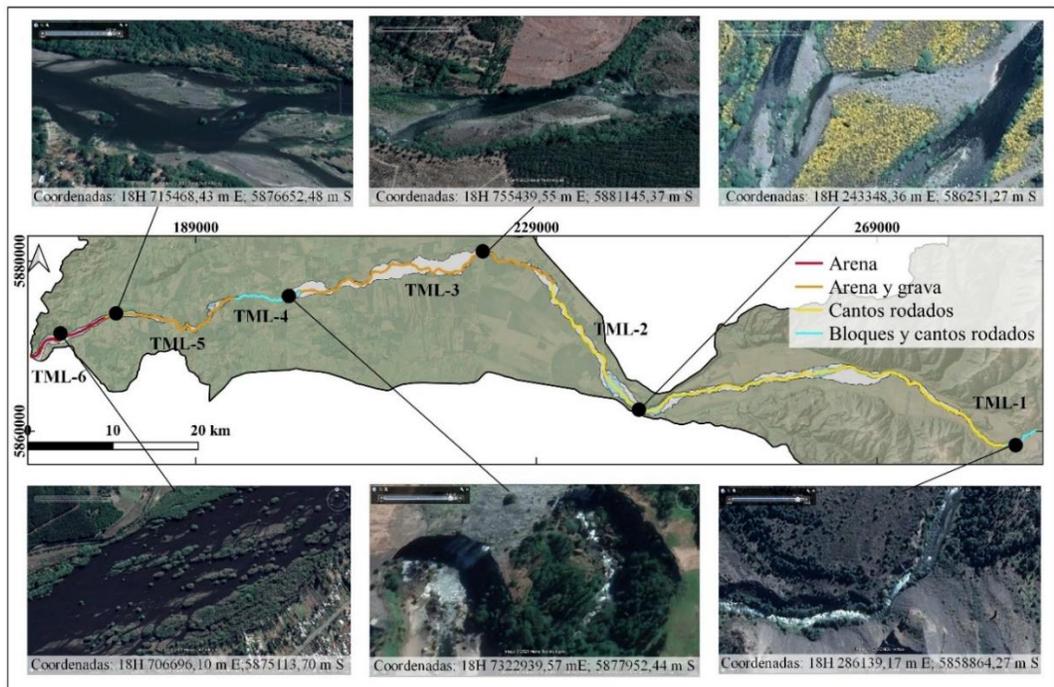


Fig. 4.12: Mapa de agregados de material del lecho de la cuenca del río Laja. se muestran un acercamiento con imágenes satelitales de distintos puntos a lo largo del corredor. Imagen tomada de Carrasco (2023).

- **Clasificación de estilos fluviales:**

Una vez agrupadas las características geomorfológicas por tramos, se obtuvieron un total de 37 estilos fluviales, 19 de monocal, 9 transicional y 9 multicanal. Estas son obtenidas a través de una matriz de datos que contiene los atributos de confinamiento y su causa, material del lecho, *planform* y presencia de UG, a partir de la cual se elabora el mapa con los tramos correspondientes a cada estilo de río (Fig. 4.13).

En la zona alta de la cuenca predominan los estilos 1, 6, 7, 15 y 20, que son mayormente representativos cauces tipo monocanal de baja sinuosidad o con sinuosidad restringida al VB, confinados total o parcialmente por geformas o por el valle, con material del lecho compuesto de bloques y cantos rodados y prácticamente sin presencia de UG. Por su parte, en la zona media destacan los estilos 29, 30 y 36, caracterizados como multicanal de isla trenzado a *anabanching*, parcialmente confinados por geforma a no confinados, material del tipo cantos rodados y con presencia casi exclusiva de islas.

La zona baja de la cuenca, que corresponde al tramo de estudio, posee una gran variedad de estilos fluviales, siendo los estilos 18, 23, 24, 29 y 30 los más destacados. En particular, los estilos 23 y 24 son los primeros en sobresalir siguiendo la dirección de flujo del río, ambos correspondientes a canales del tipo transicional errante, con confinamiento total o parcial producto de terrazas fluviales, material predominante desde cantos rodados a grava y arena y con presencia tanto de islas como de barras laterales. Más adelante, el estilo 18 aparece en el sector cercano a la Ruta 5 Sur, caracterizado por ser monocanal de sinuosidad restringida y baja sinuosidad, confinado casi totalmente por el valle, predominio de material tipo arena y grava y con ausencia de UG. Por último, los estilos 29 y 35 dominan los últimos km del curso, adoptando un *planform* multicanal de isla trenzado, además de algunas secciones de monocanal de sinuosidad restringida, confinado casi totalmente por valle y geformas, con material principalmente de arena y con elevada presencia de islas, especialmente los últimos 18 km.

Esta figura (4.13) representa el resultado final orientado en el objetivo de la caracterización del *planform* y clasificación de los estilos fluviales a partir del marco *River Styles* de forma semi-automatizada.

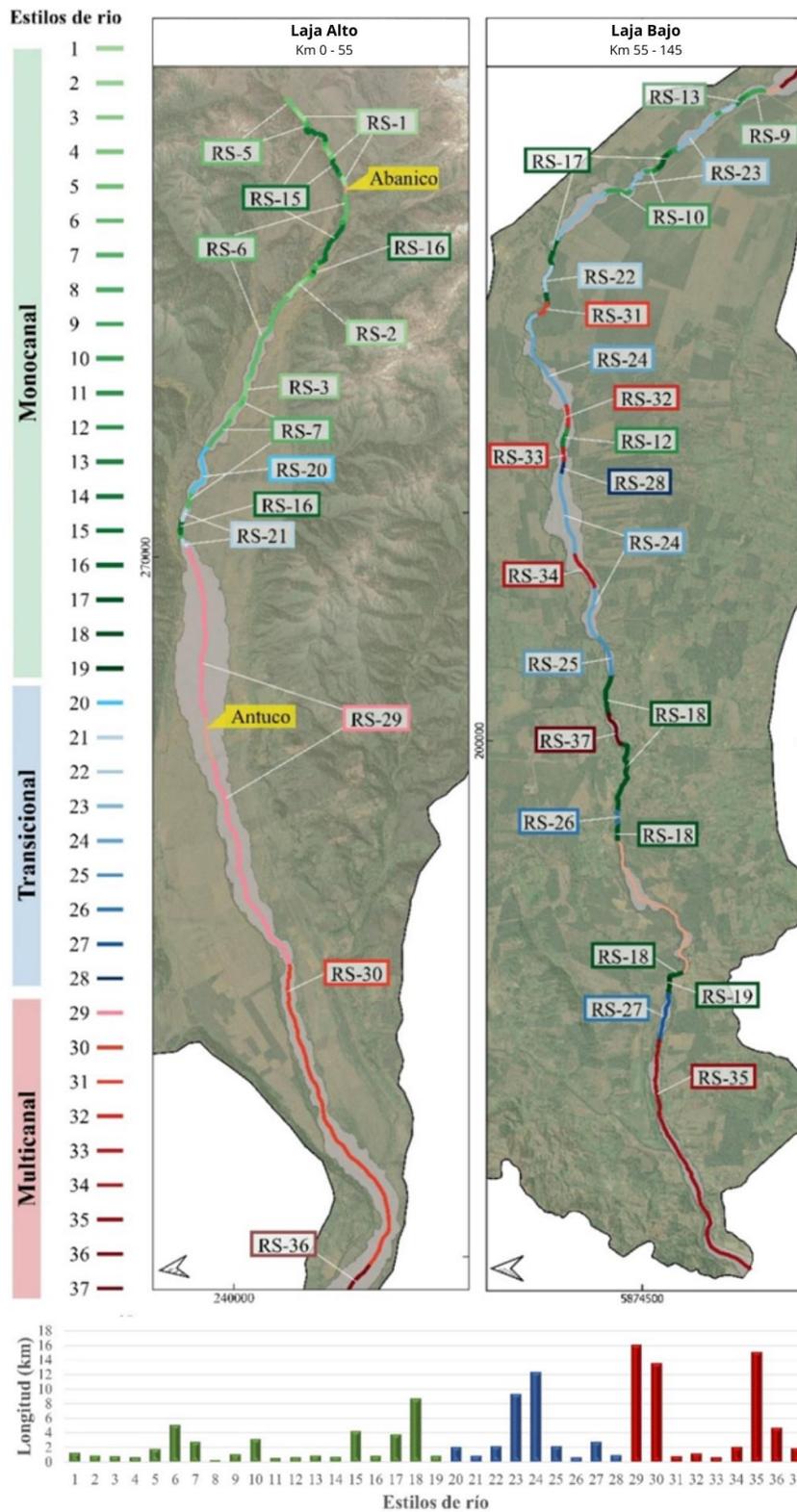


Fig. 4.13: Mapa de la cuenca del Laja con tramos clasificados según estilos fluviales. En la parte inferior se muestra un gráfico de la longitud de cada estilo fluvial presente en el corredor del río Laja. Imagen modificada de Carrasco (2023).

5. DISCUSIÓN

En este apartado se compararán las zonas del río identificadas como prospectos y sensibles al cambio con aquellas áreas de extracción de áridos actuales, evaluando la coherencia con los resultados obtenidos. Previamente, se abordarán las limitaciones de la extracción de métricas y la automatización de datos (apartado 5.1 y 5.2), así como las repercusiones de la variabilidad climática actual en las modificaciones del corredor fluvial (apartado 5.3).

5.1. Delimitación de los Objetos Geográficos Unitarios (UGO)

La principal limitante en cuanto a la precisión de los resultados y su verosimilitud con la realidad está vinculada con la delimitación de los UGO, principalmente la delimitación del canal activo, cuyo objetivo se ve dificultado, primeramente, por la falta de precisión en la extracción del índice NDWI, producto de la abundante vegetación que cubre las riberas del río a lo largo de casi todo el corredor. Los tramos más propensos a errores son los de multicanal de isla trenzado, ya que, al dividirse el cauce principal en pequeñas ramificaciones, de no más de un par de metros de anchura, éstas se desplazan por sectores aledaños al río con vegetación más densa, formando islas cuya vegetación cubre los pequeños cauces que la rodean, sobre todo en periodos de aguas bajas.

Ahora, la imprecisión de la traza del canal activo genera a su vez imprecisiones en la obtención de los resultados de cada una de las métricas. En particular, para la migración lateral, donde se utiliza la línea central del canal activo; la traza de esta línea varía dependiendo de la forma que posea el polígono del canal. Es así como sectores con mayor densidad vegetal son los que poseen potencialmente una mayor imprecisión en la tasa de migración lateral.

Otra problemática surgida es el criterio que se utiliza para categorizar sectores de bancos de arena y sedimentos como barras laterales que forman parte del canal activo. En esencia, el desafío radica en establecer un límite para el canal activo, ya que éste, según la definición dada por Nardini & Brierley (2021), debe considerar las barras laterales como parte integrante. Por lo tanto, el criterio para determinar si un terreno adyacente al río corresponde o no a una barra lateral, resulta en

algunos casos subjetivo y queda a discreción del ojo experto, lo que implica que distintos estudios realizados por diferentes investigadores pueden arrojar resultados divergentes según sus consideraciones individuales.

5.2. Limitaciones de la Extracción de la Tasa de Migración Lateral Anual

La métrica clave de este estudio, la tasa de migración lateral anual, presenta ciertas limitaciones metodológicas. Dado que la obtención de esta métrica se basa en segmentos de 100 m de longitud, los cuales no siempre se corresponden con un solo sentido de desplazamiento, en ocasiones ocurre un cambio de migración de un lado a otro del río dentro de un mismo segmento. Esto da lugar a que el segmento, que cuenta con un valor asociado del ancho del canal activo, refleje el mismo valor de migración lateral en ambos sentidos (izquierda y derecha). Este solapamiento genera la apariencia de que el río en este segmento específico está migrando con igual intensidad (positiva y negativa) en ambos sentidos simultáneamente. Para solucionar este problema, se requiere de una corrección manual, lo que implica eliminar el sentido que abarca menos dentro del segmento. Sin embargo, a la escala de trabajo (791 segmentos), este error se resulta insignificante en el resultado final y, por lo tanto, se considera despreciable.

Por otro lado, en el caso de que se produzca una modificación simétrica en ambas riberas del río, ya sea por ensanchamiento o estrechamiento, implicaría que la línea central de la envolvente del canal muestre una trayectoria constante, sin reflejar el cambio en el ancho del canal. Esto conlleva a la identificación errónea de una zona como estable, cuando en la realidad está ocurriendo un cambio que afecta a ambas riberas del río. Además, la disparidad en la afectación de una ribera en comparación con la otra constituye otra limitante al considerar como unidad de estudio a tramos o secciones del río prospectas o sensibles. En algunos casos, es posible que solo una de las riberas, y no el tramo completo, experimente modificaciones significativas, mientras la otra ribera se mantiene estable. En ambos escenarios, la revisión visual no solo asegura la precisión de los resultados, sino que también destaca la importancia de combinar métodos cuantitativos con la observación directa para obtener una comprensión más completa y fiable de la dinámica fluvial.

5.3. Temporal e Inundaciones del Año 2023

Durante el año 2023, la zona centro sur de Chile sufre dos temporales de gran magnitud, el primero del 22 y 26 de junio y el segundo del 18 y 23 de agosto. Este año se caracteriza por la ocurrencia del “Fenómeno del Niño”, el cual ocasiona un otoño más cálido y una temporada invernal más lluviosa de lo habitual, con una isoterma cero a mayores altitudes. Según la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), en ambos casos ocurrió la combinación entre la incursión de un río atmosférico con un sistema frontal que trajo intensas precipitaciones, dejando acumulados importantes, incluso superiores a los registros históricos.

Según datos de Senapred, el primer sistema frontal deja un saldo de unas 20 mil personas damnificadas, con 2 fallecidos y 2 desaparecidos, además de graves daños a infraestructuras, puentes, cortes de camino y cerca de 1.800 viviendas destruidas. Las estaciones meteorológicas de la precordillera de las regiones del Maule y Biobío registraron precipitaciones que superan los 300 mm en 24 horas y los 500 mm en 48 horas (según el CR2 el promedio actual de Santiago es de 285 mm al año), con intensidades sobre los 12 mm/hr. En cuanto a caudales, la bocatoma Tucapel superó el mayor registro histórico, con más de 2.000 m³/s, cuando el caudal medio anual con probabilidad de excedencia del 85% en esta estación es de tan solo 99,7 m³/s (Pérez Soto, 2018), lo que generó inundaciones y desbordes del río principalmente en las zonas cercanas a los Saltos del Laja (Fig. 5.1(II y III)), Chillancito (Fig. 5.1(I)) y La Aguada (Fig. 5.1(IV)), donde una casa quedó al borde de caer al río al ocurrir un socavamiento de la terraza fluvial, producto de la reactivación del Estero Batuco.

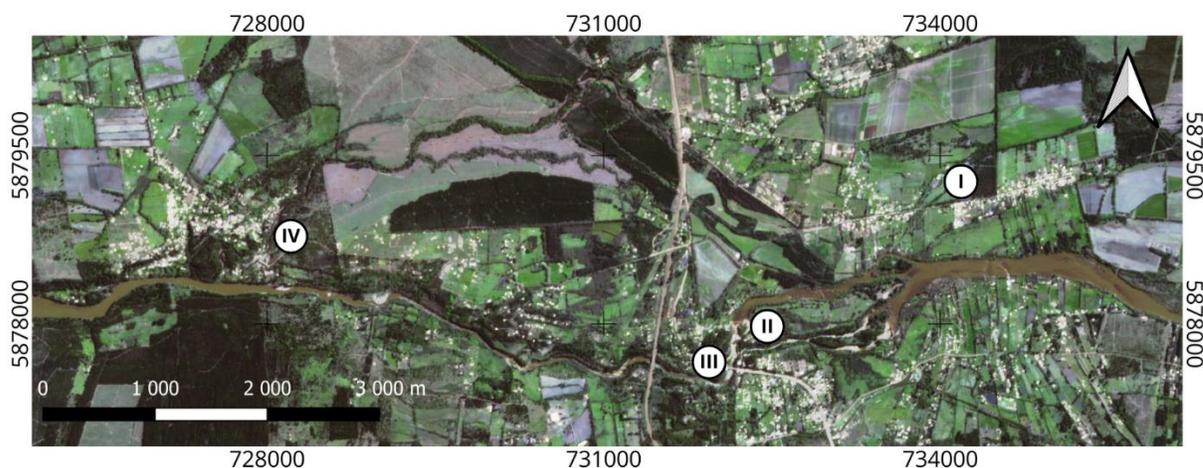




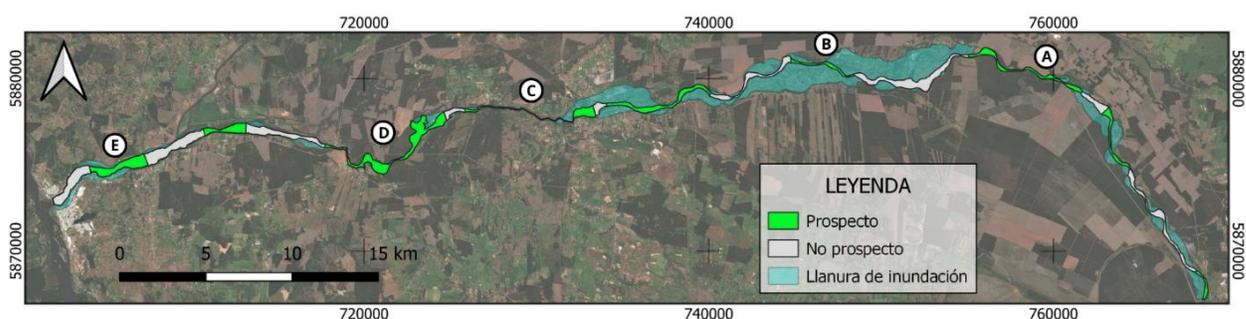
Fig. 5. 1: Mapa del sector Saltos del Laja, zona media del área de estudio, con marcadores I, II, III, IV que indican ubicación respectiva de las imágenes del sistema frontal del año 2023, mostradas en la parte inferior. I: sector Chillancito, inundado por desborde del río Laja. Extraído de: latribuna.cl. II: Saltos del Laja, con zona de locales y camping inundados. Extraído de: soychile.cl. III: antes y durante el temporal en el sector Saltos del Laja con los saltos de fondo. Extraído de: meganoticias.cl. IV: sector La Aguada, casa al borde de caer por socavamiento generado por el Estero Batuco. Extraído de: sabes.cl.

Las graves consecuencias del temporal en esta zona provocaron modificaciones imprevistas en los límites del canal activo, superando incluso las demarcaciones que se consideraban para la llanura de inundación antes de este fenómeno. Fueron afectadas muchas construcciones, con o sin permisos, que se encontraban dentro de los límites de la llanura o cercano a ella y a una distancia considerable del canal activo en condiciones normales. A pesar de que, en la zona de los Saltos del Laja, el canal activo está fuertemente confinado dentro de un cañón de varios metros de altura, la intensa precipitación en un corto período logró desbordar las paredes del cañón. Estos eventos ponen en entredicho el conocimiento actual de los límites del corredor fluvial, y extrapolan al modelado y procesamiento de datos del cauce en condiciones de relativa normalidad. Por ende, es fundamental considerar estos fenómenos en análisis futuros para comprender el alcance real de las redes hídricas e incorporar información para la gestión a largo plazo.

Habiendo considerado las limitantes tanto metodológicas como medioambientales, debido a la variabilidad climática, con el desarrollo de la metodología propuesta en este trabajo se pueden proponer y discutir zonas de interés en el corredor fluvial.

5.4. Propuesta de las Zonas Prospectos para la Extracción

Para la obtención de una propuesta para las zonas prospecto de extracción de áridos, se tienen en consideración todas las métricas conseguidas durante esta investigación. A pesar de ello, existen factores de mayor peso a la hora de calificar áreas como sensibles o prospectos. Entre estos, el más relevante es la de la tasa de migración lateral anual, específicamente la del periodo 2018-2023 por ser las más reciente (Fig. 5.2). Ahora bien, el resto de las métricas entregan, de igual modo, información relevante y que se conjugan bien entre sí, generando en muchos casos un consenso en las áreas de interés. Una vez identificada las zonas de baja migración lateral, se pueden analizar otras métricas, como el *stream power*, que es útil para conocer las zonas donde se va a tender a depositar sedimentos arrastrados desde aguas arriba por el río, lo que también es corroborable mediante el análisis de la presencia de barras e islas. Cuando se conjuga un potencial de arrastre de “sedimentos” bajo con áreas donde la migración lateral es pequeña, se puede interpretar como zonas con un potencial interés en la extracción. Además, el confinamiento nos puede ayudar a identificar zonas donde el río se encuentre restringido en su desplazamiento lateral, manteniendo una relativa estabilidad incluso durante crecidas en periodos de aguas altas.



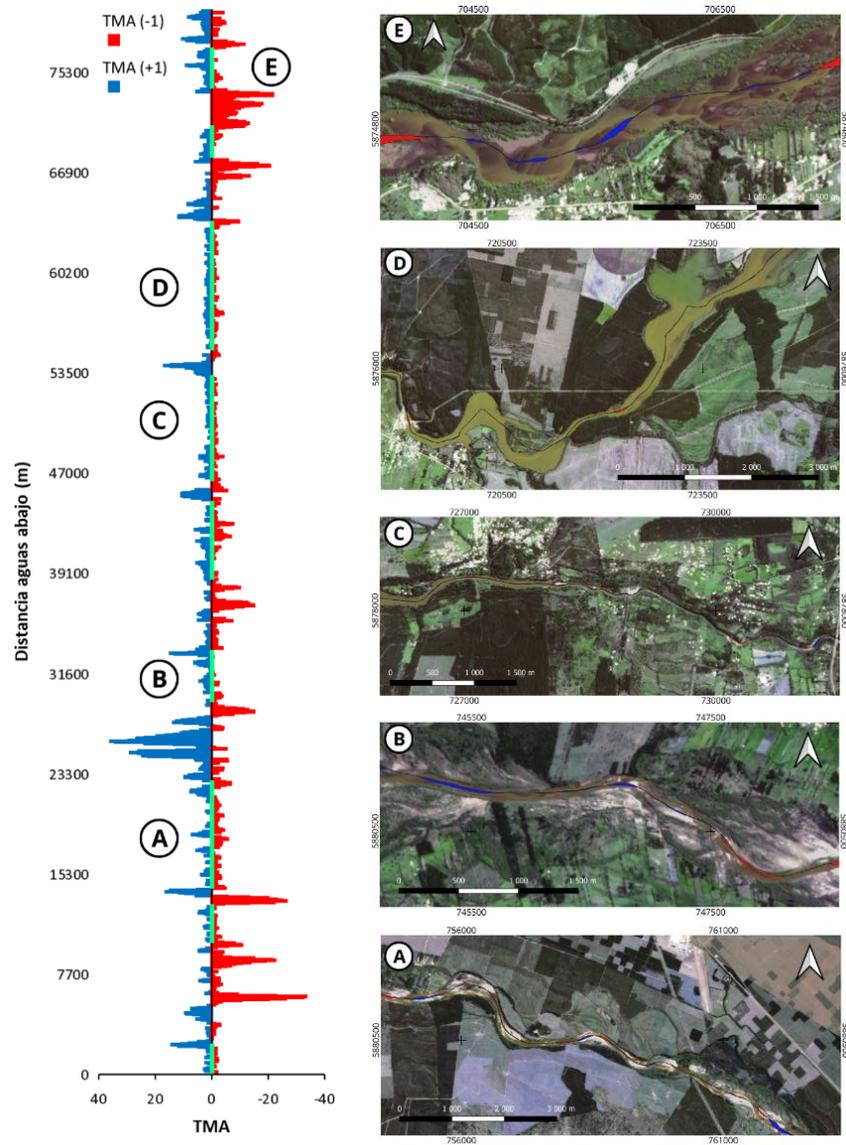


Fig. 5. 2: Mapa del área de estudio y gráfico de TMA periodo 2018-2023 con las zonas de baja variación, destacadas con verde, y zonas prospecto de mayor interés identificadas con las letras A, B, C y D, junto con sus respectivas imágenes satelitales más actuales de referencia.

Entonces bien, desde un inicio, una de las hipótesis planteadas sostiene que para que una zona sea catalogada como prospecto para la extracción de material, primero que nada, esta debe poseer evidencia de estabilidad a cambios morfodinámicos, sin experimentar una afectación significativa del balance hídrico natural del río. Es por ello, que un análisis retrospectivo del comportamiento de corredor fluvial es necesario. Esto se ilustra en la Fig. 5.2, donde el color verde en el eje del gráfico identifica los tramos del río cuya migración lateral es mínima y, por ende, no ha sufrido cambios morfodinámicos en una distancia considerable de kilómetros. Una vez identificados estos

tramos, es importante analizar las zonas donde efectivamente esté ocurriendo la sedimentación de áridos, que sean susceptibles a extraer en proyectos futuros. Para ello es que la principal métrica a evaluar sea el *stream power specific*. Además, la presencia de UG como barras e islas también es un importante indicador de procesos de sedimentación y puede ayudar a identificar zonas de mayor estabilidad. De esta forma, los tramos seleccionados como zonas prospecto son los que se señalan en la Fig. 5.2. Algunas zonas que cuentan con una baja TMA no son consideradas en este trabajo producto de su cercanía con centros poblados, como en la zona de Tucapel y los Saltos del Laja principalmente, esto para no aumentar la exposición debido a la ocurrencia de cualquier fenómeno que pueda provocar daños en la población, e.g., inundaciones, desbordes del canal o socavamientos del terreno, entre otros, lo que requeriría de mayores estudios.

Las secciones A, B, C, D y E seleccionadas concuerdan todas con una estabilidad morfológica en los últimos diez años, en ambas riberas del río. La sección A, la más aguas arriba, se caracteriza por un tramo predominantemente monocanal de sinuosidad restringida a transicional errante. Muestra varias barras laterales estables, especialmente en los meandros, y un tramo multicanal con una isla. Metros más abajo se encuentra el sector “El Roble” con un par de decenas de casas, sin embargo, estas se encuentran fuera de la llanura de inundación. En cuanto a la sección B, también de sinuosidad transicional errante, destaca por la presencia de barras de mayor dimensión en comparación con el tramo anterior, aunque han tendido a ir desapareciendo recientemente. Ambas secciones se encuentran ubicados en una de las áreas de menor *stream power*, lo que explicaría la gran cantidad de barras y de material de baja granulometría, principalmente del tipo grava y arena (ver Fig. 4.12).

La sección C, ubicada metros abajo del sector Saltos del Laja, se encuentra bien confinada producto de la incisión del cauce principal en el valle generado por el elevado *stream power* de las cascadas, lo que, a su vez, provoca la presencia de material más grueso, como bloques y cantos rodados. Este confinamiento genera estabilidad en el cauce, manteniéndose prácticamente sin variaciones incluso en periodos invernales de aguas altas. Para este caso en particular, la zona definida como prospecto corresponde a la ribera sur del río, ya que la ribera norte se encuentra densamente poblada. Cabe resaltar la sección D, que es el tramo de mayor anchura de las aguas permanentes y es, además,

completamente monocanal de sinuosidad restringida, con predominancia de material tipo arena y grava, donde la llanura de inundación queda casi totalmente restringida al canal activo. Sumado a ello el uso agrícola del área cercana, sin prácticamente viviendas, es quizás la mejor área para realizar extracción de áridos, teniendo en cuenta las métricas aquí estudiadas.

No obstante, la sección E que, a diferencia de las demás posee predominio de arenas más finas, se presenta como la opción ideal en términos de geología económica, gracias a su proximidad al principal mercado, i.e., el Gran Concepción, mayor núcleo urbano de la región. Además, esta zona cumple con las métricas requeridas para ser considerada prospecto, especialmente la ribera norte, que está menos poblada; sin embargo, su cercanía a los poblados de San Rosendo y Laja, uno a cada lado del río, plantea un desafío al evaluar las posibles consecuencias que podrían afectar a estas comunidades y su población. Considerando lo anterior, y a pesar de su ubicación estratégica, en este trabajo se propone la zona D como el principal prospecto para la extracción de áridos.

5.5. Identificación de las Zonas Sensibles a la Extracción

Al contrario de las zonas prospecto, las zonas sensibles se identifican por ser propensas a sufrir variaciones en su morfología y dinámica fluvial, manifestados en elevadas tasas de migración lateral. Estas áreas, aunque puedan acumular considerables cantidades de sedimentos en algunos casos, deben ser tratadas con precaución debido al riesgo potencial de perturbar el equilibrio hídrico natural del río, tanto en la misma zona de extracción como aguas abajo en el corredor. En este contexto, no solo es importante identificar la dinámica del río en sí, sino también considerar la población e infraestructura humana que pueda estar expuesta a inundaciones o vea afectada de alguna forma su bienestar. En la Fig. 5.3 se muestra el gráfico de la tasa de migración lateral anual para el periodo 2018-2023, con las zonas sensibles marcadas en color amarillo en el eje principal. Se muestran en mayor detalle 6 secciones en particular: F, G, H, I, J y K.

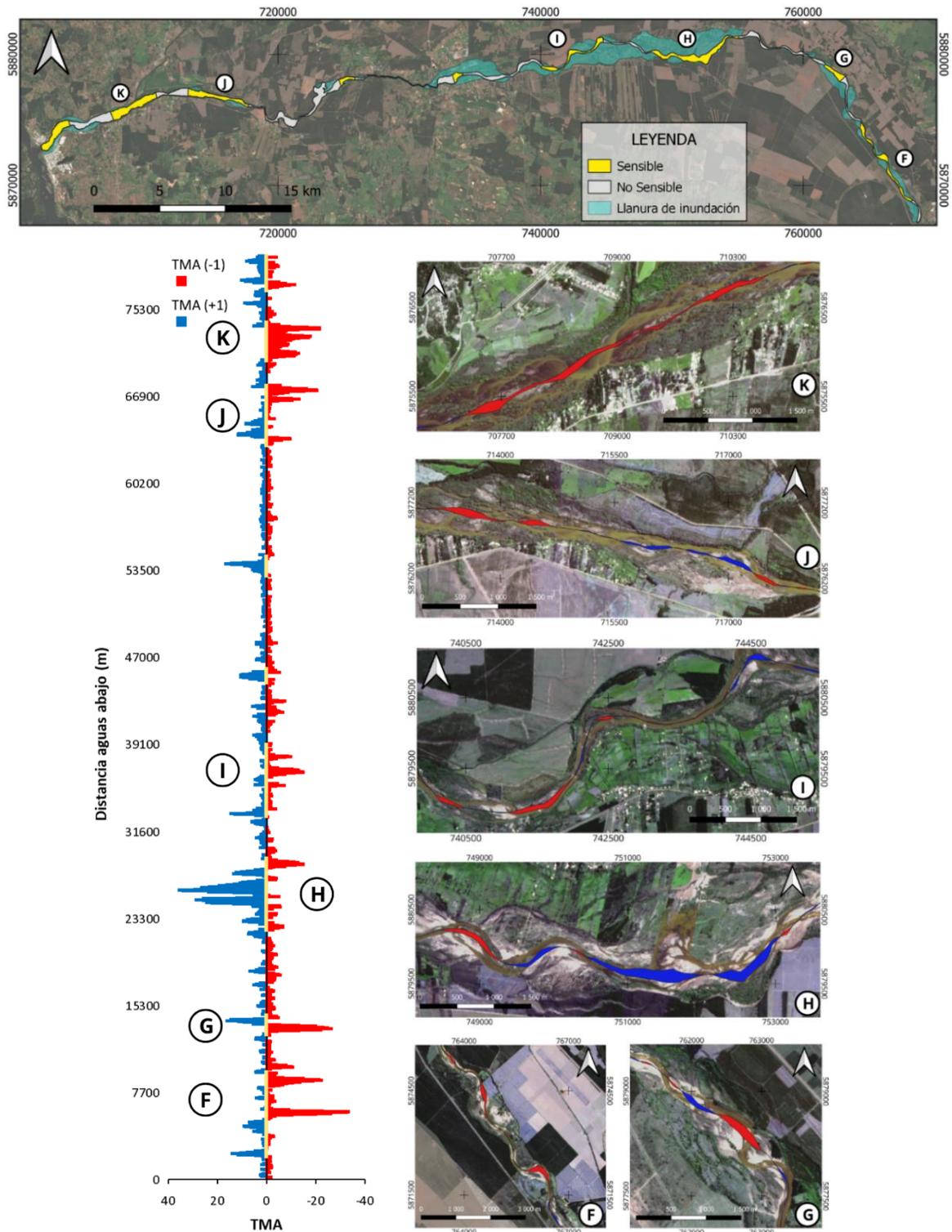


Fig. 5. 3: Mapa del área de estudio y gráfico de TMA periodo 2018-2023 con las zonas de alta variación destacadas en amarillo y zonas sensibles con las letras E, F, G, H, I y J junto con sus respectivas imágenes satelitales más actuales de referencia.

Las 4 primeras secciones: F, G, H e I, se caracterizan por una amplia llanura de inundación que permite al río divagar lateralmente con mayor libertad, lo cual efectivamente ocurre al evidenciar una gran tasa de migración lateral. Las secciones H e I, a pesar de contar con numerosas barras e islas que sugieren una alta disponibilidad de materia prima, presentan una variabilidad significativa en el comportamiento del cauce. Esta variabilidad se refleja en la diversidad de formas en planta, que van desde monocanal hasta transicional y multicanal en distancias muy cortas (ver Fig. 4.11). Se destaca que en el área I existe una aparente intervención humana en la ribera norte, aunque el propósito de estas obras y su relación con cambios en la dinámica fluvial son desconocidos.

Por último, en los tramos finales del corredor, se encuentran las secciones J y K. Si bien, en ambos casos la llanura de inundación se encuentra en gran medida restringida al canal activo, el comportamiento de multicanal de isla trenzado resulta en áreas con una migración lateral activa, especialmente para el periodo 2018-2023. Muchas de las islas dejan de serlo debido a que los pequeños canales que las rodean tienden a desaparecer o unirse a otros cauces de mayor caudal, dejando las islas unidas a los sectores ribereños. Además, esta zona requiere especial atención producto de que metros más abajo el río se encuentra con dos centros poblados mencionados en el apartado anterior: las comunas de San Rosendo y Laja. Cualquier posible intervención de este sector podría tener consecuencias importantes en dichas comunas, por lo que se requiere de mayores estudios para comprender su comportamiento en profundidad.

5.6. Comparación con las Zonas de Extracción Actual

Se identificaron al menos cuatro puntos (P1, P2, P3 y P4) donde se han realizado recientemente actividades de extracción de material en áreas ribereñas del río Laja (Fig. 5.4), junto con una quinta área, P5 (ver ANEXO 5.5), que está actualmente fuera de funcionamiento, todas ubicadas aguas arriba del área de estudio. Sólo P3, de los puntos con extracción reciente, se encuentra dentro de alguna zona prospecto identificada en este estudio; el resto está en tramos clasificados como inestables y sensibles a la extracción. De todos estos, P4 es especialmente preocupante, ya que la actividad se desarrolla muy cerca del cauce del río y, de hecho, es probable que la extracción de material, sin criterio alguno, haya causado modificaciones en el mismo en los últimos años. Esta área, que corresponde a la de mayor tasa de migración lateral del estudio, experimenta un cambio

significativo entre 2018 y 2023, donde pequeños brazos del río migran en dirección a la extracción, lo que implica cambios en la morfología de las riberas y de unidades geomórficas (ver Fig. 4.7).

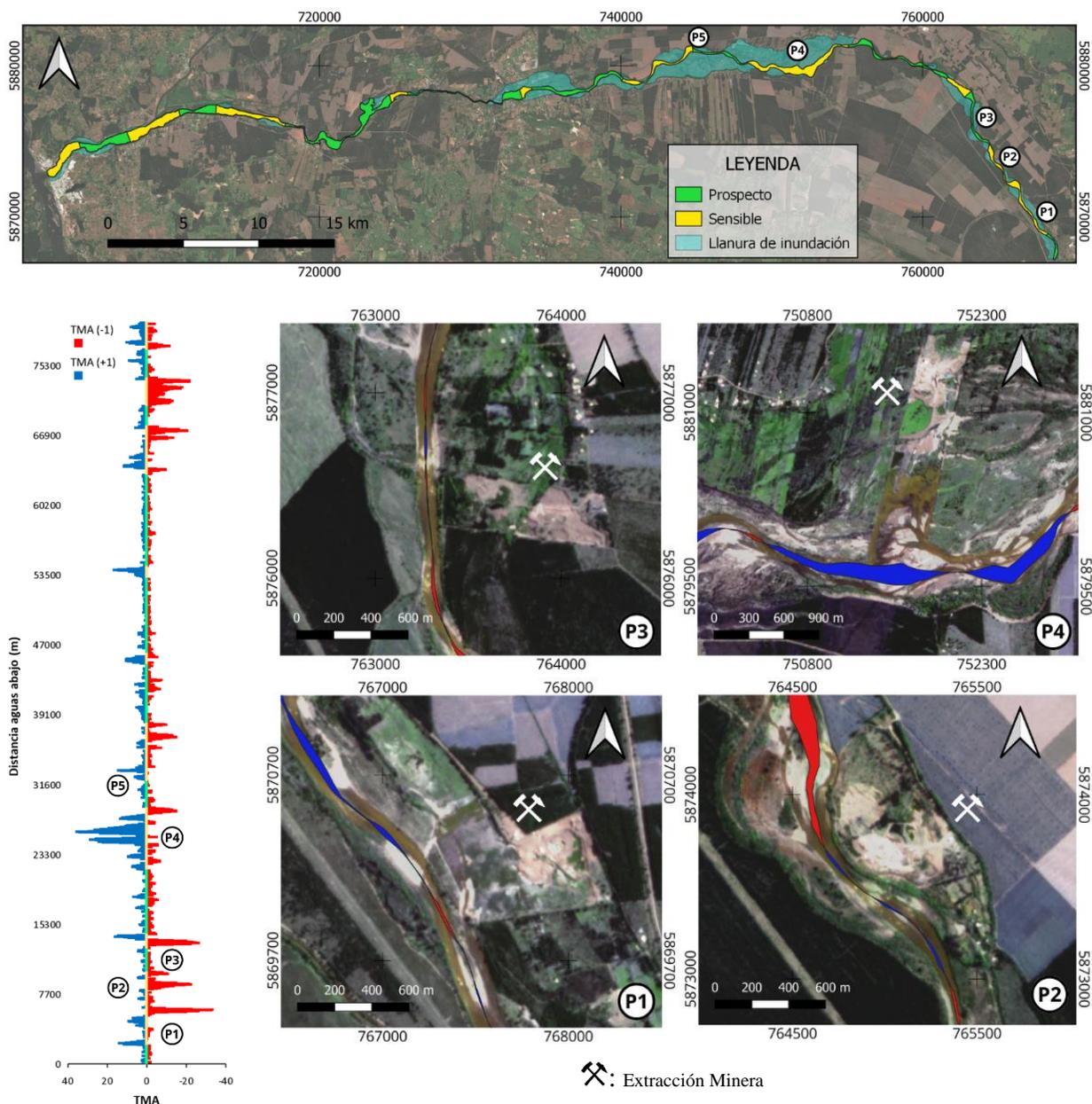


Fig. 5. 4: Mapa del área de estudio que incluye zonas con extracción de áridos actual y gráfico de TMA periodo 2018-2023 con las zonas de baja variación destacadas con verde y zonas de mayor variación destacadas en amarillo. P1, P2, P3 y P4 corresponden a zonas de extracción recientes, mientras que P5 corresponde a un área de extracción antigua. Además, se muestra un acercamiento a estas áreas con sus respectivas imágenes satelitales más actuales de referencia.

En cuanto a P5, su inactividad se relaciona a daños causados en el entorno del río, sobre lo cual la Corte Suprema determinó que este consistió en “el socavamiento de la ribera izquierda del río en

el sector Paraguay y la erosión de la misma que afectó los predios ribereños en desmedro del hábitat natural con sectores de agua estancada”, por lo que este fallo obliga a la empresa a “restaurar el paisaje deteriorado” (Fundación Terram, 2012). Aunque esta zona se sitúa en el límite entre un área prospecto y una sensible, el daño ocurrió en el invierno de 2000, es decir, trece años antes de la primera escena temporal considerada en este estudio, por lo que se desconoce la dinámica del río en ese momento y las modificaciones que esta provocó. Esto evidencia que, aunque el tramo puede considerarse actualmente estable, esto no garantiza que una modificación no implique su desequilibrio, destacando la necesidad de estudios adicionales para cuantificar volúmenes, evaluar métodos y determinar un radio de distancia mínimo al cauce para una extracción segura.

En definitiva, ninguna de las empresas a cargo realizó un estudio con enfoque retrospectivo sobre la estabilidad del corredor fluvial, lo que puede traer repercusiones negativas al balance natural del río. Respecto a lo anterior, sería de gran interés evaluar de manera sistemática los impactos que cada una de estas extracciones genera en el corredor fluvial, para de esta forma corroborar como responde la zonificación propuesta en este trabajo a actividades extractivistas específicas. Para ello, se requiere realizar un análisis retrospectivo que abarque una temporalidad mayor, considerando que, al momento de la primera escena temporal considerada en este estudio (noviembre de 2013), todas las faenas mineras estaban en funcionamiento. Esta limitación impide verificar si alguna de las empresas afectó de alguna forma al río, ya que es fundamental conocer el estado inicial de éste previo a la instalación de faenas para realizar comparaciones significativas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la búsqueda de comprender la dinámica fluvial y evolución temporal en el corredor del río Laja, el uso de herramientas digitales, como *South Rivers Toolbox*, que automaticen el procesamiento de datos, se vuelve una necesidad al analizar cuencas de grandes extensiones. Es así como tanto el marco de Agregación y Desagregación, que permite el estudio detallado de métricas a nivel de segmentos y a una escala mayor como tramos homogéneos, como el marco *River Styles*, que facilita la clasificación de secciones del río, son fundamentales para lograr una caracterización no sólo del área de estudio, sino también de la cuenca hidrográfica como unidad base para un análisis y manejo integral. Si bien la aplicación de estos marcos ha representado de manera eficiente y detallada el comportamiento del río, arrojando resultados convincentes en algunas métricas más que en otras, aún persiste la necesidad de perfeccionar la herramienta para alcanzar plena autonomía y reducir las imprecisiones que subsisten, sobre todo para la automatización de la extracción de la migración lateral, facilitando así un análisis más ágil y preciso.

A través de la implementación de SRT, se llevó a cabo un análisis multitemporal, que abarcó tres escenas temporales, entre el 2013 y 2023. Este enfoque morfodinámico permitió identificar patrones y tendencias en la migración lateral del río Laja, revelando zonas con alta estabilidad y aquellas propensas a cambios morfológicos. Se obtuvieron métricas a nivel de cuenca, como el área de drenaje, elevación, pendiente, *stream power* y *planform*, así como a nivel local (área de estudio), que incluyen el ancho, la sinuosidad y la tasa de migración lateral. Estas métricas permitieron clasificar los estilos fluviales y caracterizar la forma en planta, proporcionando un *background* para el análisis de los cambios morfodinámicos y cumpliendo con el objetivo general del estudio.

El modelo desarrollado en esta memoria, basado en un análisis dinámico y retrospectivo, ofrece ventajas significativas sobre un modelo estático, donde el análisis de una sola escena temporal presenta limitaciones, considerando la naturaleza dinámica del comportamiento fluvial. Por ejemplo, la zona D (Fig. 5.2), considerada en el modelo dinámico como la zona de mayor interés para la extracción debido a la estabilidad del cauce principal, no destaca especialmente por sobre otros tramos en un modelo estático, pudiendo pasar desapercibido como tramo prospecto. Del

mismo modo, la sección H (Fig. 5.3), al emplear un modelo estático, que no considera las variaciones en la migración lateral, hubiese sido erróneamente catalogada como prospecto debido a la gran capacidad de material sedimentario disponible. Sin embargo, el análisis multitemporal permite añadir este factor dinámico, que revela que esta área experimenta cambios significativos en un corto periodo de tiempo, lo que no permitiría una correcta restauración de su tasa de sedimentación, posicionándola como una zona sensible a cualquier modificación. En resumen, con nuestro análisis pudimos determinar al menos 9 secciones prospectos, 5 de mayor interés, distribuidas en un total de 48,1 km de longitud, y 9 zonas sensibles, repartidos en 36,6 km. El tramo H se destaca como el más sensible en cuanto a inestabilidad, mientras que las secciones I y K son las más sensibles en términos de exposición a centros poblados. Por otro lado, las secciones más prospectivas serían D por estabilidad y E por razones logísticas debido a su cercanía al Gran Concepción. Estos resultados son el producto esperado de los objetivos principales del estudio.

Es por ello que la capacidad de esta herramienta para proporcionar información detallada sobre la evolución del corredor fluvial sienta las bases para la toma de decisiones informadas en cuanto a la gestión para la extracción de áridos y preservación de este importante entorno, en un manejo integrado de cauces. Si bien el estudio en intervalos de tiempo de 5 años dio resultados significativos para la variación en la migración lateral y coincidió en gran medida para ambos periodos (2013-2018 y 2018-2023), surge la interrogante de si este lapso es el más apropiado. Podría plantearse la posibilidad de que un rango de tiempo más acotado, con más intervalos de comparación (e.g., imágenes de cada 2 años), hubiera revelado aún más detalles significativos sobre cómo evoluciona la migración del cauce fluvial, lo que habría enriquecido aún más nuestros análisis. Además, es importante evaluar la realización de estudios con múltiples tomas de imágenes satelitales, en distintos periodos del año, para así considerar el efecto que puede tener las aguas altas y aguas bajas, principalmente en la delimitación de los objetos geográficos unitarios.

Si bien el análisis retrospectivo de 10 años pareciera adecuado al tener como objetivo identificar las zonas actuales de baja migración para generar zonas prospectos de extracción, posiblemente ampliar los años (en décadas) de manera retrospectiva es importante si se busca comprender con más detalle la dinámica del río. Esto sería particularmente relevante para entender cómo afectan

fenómenos climatológicos anormales con tiempos de recurrencia mayores o, si por ejemplo, se pretende conocer el comportamiento del río antes y durante intervenciones humanas relevantes ocurridas con anterioridad, como extracción de material en sitios sensibles, además de la creación de represas hidroeléctricas, desvíos del cauce para la agricultura, o construcciones sobre la llanura de inundación, todas ellas que alteran el curso natural del río y reducen su espacio. De este modo, un análisis retrospectivo de mayor temporalidad podría generar resultados interesantes al realizar el contraste con la dinámica actual del río.

En definitiva, responder al desafío que propone la extracción de áridos a partir de cauces fluviales, a través de la comprensión del funcionamiento del río para no afectar el equilibrio sedimentológico, es una tarea fundamental para el desarrollo del país, considerando que los áridos son el principal insumo para la construcción. Los esfuerzos y recursos impulsados desde el Estado para fortalecer este sector deben ser respaldados por una estrategia que promueva un desarrollo sostenible de la infraestructura, integrando en conjunto la dimensión ambiental, económica, social e institucional y que pueda generarse en un futuro de manera (semi)automatizada. Este enfoque no sólo cumple con los objetivos académicos, sino que también representa una adaptación eficiente al medio ambiente y una planificación que asegura un legado ambiental sustentable para las generaciones venideras, marcando un paso significativo hacia la construcción de un futuro sostenible y equilibrado con el medioambiente.

Como proyecciones al presente trabajo, cabe plantear la pregunta sobre la posibilidad de estimar la tasa en que se renueva el sedimento que es extraído del río, con el objetivo de planificar extracciones a largo plazo que no generen desequilibrios sedimentológicos importantes. Este enfoque, acompañado de investigaciones que permitan automatizar el proceso para cuantificar las reservas anuales disponibles, podría contribuir a una gestión más eficiente. Por último, se destaca la importancia de realizar estudios morfodinámicos específicos a cada cuenca, dado que cada una presenta un funcionamiento único. Se propone que estas herramientas funcionen como requisito para obtener permisos de extracción en el futuro, contribuyendo así a una gestión más informada y sostenible de nuestros recursos naturales.

REFERENCIAS

- Aguayo, M. D., Sosa, V. P., Stanley, C. M., & Romero, N. (2018). Evaluación de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización de ambientes de humedales. *7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Brasil*.
- Alber, A., & 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.
- Albornoz Tapia, A. S. (2019). Estructura del basamento y su posible relación con la actividad holocena del volcán Antuco, Región del BioBío. Trabajo de grado, Geología, Universidad de Concepción, Concepción.
- Asabonga, M., Betek, C., Musampa, C., Mpundu, N., Motebang, D.V., (2016). The physical and environmental impacts of sand mining. *Trans.R.Soc.S.Afr.* (5), 2–10.
- Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. US government printing office.
- Brierley, G. & Fryirs, K. (2005). *Geomorphology and river management: applications of the river styles framework*, John Wiley and Sons, ISBN 978-1-405-11516-2.
- Carrasco, Z. (2023). Caracterización de estilos de río utilizando el marco *River Styles* en la cuenca del río Laja. Tesis de grado en progreso, Universidad de Concepción, Concepción.
- Center of Climate and Resilience Research. (2023). Explorador Climático [base de datos]. Santiago de Chile. Recuperado de <https://explorador.cr2.cl>
- Código de Aguas (1981). Decreto con Fuerza de Ley 1122. Libro Primero de las Aguas y del Derecho de Aprovechamiento. Ministerio de Justicia de Chile.
- Decreto N°40 (2013). Aprueba Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Publicada en Diario Oficial con fecha 12 de agosto de 2013. Recuperado de <https://bcn.cl/2f8a8>
- Dirección General de Aguas. (2004a). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, cuenca del río Biobío. Santiago, Chile: Gobierno de Chile.
- Dirección General de Aguas. (2004b). Estudio hidrogeológico cuenca Biobío. Santiago, Chile: Gobierno de Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2016). Atlas del Agua: Chile 2016, Ministerio de Obras Públicas: Santiago, Chile, Capítulo 4.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. *Cepal*.
- Fryirs, K. A., & Brierley, G. J. (2018). What's in a name? A naming convention for geomorphic river types using the River Styles Framework. *PloS one*, 13(9), e0201909.
- Fryirs, K. A., Wheaton, J. M., Bizzi, S., Williams, R., y Brierley, G. J. (2019). To plug-in or not to plug-in? Geomorphic analysis of rivers using the River Styles Framework in an era of big data acquisition and automation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(5), e1372.

- García-Anquela, J. A., Tena, J. M., & Mandado, J. A. (1985). Las explotaciones de áridos como factor modificador de los cauces fluviales naturales. *Cuadernos de investigación geográfica*, 11, 83-90.
- 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.
- Gleick P., & White G. F. (1993). Pacific Institute for Studies in Development Environment and Security & Stockholm Environment Institute. *Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources*. Oxford University Press.
- González, C. (2021). Caracterización geomorfológica de los estilos de ríos en la cuenca del Río Andalién. Tesis de grado, Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Concepción.
- González, L. N., González, A., & Mardones, M. (2003). Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. *Revista geológica de Chile*, 30(1), 03-22.
- 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.
- Kellerhals, R., & Church, M. (1989). The morphology of large rivers: characterization and management. *Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences/Publication speciale canadienne des sciences halieutiques et aquatiques*. 1989.
- Ley N°11.402 (1953). Dispone que las Obras de Defensa y Regularización de las Riberas y Cauces de los Ríos, Lagunas y Esteros que se Realicen con Participación Fiscal, Solamente Podrán Ser Ejecutadas y Proyectadas por la Dirección de Obras Sanitarias del Ministerio de Obras Públicas. Publicada en Diario Oficial con fecha el 16 de diciembre de 1953. Recuperado de <https://bcn.cl/3h9gx>
- Ley N°19.300 (1994). Aprueba Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Publicada en Diario Oficial con fecha el 9 de marzo de 1994. Recuperado de <https://bcn.cl/2f707>
- Llena, M., Vericat, D., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2018). Aplicación de algoritmos Structure from Motion (SfM) para el análisis histórico de cambios en la geomorfología fluvial. *Cuaternario y Geomorfología*, 32.
- Mardones, M., & Vargas, J. (2005). Efectos hidrológicos de los usos eléctrico y agrícola en la cuenca del río Laja (Chile centro-sur). *Revista de Geografía Norte Grande*, (33), 89-102.
- 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.
- Melo, O., & Vial, J. (2005). Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y algunas experiencias de organizaciones de usuarios del agua. Universidad de Concepción. Depto. de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillan. Chile.

- Muñoz, E., Zúñiga, R., Arumi, J. L. (2014). Análisis hidrológico del sistema Laja. Impactos por cambios antropogénicos y análisis de una nueva regla de operación. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile*.
- Nardini, A., & Brierley, G. (2021). Automatic river planform identification by a logical-heuristic algorithm. *Geomorphology*, 375, 107558.
- Nardini, A. G. C., Salas, F., Carrasco, Z., Valenzuela, N., Rojas, R., Vargas-Baecheler, J., & Yépez, S. (2023). Automatic River Planform Recognition Tested on Chilean Rivers. *Water*, 15(14), 2539.
- Nardini, A., Yépez, S., y Rogeliz, C. (2019). Caracterización geomorfológica river styles en la Cuenca del río Magdalena: Caso estudio Magdalena y caja de herramientas para la aplicación automatizada a la cuenca. *GeoMagda ToolBox*.
- Pérez Soto, F. (2018). Sectorización hidrogeológica del acuífero del Río Laja, Región del Biobío. Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.
- Rentier, E. S., & Cammeraat, L. H. (2022). The environmental impacts of river sand mining. *Science of The Total Environment*, 838, 155877.
- Roux, C., Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L., & Piégay, H. (2015). “FluvialCorridor”: A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology*, 242, 29-37.
- Salas, F. (2021). Caracterización morfológica usando el marco River Styles en el Río Duqueco: una herramienta de apoyo para la gestión de cauces. Trabajo de grado, Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Concepción.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Publicación Geológica Digital, No 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago, Chile.
- Suprema condena a Tribasa a reparar daño ambiental en río Laja (2012, 31 de mayo). Santiago de Chile: *Fundación Terram*. Recuperado el 9 de diciembre de 2023, de <https://www.terram.cl/2012/05/suprema-condena-a-tribasa-a-reparar-dano-ambiental-en-rio-laja/>
- Thiele, R., Moreno, H., Elgueta, S., Lahsen, A., Rebolledo, S., & Petit-Breuilh, M. E. (1998). Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista geológica de Chile*, 25(2), 229-253.
- Torres, A., Brandt, J., Lear, K., Liu, J., (2017). A looming tragedy of the sand commons. *Science* 357 (6355), 970–971.
- Wentworth C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(377-392).
- Yépez, S., Salas, F., Vargas, J., Osore, V., & Rodríguez, R. (2022). Morphological characterization using South Rivers Toolbox in the Duqueco river: A support tool for river management (No. IAHS2022-759). Copernicus Meetings.

ANEXOS

ANEXO 3.3.1: Métodos utilizados para la delimitación base de la llanura de inundación del río Laja. En la Fig. A.1 se muestra mapa geológico de la cuenca hidrográfica del río Laja, basado en el mapa 1:1.000.000 del Sernageomin (2003), a partir de la cual se realizó una revisión visual para garantizar que el polígono no excediera los límites de las unidades geológicas identificadas, encontrándose mayormente establecida en unidades de depósitos de avalancha volcánica. Esta figura es también utilizada en la sección 1.6.2. Además de esto, en la Fig. A.2 se muestran los perfiles transversales realizados a lo largo del río que permitieron la observación y corrección manual de las zonas donde se detectaron terrazas y laderas que influían en la delimitación de la llanura. Además, se muestran 3 ejemplos de cómo la llanura queda delimitada dependiendo de las laderas y terrazas adyacentes. Estas figuras fueron realizadas por Carrasco (2023).

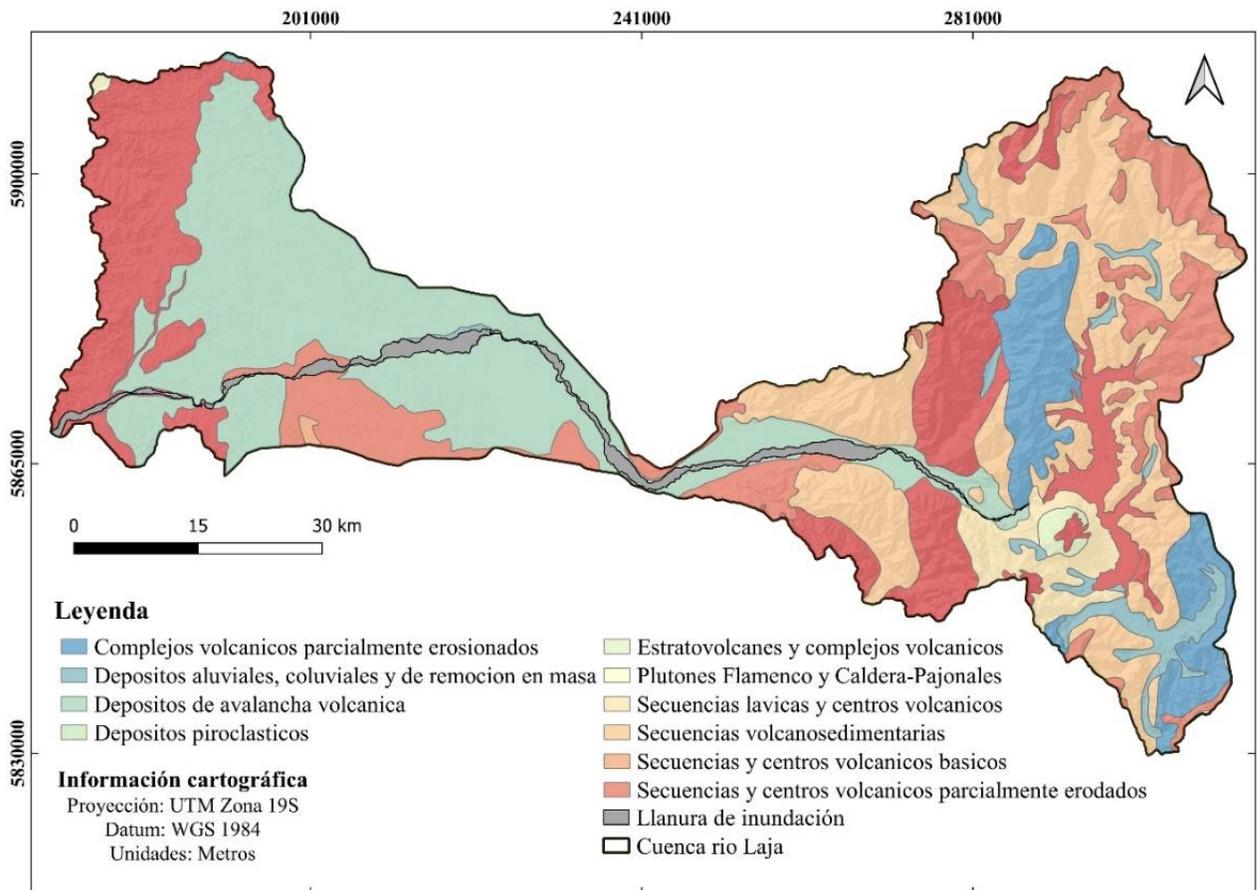


Fig. A. 1: Mapa geológico de la cuenca del río Laja. Basado del mapa 1:1.000.000 del Sernageomin (2003). Tomada de Carrasco (2023).

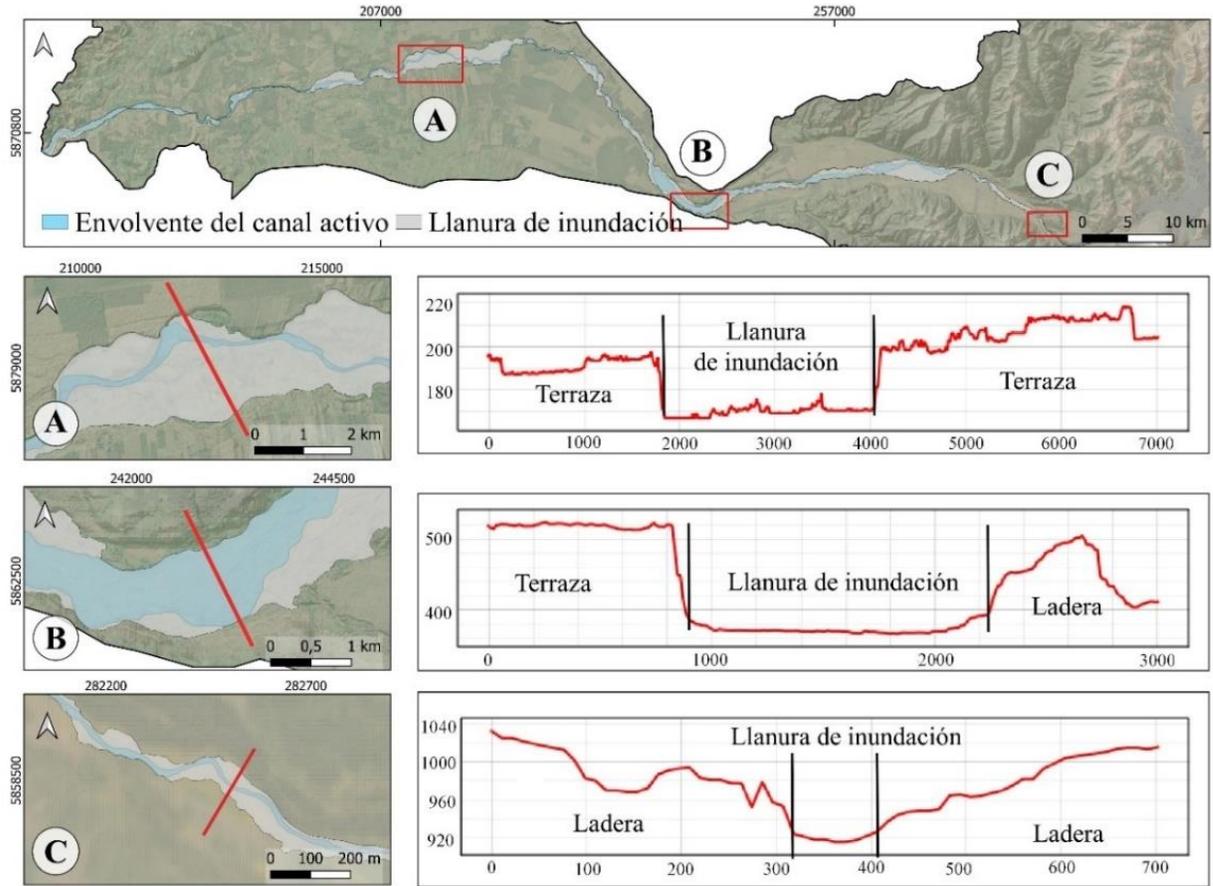


Fig. A. 2: Mapa de la cuenca y tres ejemplos de perfiles transversales realizados en diferentes partes del corredor fluvial. Tomada de Carrasco (2023).

ANEXO 4.1: Resultado de la extracción de la llanura de inundación mediante la herramienta V-BET. La Fig. A.3 representa la llanura de inundación delimitada y tres ejemplos de los resultados obtenidos con la herramienta recién mencionada en distintas zonas de la cuenca. A y A' representan la zona alta de la cuenca y se observa que la delimitación es bastante precisa; mientras que B y B' representan la zona media de la cuenca donde la delimitación de V-BET se hace más fina producto de los cambios bruscos de ancho que ocurren en esta zona de la cuenca. Finalmente, C y C' representan la zona baja de la cuenca donde la delimitación de V-BET se restringe a la envolvente del canal activo siendo esta zona donde existió una mayor modificación manual mediante otros métodos de calibración (Carrasco, 2023).

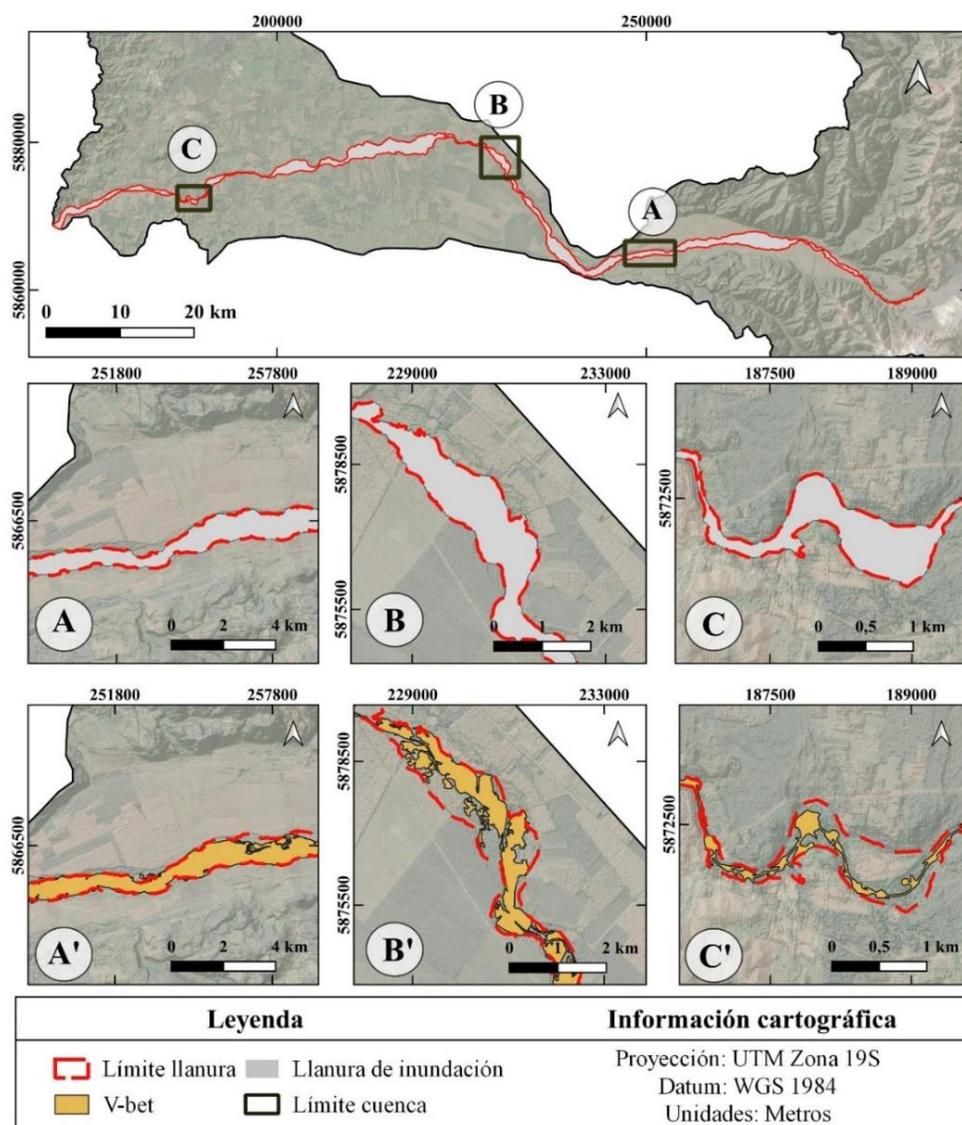


Fig. A. 3: Imagen de la cuenca del río Laja con el polígono extraído de la llanura de inundación mediante la herramienta V-BET. Se muestra un acercamiento a secciones de la cuenca con un rendimiento distinto de la herramienta. Tomada de Carrasco (2023).

ANEXO 4.5: Marco River Styles

- **Tramos homogéneos representativos del río Laja:**

La Fig. A.4 muestra los tramos representativos del río para definir los estilos fluviales. Se observa un total de 68 tramos homogéneos. Estos tramos poseen homogeneidad en sus formas y procesos. Los embalses y centrales representan el tramo 0 y no se consideraron para realizar la clasificación de estilos de río debido a que estas zonas han sido intervenidas para realizar la construcción de infraestructura y no representan características naturales del río (Carrasco, 2023).

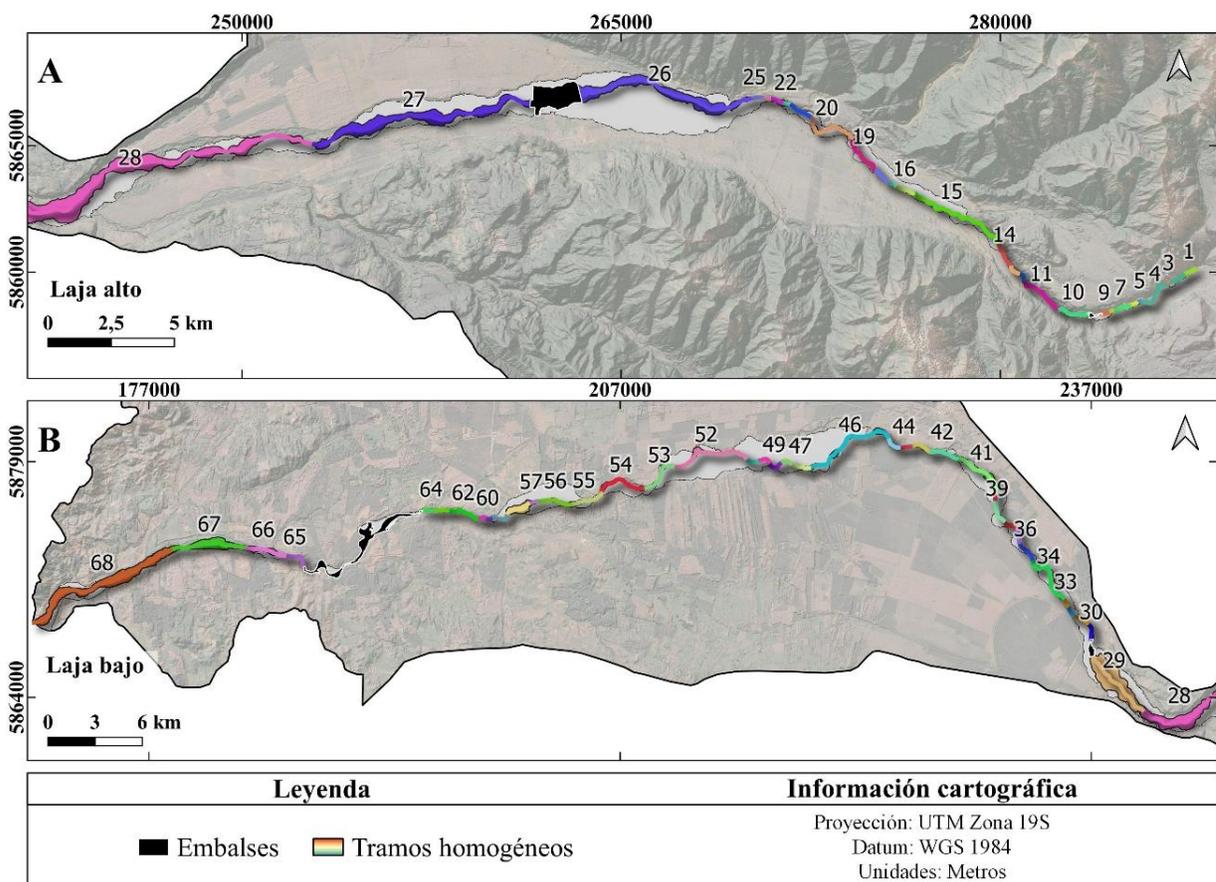


Fig. A. 4: Mapa de la cuenca del río Laja con los 68 tramos homogéneos obtenidos para el corredor fluvial. Tomada de Carrasco (2023).

- **Presencia de unidades geomórficas (UG):**

Las unidades geomórficas (UG), es decir barras e islas, presentes en la cuenca del Laja para la escena del año 2019 realizada por Carrasco (2023) se muestran en la Fig. A.5, donde se representa su presencia de color verde para las islas y marrón claro para las barras, y de

color rojo su ausencia. En la zona alta de la cuenca, caracterizada por un fuerte *stream power* y elevada pendiente, se observa la ausencia de UG debido a la dificultad para la acumulación de sedimentos. A medida que se alcanza la confluencia con el río Polcura, aparecen las primeras barras, principalmente laterales, probablemente debido al aporte sedimentario de este tributario, el cual transporta sedimentos desde las zonas montañosas con elevada pendiente. En el tramo siguiente, desde la confluencia hasta la Central Laja, se destaca la presencia predominante de islas y una escasez de barras significativas. De hecho, este tramo se categoriza en su totalidad como un tramo de isla-trenzado (ver Fig. 4.11). Después de la Central Laja, se observan algunas barras tanto laterales como centrales, con y la casi total ausencia de islas, en un tramo que se caracteriza por estar en gran medida confinado (ver Fig. 4.10(E)) y muy angosto. Una vez la llanura se expande lateralmente, reaparecen en gran cantidad las islas, mientras que las barras se encuentran más restringidas espacialmente. En tramos angostos y altamente confinados, como cerca de los Saltos del Laja (ver Fig. 4.10(F)), las islas tienden a desaparecer, para luego volver a aparecer en gran cantidad con densa vegetación en el tramo fluvial final del tipo isla-trenzado. En resumen, cerca del 58% del corredor se encuentra con presencia de islas, mucho mayor que la presencia de barras que alcanzan alrededor del 20%.

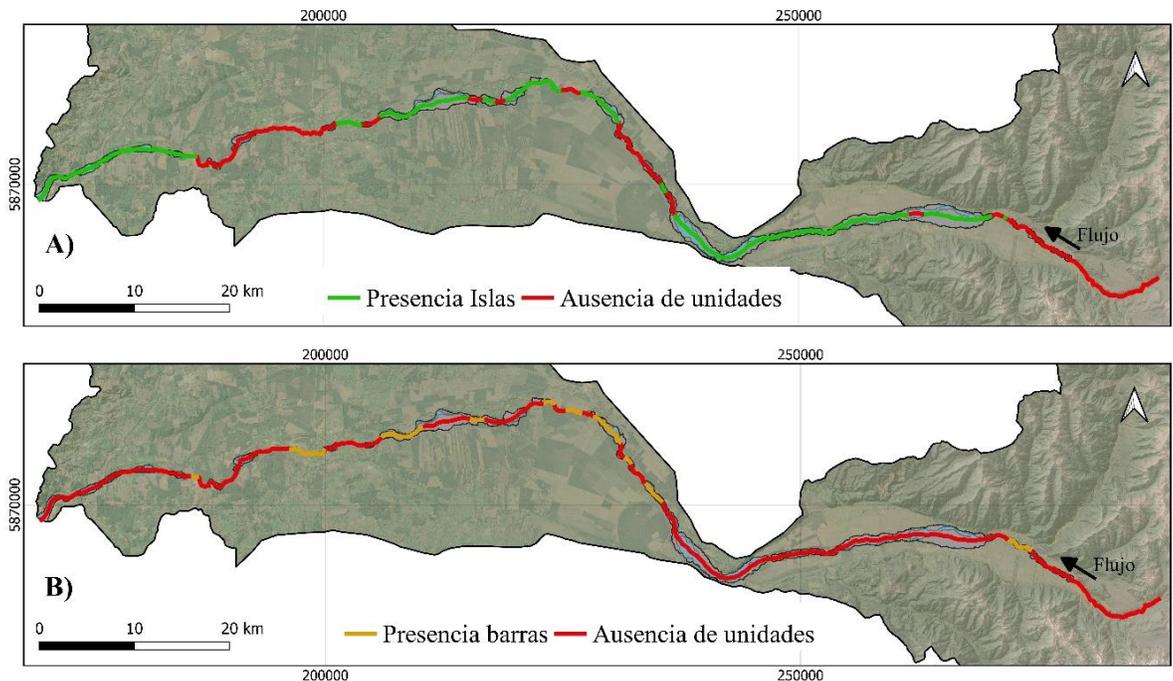


Fig. A. 5: Mapa de agregados de unidades geomórficas. Imagen tomada de Carrasco (2023).

ANEXO 5.5: Imágenes extraídas del informe técnico de fiscalización ambiental realizada por la DGA de la región del Biobío a la unidad fiscalizable “EXTRACCIÓN ÁRIDOS RIO LAJA TRIBASA” localizada en el sector de Paraguay en la comuna de Los Ángeles cercano al río Laja. La Fig. A.6 fue extraída de la “DIA. EXTRACCIÓN MECANIZADA ÁRIDOS TRIBASA RCA N°107/ 1998”, e indica, con un cuadro rojo, el lugar de ubicación del proyecto de extracción. Se observa que se ubica en el sector denominado “Paraguay”. Por su parte, la Fig. A.7 muestra una imagen satelital de *Google Earth Pro* del año 2020 con un recuadro rojo que marca la zona donde se realizaron faenas de extracción de material. El proyecto se encuentra actualmente fuera de funcionamiento.

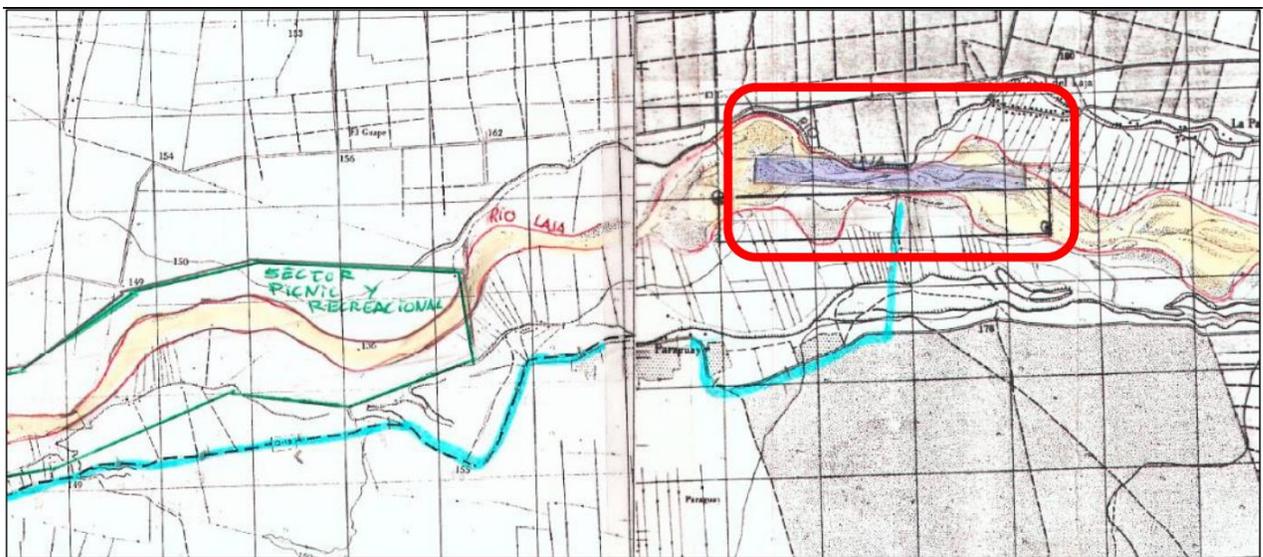


Fig. A. 6: Figura extraída de la DIA. EXTRACCIÓN MECANIZADA ÁRIDOS TRIBASA RCA N°107/ 1998, que exhibe la ubicación del proyecto de extracción.



Fig. A. 7: Imagen satelital de *Google Earth Pro* con fecha 2/27/2020 y que muestra en un polígono rojo la zona donde se llevó a cabo la extracción de material.