



**Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil**

**ANÁLISIS DEL CARÁCTER Y COMPORTAMIENTO DEL RÍO DUQUECO BAJO UN
ENFOQUE GEOMORFOLÓGICO- HIDRÁULICO INTEGRADO**

POR

Francisca Andrea Salas Cárdenas

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

Profesor Guía
José Vargas Baecheler
Profesor Co-Guía
Santiago Yépez Figueroa

Julio 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Francisca Andrea Salas Cárdenas

© 2023 Francisca Andrea Salas Cárdenas

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

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el financiamiento recibido a través del proyecto Innova Chile – CORFO (19BP-117424), Bienes Públicos Adaptación al Cambio Climático, titulado *South Rivers Toolbox: Modelo predictor de la morfodinámica fluvial para apoyar la gestión de cauces 2020-2023*.

Expreso mi agradecimiento a mis profesores Dr. José Vargas y Dr. Santiago Yépez por su guía durante todo el programa de magíster, así como también por el tiempo dedicado para revisar y corregir esta tesis.

Finalmente, mi sincero agradecimiento al profesor Dr. Rolando Rodríguez por sus recomendaciones para orientar y desarrollar esta Tesis.

RESUMEN

Entre los impactos del cambio climático, se encuentran: el aumento de la temperatura; incremento de precipitaciones intensas e inundaciones pluviales; aumento de zonas con sequía; disminución de nieve y glaciares; y aumento del nivel del mar. En Chile, la mayor ocurrencia de los desbordamientos se presenta entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos, cuyas consecuencias son: pérdidas humanas; deterioro a la infraestructura; y la paralización de actividades económicas. Los esfuerzos por mitigar las consecuencias de las inundaciones, por parte de los tomadores de decisiones, se han centrado en medidas estructurales evaluadas de forma local, las que podrían no ser totalmente efectivas o inclusive, producir efectos negativos sobre los sistemas hidráulicos, ecológicos y geomorfológicos. De ahí surge, la necesidad de contar con una herramienta para el análisis integral de los cauces, que incluya la evaluación de la morfodinámica fluvial en conjunto con el análisis hidráulico.

El objetivo de esta Tesis es analizar el carácter y comportamiento del río Duqueco a escala cuenca, con un enfoque geomorfológico – hidráulico integrado. Para el análisis geomorfológico se aplica la primera etapa del marco *River Styles*, que caracteriza y clasifica estilos fluviales en función de atributos hidromorfológicos. Todo el proceso se realiza de forma semiautomatizada con herramientas del complemento *South Rivers Toolbox* (desarrollado en el marco de este estudio), y ejecutado desde el *software* QGIS. Para el análisis hidráulico se realiza una modelación hidráulica bidimensional del cauce a escala cuenca, simulando una crecida centenaria. Finalmente, se establecen relaciones entre las zonas que presentan mayor área de desbordamiento y las características de los estilos fluviales que dominan esos tramos del río.

Como resultados, se diferencian 42 estilos fluviales principales y 57 estilos complementarios, separando el cauce en tres zonas principales. La zona alta mayoritariamente confinada, monocanal, con lecho de cantos rodados y bloques, siendo altamente intervenida por las obras de generación eléctrica. La zona media, en su mayor parte confinada y monocanal, con un cambio en el tipo de lecho a cantos rodados. Finalmente, la zona baja más diversa en estilos, mayoritariamente no confinada, con alta presencia de unidades geomórficas (UG) que dan paso a las zonas multicanales y de transición. Por otro lado, producto de la modelación hidráulica se identifican las zonas de inundación del cauce ante una crecida centenaria, siendo estas zonas no confinadas, con baja pendiente y alta formación de UG.

ABSTRACT

The impacts of climate change include an increase in temperature, intense precipitation and pluvial flooding, drought areas; decrease in snow and glaciers, and sea level rise. In Chile, most floods occur between the regions of Valparaíso and Los Lagos and their consequences include human loss, damage to infrastructure, and paralysis of economic activities. Efforts to mitigate the consequences of floods by decision-makers have focused on structural measures evaluated locally, which may not be totally effective or may even produce negative effects on hydraulic, ecological, and geomorphological systems. Hence, there is a need for a tool for the integral analysis of watercourses, which includes the evaluation of fluvial morphodynamics together with hydraulic analysis.

The objective of this thesis is to analyze the character and behavior of the Duqueco River at a basin scale, and with an integrated geomorphological-hydraulic approach. For the geomorphological analysis, the first stage of the River Styles framework is applied, which characterizes and classifies fluvial styles according to hydromorphological attributes. The entire process was carried out in a semi-automated manner using tools from the South Rivers Toolbox set in the QGIS software. For the hydraulic analysis, two-dimensional hydraulic modeling of the riverbed was performed at the basin scale, simulating a centennial flood. Finally, relationships are established between the areas with the greatest overflow and the characteristics of the fluvial styles that dominate those sections of the river.

Consequently, 42 main fluvial styles and 57 complementary styles were differentiated, separating the riverbed into three main zones. The upper zone is mostly confined, single-channel, with a bed of boulders, and is highly affected by power generation. The middle zone is mostly confined and single-channel, with a change in the bed type to boulders. Finally, the lower zone is more diverse in styles, mostly unconfined, with a high presence of geomorphic units (GU) that give way to multichannel and transition zones. On the other hand, because of the hydraulic modeling, the flood zones of the channel are identified in the face of a centennial flood, which are unconfined zones with a low slope and high formation of GU.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis.....	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4. Metodología de trabajo.....	3
1.5. Principales resultados	4
1.6. Organización de la tesis.....	4
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA	5
2.1. Introducción	5
2.2. Geomorfología y gestión de cuencas	5
2.3. Sensores remotos.....	6
2.4. Caracterización del río de forma continua	6
2.5. Marco River Styles.....	7
2.6. Conclusiones	10
CAPÍTULO 3: MODELACIÓN HIDRÁULICA	11
3.1. Introducción	11
3.2. Modelación hidráulica y gestión de obras fluviales	11
3.3. Ecuaciones generales del flujo	12
3.4. Modelación hidráulica con software IBER	14
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA	16
4.1. Introducción	16

4.2.	Área de estudio.....	16
4.3.	Datos disponibles	18
4.4.	Caracterización Geomorfológica.....	18
4.4.1	Procesamiento de imágenes satelitales.....	18
4.4.2	Marco de desagregación y agregación del corredor fluvial	21
4.4.3	Marco <i>River Styles</i> : Etapa 1	25
4.5.	Modelación hidráulica del cauce.....	28
4.5.1	Preproceso	28
4.5.2	Postproceso.....	33
4.6.	Conclusiones	33
	CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
5.1.	Introducción	34
5.2.	Carácter del cauce: enfoque geomorfológico.....	34
5.2.1	Objetos geográficos unitarios.....	34
5.2.2	Objetos geográficos desagregados	40
5.2.3	Métricas locales.....	41
5.2.4	Objetos geográficos agregados y tramos representativos	48
5.2.5	Clasificación de estilos fluviales	48
5.3.	Comportamiento del cauce: enfoque hidráulico.....	57
5.3.1	Área de inundación.....	57
5.3.2	Mapa de peligrosidad	59
5.4.	Análisis integral hidráulico- geomorfológico	60
5.5.	Conclusiones	60
	CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	62

REFERENCIAS	64
ANEXO 3.1: ESQUEMAS DE TRABAJO DE MODELOS CREADOS EN QGIS.....	72
ANEXO 4.1: RELACIÓN EMPÍRICA ENTRE CAUDAL MÁXIMO ANUAL Y ÁREA DE DRENAJE PARA EL RÍO DUQUECO.....	75
ANEXO 4.2: MATRIZ CON RECOPIACIÓN DE ATRIBUTOS A ESCALA DE TRAMO Y CLASIFICACIÓN DEL ESTILO FLUVIAL	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Criterios de Peligrosidad de la Normativa Española estipulada en la Real Orden 9/2008, utilizadas por el software Iber.	15
Tabla 4.1 Características de las imágenes satelitales que constituyen el mosaico de la cuenca en estudio	19
Tabla 4.2 Tamaños del sedimento del lecho del río considerados en el estudio.....	24
Tabla 4.3 Número de condiciones de contorno de entrada y salida para diferentes tipos de régimen de escurrimiento	29
Tabla 4.4 Caudal para un periodo de retorno de 100 años para las estaciones fluviométricas sobre el río Duqueco	29
Tabla 4.5 Estimación del coeficiente de Manning según método de Cowan.....	31
Tabla 5.1 Atributos hidromorfométricos de los estilos fluviales presentes en el río Duqueco.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Etapas del marco River Styles	8
Figura 3.1 Módulos de cálculo del software Iber.....	14
Figura 4.1 Área de estudio, cuenca del río Duqueco	17
Figura 4.3 Flujo de trabajo en <i>software</i> ENVI para la obtención del mosaico de la cuenca con datos de reflectancia	19
Figura 4.4 Distribución de frecuencia del porcentaje de reflectancia NIR para un área que incluye varios lagos	20
Figura 4.5 Flujo de trabajo en software ENVI, para la obtención del NDWI y el polígono de la marca de agua.....	21
Figura 4.6 Definición de las unidades espaciales y el eje de referencia para la caracterización de los objetos geográficos a escala de red.....	21
Figura 4.7 Atributos más relevantes calculados de forma directa sobre cada DGO.....	23
Figura 4.8 Características de las formas en planta.	24
Figura 4.9 Árbol procedimental modificado del original propuesto por los autores	26
Figura 4.10 Proceso para determinar confinamiento del cauce	27
Figura 4.11 Proceso para determinar causa del confinamiento del cauce.....	27
Figura 4.12 Proceso para determinar presencia o ausencia de Unidades Geomorfológicas	28
Figura 4.13 Ubicación de los principales aportes de caudal al río Duqueco	30
Figura 4.14 Esquema resumen de la construcción del modelo hidráulico bidimensional en Iber	33
Figura 5.1 I) Cuenca del río Duqueco con marca de agua para todos los valores negativos de NDWI. II) Cuenca del río Duqueco con polígono del canal activo y su envolvente. A y A' ejemplifican la limpieza del polígono en la parte baja de la cuenca. B y B' ejemplifican la limpieza del polígono en la parte alta de la cuenca.....	35
Figura 5.2 Unidades geomórficas en el río Duqueco, A) zona de confluencia con el río Biobío, alta presentación de UG, B) zona aguas arriba de A, presencia de meandros cortados, C) zona alta de la cuenca, formación de barras e isla aguas arriba del contraembalse Rucacura.	36

Figura 5.3 Polígono de la llanura de inundación. A) Detalle de la llanura de inundación en la zona cercana a la confluencia con el río Biobío. B) Detalle de la llanura de inundación en la zona alta de la cuenca.....	37
Figura 5.4 Comparación entre el polígono de la llanura de inundación delimitado con la herramienta VBET, y el mapa de inundaciones de la cartografía social en la zona cercana a la confluencia del río Duqueco y Biobío.....	38
Figura 5.5 Mapa geológico de la zona de estudio junto al polígono de la llanura de inundación del río Duqueco	39
Figura 5.6 Perfiles de elevación transversal en tres zonas de la llanura de inundación del río Duqueco, extraídos con la herramienta <i>terrain profile</i> de QGIS, el eje vertical indica la elevación en m.s.n.m y el eje horizontal la distancia en metros	40
Figura 5.7 Llanura de inundación y envolvente de canales desagregadas cada 100 y 50 metros. .41	
Figura 5.8 Ancho de la llanura de inundación, medida sobre el eje central desde aguas arriba hacia agua abajo	41
Figura 5.9 Comparación entre el ancho del canal activo y su envolvente	42
Figura 5.10 Esquema ubicación de centrales hidroeléctricas en río Duqueco	44
Figura 5.11 Potencia específica de la corriente.....	45
Figura 5.12 Sinuosidad local del cauce.....	45
Figura 5.13 Elevación, área de drenaje y pendiente.....	45
Figura 5.14 Zonas del cauce con alto potencial de corriente específica	46
Figura 5.15 Clasificación del material del lecho en el río Duqueco	47
Figura 5.16 Registro fotográfico de zonas visitadas.	48
Figura 5.18 Confinamiento del cauce en comparación al ancho de la llanura aluvial.....	49
Figura 5.19 Confinamiento y su causa para cada segmento del cauce, en cada mapa la dirección del flujo es de derecha a izquierda, como se puede ver en la numeración de los segmentos siguiendo la misma dirección desde el número 1 hasta el 101.....	50
Figura 5.20 Presencia o ausencia de barras e islas en cada segmento del corredor fluvial.....	51
Figura 5.21 Distribución de estilos fluviales en el río Duqueco	54

Figura 5.22 Área de inundación del río Duqueco para una crecida centenaria.....	58
Figura 5.23 Mapa de peligrosidad ante una crecida centenaria en el río Duqueco.....	59

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

El conjunto de cambios que se han producido a escala planetaria, como el cambio climático, el aumento de la población mundial, el incremento de los gases de invernadero, el aumento de los residuos sólidos y el cambio en el uso de suelos, han acelerado procesos naturales y degradado el sistema terrestre (Duarte et al., 2006). En cuanto a los principales impactos del cambio climático, proyectados en todo el mundo, se encuentran: aumento de la temperatura promedio de la superficie terrestre; incremento de eventos de precipitación intensas e inundaciones pluviales; aumento de zonas con sequía; disminución de nieve, glaciares y *permafrost*; aumento del nivel del mar, inundaciones y erosión costera. (Trenberth, 2011; Kundzewicz et al., 2014; Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC], 2021).

En cuanto a los eventos extremos en Chile, una recopilación entre 1960 y 1991 muestra 23 eventos, de los cuales 64 % corresponden a inundaciones y 36 % a sequías, siendo los desbordamientos los que presentan una mayor ocurrencia entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos (Rojas, 2015; Urrutia de Hazbun y Larza, 1993).

Debido a la gran diversidad climática del país, las inundaciones tienen distintos orígenes, en particular la zona mediterránea (32° - 38°S), que concentra el mayor número de eventos, las inundaciones se generan por sistemas frontales fríos y cálidos, intensificados por el patrón climático del niño oscilación sur (ENOS), al acercarse a la cordillera andina, estos sistemas frontales cálidos provocan la elevación de la isoterma 0, y en consecuencia una mayor extensión del área pluvial, lo que contribuye a la generación de inundaciones más intensas (Gonzales, 1987; Quintanilla, 1995; Carrasco *et al.*, 2005).

En cuanto a los efectos ambientales de las inundaciones en Chile, estas han dejado pérdidas humanas, deterioro a la infraestructura, paralización de actividades de cultivo y ganadería, entre otros, lo que se traduce en cuantiosas pérdidas para el Estado y el deterioro de la calidad de vida de la población afectada (Rojas, 2015).

Los esfuerzos por mitigar las consecuencias de las inundaciones, por parte de los tomadores de decisiones, se han centrado en medidas estructurales, asociadas a obras de protección como: obras de mampostería gavionada, canalizaciones, diques (Rojas y Martínez, 2011; Bhuiyan y Dutta, 2012). Estas medidas son evaluadas de forma local, y podrían producir efectos negativos sobre los sistemas hidráulicos (modificación de la velocidad del cauce, zonas de erosión y sedimentación), ecológicos (reducción de hábitat y biodiversidad) y geomorfológicos (equilibrio sedimentario, cambio en las formas en planta del cauce) (Conesa y Pérez, 2014; Graf et al., 2016). Sumado a esto, el presupuesto acotado exige contar con planes de priorización y selección de las obras de control.

Por lo anteriormente expuesto, se hace necesario contar con herramientas que permitan analizar el cauce de forma integral, que combinen el análisis de hidrológico, hidráulico y geomorfológico, a nivel cuenca, permitiendo determinar las secciones críticas de un cauce (propensas a cambiar luego de un evento extremo), evaluar los cambios en el corredor fluvial producto del cambio climático, del factor antrópico y finalmente buscar soluciones compatibles con los procesos naturales de respuesta y ajuste de los cauces.

1.2. HIPÓTESIS

Existe una relación entre las zonas del cauce activo propensas a inundaciones ante crecidas extraordinarias, que pueden ser determinadas por la modelación hidráulica y el estilo fluvial, como consecuencia de las características geomorfológicas de la zona.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Analizar el carácter y comportamiento del río Duqueco a escala cuenca, con un enfoque geomorfológico – hidráulico integrado.

1.3.2 Objetivos específicos

- Calcular parámetros hidromorfológicos del río Duqueco a escala local y de cuenca de forma semiautomatizada mediante la herramienta *South Rivers Toolbox* (SRT).
- Determinar los estilos fluviales en el río Duqueco, en base a parámetros hidromorfológicos utilizando el marco *River Style*.
- Delimitar las zonas de inundación y peligrosidad en el río Duqueco al simular una crecida centenaria, mediante una modelación hidráulica bidimensional.
- Relacionar las zonas propensas a inundaciones con las características de los estilos fluviales que dominan estos tramos.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se inicia con un análisis de forma separada en la determinación de los estilos fluviales del cauce y la delimitación de zonas de inundación, luego ambos resultados se ordenan para establecer relaciones entre el comportamiento y carácter del río.

Para el caso de los estilos fluviales, se aplica la primera etapa del marco River Styles (Brierley y Fryirs, 2005), que requiere de un conjunto de parámetros hidromorfológicos (e.g. sinuosidad, confinamiento, ancho del canal activo, entre otros), los cuales son calculados en forma detallada en base al marco de desagregación y agregación propuesto por Alber y Piegay (2011). Para facilitar y automatizar este proceso, se trabaja con las bandas espectrales de imágenes satelitales (nanosatélites PlanetScope), y con la caja de herramientas de desarrollo propio, denominada de South Rivers Toolbox.

Además, se realiza una modelación hidráulica bidimensional a lo largo de todo el cauce, para simular una crecida centenaria, a partir de los datos de topografía, caudales registrados y granulometría del lecho, utilizando el software IBER (Blade et al., 2014).

Finalmente, se establecen relaciones entre las zonas que presentan mayor área de desbordamiento y las características de los estilos fluviales que dominan esos tramos del río.

1.5. PRINCIPALES RESULTADOS

Como resultados se clasifican y caracterizan 43 estilos fluviales principales y 57 estilos complementarios en el río Duqueco, en base a las métricas de confinamiento, causa del confinamiento, forma en planta, material del lecho, y presencia o ausencia de unidades geomorfológicas (barras, islas, paleocauces, etc.). A partir de los estilos fluviales obtenidos, se puede catalogar el cauce en 3 zonas principales. La zona alta, caracterizada por ser mayoritariamente confinada, monocal, con lecho de cantos rodados y bloques, siendo altamente intervenida por obras de generación eléctrica existentes; la zona media, sigue en su mayor parte confinada y monocal, con un cambio en el tipo de lecho hacia cantos rodados. Finalmente, la zona baja es más diversa en estilos, mayoritariamente no confinada, con alta presencia de unidades geomórficas que dan paso a las formas en planta transicionales, y solo en zonas puntuales aparecen tramos multicanales.

En cuanto al comportamiento del cauce, este presenta las mayores áreas de desbordamiento desde el puente Duqueco hacia aguas abajo, afectando a sectores poblados, ubicados en la zona de inundación, entre ellos el sector de Llano Blanco. Por otro lado, el mapa de peligrosidad indica que prácticamente toda el área inundada en algún momento del desarrollo de la crecida alcanzará niveles de alta peligrosidad, con un valor de velocidad por tirante del agua mayor a $0,5 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$.

Finalmente, se obtiene una relación entre las zonas que no presentan desbordamientos, como también de aquellas que sí, y las características de los estilos fluviales.

1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El informe de Tesis de Magister consta de seis capítulos. En el segundo y tercer capítulo se presenta una revisión del estado del arte para el enfoque geomorfológico e hidráulico. En el cuarto capítulo se detalla la metodología empleada. En el quinto capítulo se presentan los resultados y análisis con respecto a los parámetros hidromorfológicos del río, la clasificación de los estilos fluviales, y la modelación hidráulica bidimensional. Finalmente, en el sexto capítulo se exponen las conclusiones del trabajo y las líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el marco teórico relacionado a la geomorfología de cauces, comenzando por los avances de esta rama en las prácticas de gestión de ríos. Luego, una revisión de los métodos y técnicas ligadas al procesamiento de los datos disponibles. Finalmente, se introducen los dos marcos claves para la caracterización geomorfológica usados en este estudio, el primero orientado a la obtención de métricas a distintas escalas espaciales por medio de la desagregación y agregación del cauce, y el segundo para la determinación de los estilos fluviales.

2.2. GEOMORFOLOGÍA Y GESTIÓN DE CUENCAS

La geomorfología fluvial es la rama de la ciencia que estudia los accidentes geográficos, formas y relieves ocasionados por los ríos sobre la superficie terrestre, e intenta comprender los procesos responsables de su desarrollo (Kellerhals y Church, 1989).

Los primeros avances de geomorfología y gestión fluvial se originan en el creciente interés en la restauración de los cauces, y para abordar las temáticas de ética ambiental, el desarrollo sostenible, cambio climático, salud de los ríos, entre otros. (Gregori *et al.*, 2008; Sear, 1994). Las primeras aplicaciones utilizan una escala local de las características del río, es decir, se miden los elementos que se encuentran en el cauce y se diseñan de forma aislada de la red de drenaje. Muchos de los elementos creados por este proceso se encuentran sobredimensionados, lo que refleja la duda en el rendimiento del diseño que se deriva de un conocimiento incompleto de la naturaleza del terreno fluvial (Brookes *et al.*, 1992).

La incorporación de la visión holística espacial y temporal, el análisis a escala cuenca y rango temporal definido, permite entender los procesos y formas del cauce, predecir la respuesta del río ante alguna perturbación, aguas arriba o aguas abajo, analizar cambios en el régimen de sedimentos, régimen hidrológico, y de esta forma una gestión sostenible en coherencia con el dinamismo y la diversidad de los cauces (Brierley y Fryirs, 2005). En las últimas décadas han surgido programas de gestión

fluvial, multifuncionales y a escala cuenca, entre ellos el marco en el que se fundamentará este estudio (Hillman y Brierley, 2005).

2.3. SENSORES REMOTOS

La recolección de datos en terreno para caracterizar los corredores fluviales presenta la limitación de no abarcar grandes dimensiones espaciales y temporales. Esto afecta la comprensión de la trayectoria fluvial, ya que es necesario evaluar los cambios del río en escalas espaciales de cuenca o red, como también, en rangos temporales mayores al interanual usando datos de campo. En este punto, el aumento y calidad de los datos de teledetección permite ampliar la dimensión espacial y temporal, como también reducir los costos de la investigación. Entre los instrumentos de teledetección, se encuentran los sensores (cámaras digitales o de video, sensores térmicos, infrarrojos, hiperspectrales y multiespectrales, LiDAR [del inglés *light detection and ranging*], radar de penetración en el suelo o geófonos) y los acoplados a plataformas (por satélite, aerotransportados o incluso terrestres, como el octocóptero, hexacóptero, triciclos equipados con cámaras RGB [del inglés *red, green, blue*] y térmicas, así como helicópteros no tripulados) (Piégay *et al.*, 2020). Esto no significa que los datos de campo no sean necesarios, sino estos se complementan para validar la calidad de los datos obtenidos por la teledetección (Carbonneau y Piégay, 2012; Bizzi *et al.*, 2016). Finalmente, se logra un enfoque integral al utilizar datos de sensores remotos, datos de terreno y documentos archivados (estudios topográficos, mapas antiguos, fotos aéreas históricas, etc.). Si bien estos últimos usualmente no poseen buena calidad, dan cuenta de las formas y procesos del corredor fluvial en años anteriores a la implementación de los sensores remotos (Piegay *et al.*, 2020).

2.4. CARACTERIZACIÓN DEL RÍO DE FORMA CONTINUA

La heterogeneidad de las formas y procesos fluviales a escala de red se analiza tradicionalmente con la medición puntual de atributos en un número reducido de lugares a lo largo del corredor fluvial. Actualmente, con la disponibilidad de datos continuos (*e.g* modelos de elevación digital, imágenes satelitales, fotos aéreas, etc.) hay nuevas posibilidades para investigar la variabilidad de las métricas a lo largo de las redes de drenaje de forma continua (Orr *et al.*, 2008).

En este contexto, el marco metodológico de desagregación y agregación del cauce, desarrollado por Alber y Piégay (2011), permite delimitar unidades espaciales con características homogéneas para investigar la heterogeneidad de las redes de drenaje a partir de datos continuos. Enfoques como el juicio de expertos carecen de objetividad y requieren de mucho tiempo, a diferencia de los métodos gráficos o la delimitación de unidades espaciales anidadas (Phillips, 2008; Schmitt *et al.*, 2007). El marco de Alber y Piégay, es totalmente objetivo y replicable, ha sido automatizado en el *software* ArcGIS con un algoritmo de código abierto llamado *Fluvial Corridor Toolbox* (Roux *et al.*, 2015).

El marco consiste en cuatro pasos, el primero comprende delimitar objetos geográficos unitarios que representan un componente biofísico del sistema, como el canal activo o su llanura de inundación. A continuación, se desagregan estos objetos para caracterizarlos a mayor resolución. Luego se procede a calcular métricas sobre cada objeto desagregado. Finalmente, los segmentos son agregados en torno a una o varias métricas, según una prueba estadística, formando unidades espaciales a mayor escala y características homogéneas (Alber y Piégay, 2011).

2.5. MARCO RIVER STYLES

En el contexto introducido en las secciones anteriores, se encuentra el Marco *River Styles* (Brierley y Fryirs, 2000), el que proporciona una herramienta geomórfica para la evaluación del carácter, el comportamiento, la evolución y el estado de los ríos en toda la cuenca, teniendo como objetivo final la gestión sostenible, de los corredores fluviales.

El marco *River Styles* (RS) consta de cuatro grandes etapas (Figura 2.1 Etapas del marco River Styles), si bien en este trabajo se implementa solo la primera etapa sobre el río Duqueco, se explicarán las 4 etapas de forma general, para entender las potencialidades del marco y sus ventajas.

La primera etapa implica clasificar y caracterizar los estilos fluviales en el cauce, ellos registran el carácter y comportamiento del río a la escala del segmento. Estos estilos fluviales se definen en términos de un conjunto de métricas, como la configuración del valle de inundación, la forma del cauce, las unidades geomórficas, la textura del material del lecho, el confinamiento, entre otros. Algunos de estos análisis pueden ser semiautomáticos dependiendo de los datos disponibles y los *softwares* utilizados (Fryirs *et al.*, 2019).

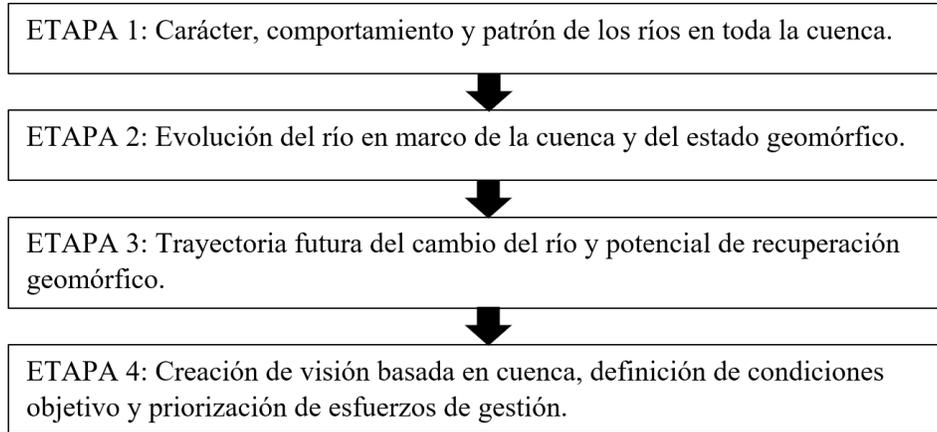


Figura 2.1 Etapas del marco River Styles

Fuente: Adaptado de Brierley y Fryirs (2005)

En la segunda etapa, se analiza la condición geomórfica del río, para lo cual se evalúa el estado actual de un tramo de un estilo fluvial con relación a la condición “esperada” que se tenía para ese tipo de río. Además, se evalúan las causas del deterioro y la capacidad de ajuste (Fryirs, 2015).

En la tercera etapa se evalúa el potencial de recuperación, para esto, se predice el futuro de los ríos, el que refleja la sensibilidad de cualquier segmento a una perturbación humana, como también el efecto de esta perturbación sobre otros segmentos en la cuenca (Brierley y Fryirs, 2009).

Finalmente, la cuarta etapa considera las aplicaciones de gestión. En primer lugar, determinando que es lo deseable, esforzándose por la mejor estructura y funcionamiento del río en toda la cuenca, dadas las condiciones limitantes, con atención a la diversidad de los ríos. En segundo lugar, se formula el objetivo a lograr en un segmento con la visión de cuenca, donde se busca reducir el impacto en el sitio y la respuesta en los segmentos aguas arriba o aguas abajo (Fryirs y Brierley, 2016).

A continuación, se definen conceptos claves para el desarrollo de la primera etapa del marco RS.

- **Estilo fluvial:** es un tramo de río con un conjunto casi uniforme de unidades geomórficas (Brierley y Fryirs, 2000).
- **Carácter del río:** se refiere al aspecto del corredor fluvial, es decir, el conjunto de atributos que lo caracteriza, entre ellos la geomorfología del lecho, las unidades geomórficas en el

lecho (islas, barras laterales o de medio canal), la forma en planta (determinada por otras métricas como el confinamiento, la sinuosidad y el número de canales), la configuración del valle de inundación, etc. (Brierley y Fryirs, 2005).

- **Comportamiento del río:** se define como los ajustes en la geomorfología del cauce, provocados por los mecanismos de erosión y sedimentación con los que el agua modifica el corredor fluvial, pero sin llegar a sufrir un cambio total, es decir, el régimen de flujo, de sedimento y las interacciones con la vegetación siguen relativamente uniformes (Brierley y Fryirs, 2005).

Históricamente, entre las clasificaciones de ríos en geomorfología fluvial, se encuentran: *i*) la organización de Davis de 1899, que divide la red en una secuencia evolutiva de “juventud, madurez y vejez”; *ii*) la descripción topológica del sistema de drenaje de Strahler de 1957; *iii*) el enfoque de Schumm, el cual en contraste con la noción de continuo longitudinal del momento, las formas de planta del canal no están ubicadas de manera única en un perfil largo dividido, sino que resultan de procesos más locales, de hecho, las “zonas” de Schumm, pueden repetirse muchas veces en el curso de un sistema fluvial inestable; *iv*) el sistema de clasificación de Rosgen de 1994 que se basa en procesos geomorfológicos para establecer una clasificación de río con los parámetros de gradiente, ancho y profundidad de la sección transversal, forma en planta y tamaño del sustrato. Rosgen considera que la clasificación es útil para predecir tendencias evolutivas en ríos y el potencial de restauración (Newson *et al.*, 1998).

Identificar y caracterizar un estilo fluvial con el marco RS, no solo es de una simple evaluación visual del río, sino que requiere de una comprensión de cómo funciona y se comporta el corredor fluvial en el entorno de su valle. La gran diferencia entre el marco RS, con otros esquemas de clasificación, es el poder interpretativo de los estilos fluviales, ya que ellos registran las asociaciones de forma-proceso a lo largo de cada tramo. De esta forma, se pretende ir más allá de un enfoque visual y mecánico de clasificación de ríos, para ofrecer un procedimiento basado en procesos. (Brierley *et al.*, 2002).

Las ventajas del marco RS con respecto a los esquemas de clasificación clásicos, son: *i*) ser abierto y genérico, pues permite añadir más variantes según el entorno ambiental al que se aplique, no es rígido, y no hay categorías de ríos predisuestas; *ii*) trabaja con la naturaleza, al basarse en procesos

(entendimiento del carácter y comportamiento del río); *iii*) se integra en la cuenca, es decir, analiza vínculos de los procesos a nivel cuenca (*e.g.* flujos de agua y sedimentos); *iv*) trabaja con escalas espaciales jerárquicas, por lo cual los procesos que ocurren en escalas más finas pueden ser explicados en función de los que ocurren en niveles superiores; *v*) comprende la capacidad de ajuste de los ríos y así se puede evaluar lo alejado que se encuentra un río, de su condición natural; *vi*) finalmente, permite predecir la forma en que se ajustará un río en el futuro (Brierley *et al.*, 2002). Las últimas dos ventajas no se aplicarán de forma explícita en este trabajo, dado que requieren la aplicación de las demás etapas del marco, pero son potencialidades que se pueden aplicar en estudios futuros con el mismo marco RS.

Una aplicación reciente de la primera etapa del marco se desarrolla en la cuenca del río Magdalena, Colombia (Nardini *et al.*, 2020a, 2020b, 2020c). Aquí se destaca la automatización de los procesos utilizando principalmente el algoritmo *Fluvial Corridor Toolbox* (Roux *et al.*, 2015), así como el desarrollo de algoritmos propios como el módulo de confinamiento, y de agrupamiento de los atributos para clasificar los estilos fluviales. En este trabajo se siguen y mejoran los procedimientos implementados en el río Magdalena, como se detalla en el capítulo de metodología.

2.6. CONCLUSIONES

En este capítulo se hizo una revisión del estado del arte relacionado a la geomorfología de los cauces. Con la primera etapa del marco *River Styles* se puede comprender el carácter y el comportamiento del río Duqueco a escala de segmentos, a través de la identificación y caracterización de los estilos fluviales. Para aplicar el marco se requiere de una enorme cantidad de datos, que en sus orígenes se debían obtener de la medición en terreno, que lo hacía prácticamente inmanejable para grandes cuencas. Debido al avance en la disponibilidad de datos de teledetección, es posible acotar los tiempos y costos de la caracterización del río, junto con la automatización de los procesos en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la priorización de la objetividad antes que el juicio experto, permiten que el marco sea replicable de forma semiautomatizada para cualquier cuenca.

CAPÍTULO 3: MODELACIÓN HIDRÁULICA

3.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta el marco teórico relacionado a la modelación hidráulica bidimensional del cauce, comenzando por los orígenes de la modelación matemática del flujo y su rol en las prácticas de gestión de ríos. Luego se presentan las ecuaciones de conservación que resuelven los modelos hidráulicos. Finalmente, se describe el software Iber y sus principales aplicaciones en casos similares a nivel mundial.

3.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA Y GESTIÓN DE OBRAS FLUVIALES

La modelación matemática del flujo de un río consiste en una representación de la realidad del cauce, con el objetivo de conocer los valores que toman las variables hidráulicas, como la profundidad de lámina de agua, velocidad, caudal, etc., mediante la resolución por métodos numéricos de las ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis (Cea y Bladé, 2008).

Sus inicios se enmarcan con los trabajos de formulación de ecuaciones de flujo no permanente, realizados en el siglo XIX por Saint Venant y Boussinesq, sumado a importantes conceptos teóricos establecidos en la primera mitad del siglo XX, en 1953 Isaacson Stoker y Troesch, construyeron un modelo matemático en tramos de los ríos Ohio y Mississippi, respectivamente, haciéndose cada vez más importante su aplicación y uso en el análisis de los cauces. El inicio de los modelos matemáticos fue relativamente lento, por la complejidad y costo que implicaba la resolución de las ecuaciones, pero se hizo representativo con la invención de los ordenadores y los programas informáticos, facilitando así el procesamiento de datos y análisis de una mayor cantidad de información (Stoker, 1992).

Durante los últimos 30 años se han desarrollado un gran número de modelos hidráulicos para el análisis fluvial, en que la elección de uno u otro depende de la naturaleza y complejidad del problema a resolver, de las capacidades del modelo hidráulico y de la disponibilidad de información para validar el modelo (Castro *et al.*, 2003). Un aspecto que define la complejidad del modelo es el número de dimensiones de análisis que permite simular. Sin embargo, en las últimas dos décadas se han realizado importantes avances en el modelado de inundaciones mediante el uso de modelos numéricos

hidráulicos bidimensionales (2D) como alternativa más completa y precisa, en determinados casos, a la modelación unidimensional (1D). Lo anterior debido a la creciente capacidad y velocidad de los ordenadores y aumento en la disponibilidad de los datos topográficos, como los modelos de elevación digital (Yan et al., 2015).

Existe un creciente interés en la modelación hidráulica de los cauces, que busca simular eventos extremos, zonificar áreas de inundación y evaluar el riesgo. Lo anterior, con la finalidad de gestionar el riesgo de inundación en zonas aledañas a los cauces (de forma acertada) y con enfoques ingenieriles, evitando de esta forma pérdidas humanas, de cultivos y de infraestructura, que impactan a las comunidades (Apel et al., 2009; Bodoque et al., 2016; Pérez et al., 2018; Sedano, 2012; Teng et al., 2017).

En la actualidad, hay una variedad de herramientas para la resolución del flujo de agua en lamina libre en 2 dimensiones, entre los más comunes se encuentran HEC-RAS 2D, FLO-2D, DSS-WISE, TELEMAC, INFO Works, LISFLOOD-FP, FloodModeller Pro y una de los más recientes IBER.

3.3. ECUACIONES GENERALES DEL FLUJO

El flujo en lamina libre se define mediante las ecuaciones de conservación de la masa y la cantidad de movimiento. En particular para un fluido incompresible e isótropo, como es el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes, luego considerando variables medias en el tiempo, se deducen las ecuaciones de Reynolds, las que reproducen el flujo en del agua en tres dimensiones, pero que en la practica el esquema numérico se hace complejo y costoso computacionalmente. Usualmente, se realizan simplificaciones a las ecuaciones de Reynolds, integrando en la profundidad, para obtener las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, las que asumen una distribución de presión hidrostática y de velocidad relativamente uniforme en la profundidad, condición que se cumple habitualmente en ríos y estuarios, siendo estas ecuaciones las más utilizadas por los modelos numéricos en los estudios de dinámica fluvial, áreas de inundación, transporte de sedimentos, etc. Las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales o de aguas someras se presentan a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{gh^2 \partial \rho}{2\rho \partial x} + 2\Omega \text{sen} \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{gh^2 \partial \rho}{2\rho \partial y} + 2\Omega \text{sen} \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

Donde:

- h = tirante
- U_x, U_y = velocidades horizontales promediadas en profundidad
- g = aceleración de gravedad
- Z_s = elevación de la lámina libre
- τ_s = fricción en la superficie libre por rozamiento con el viento
- τ_b = fricción debida al rozamiento de fondo
- ρ = densidad del agua
- ω = velocidad angular de rotación de la tierra
- λ = latitud del punto considerado
- $\tau_{xx}^e, \tau_{yy}^e, \tau_{xy}^e$ = tensiones tangenciales efectivas horizontales
- M_s, M_x, M_y = términos fuente/sumidero de masa y de momento mediante los cuales se realiza la modelación de precipitación, infiltración y sumideros (Iber, 2014)

Entre los métodos que permiten resolver las ecuaciones de Saint Venant, se encuentra el de los volúmenes finitos, que implica discretizar el dominio de cálculo en elementos, a partir de los cuales se construye una malla de celdas o volúmenes finitos. En cada uno de estos volúmenes se realiza la discretización de la forma integral de las ecuaciones de conservación (teorema de la divergencia). Los términos de las expresiones resultantes se sustituyen por aproximaciones del tipo diferencias finitas, obteniendo ecuaciones algebraicas más simples que se resuelven iterativamente (Fe, 2005).

3.4. MODELACIÓN HIDRÁULICA CON SOFTWARE IBER

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios, desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Cataluña y Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería), Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de Coruña), y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Bladé et al., 2014).

El modelo Iber se presentó oficialmente (Iber 1.0) en junio de 2010. Entonces Iber contaba con tres módulos de cálculo: módulo hidrodinámico, módulo de turbulencia, transporte de sedimentos y calidad del agua (Sanz et al., 2022). Desde entonces el software ha incorporado nuevos módulos orientados a la Calidad del Agua, los Procesos Hidrológicos y el Hábitat (Cea et al., 2019). La Figura 3.1 muestra un esquema de lo anterior.

En particular la base de la herramienta la constituye el módulo hidrodinámico que emplea las ecuaciones de St. Venant 2D de aguas someras resueltas, bajo el método de volúmenes finitos (Bladé et al., 2014).

Destacan entre las principales aplicaciones del software Iber: procesos de inundaciones fluviales (Bonasia et al., 2018, Bodoque et al., 2016), evaluación de medidas de restauración para pequeños cauces (Castillo et al., 2014), ruptura de represas (Álvarez et al., 2017), entre otros.

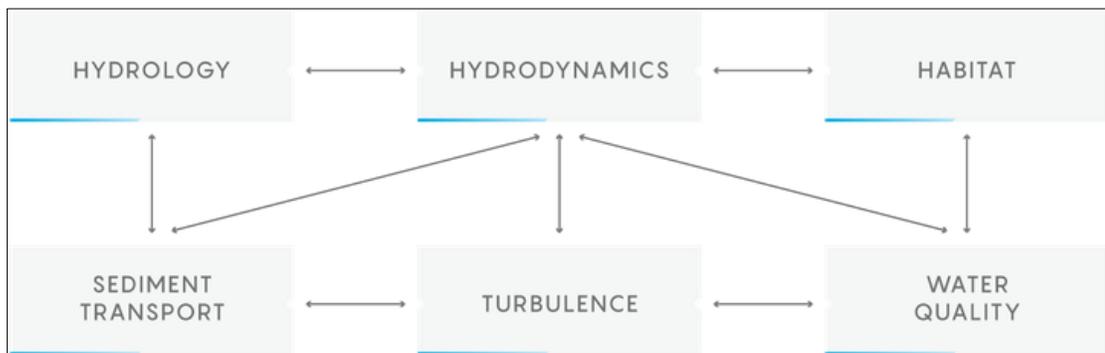


Figura 3.1 Módulos de cálculo del software Iber.

Fuente: Cea et al., 2019

A continuación, se definen las principales métricas que permite obtener Iber a partir del módulo hidrodinámico:

- **Calado:** Diferencia de nivel entre la superficie del agua y el nivel del lecho del cauce.
- **Velocidad:** corresponde a la variación del vector de posición de una partícula de agua con respecto al tiempo, Iber permite calcular la velocidad en las dos direcciones del plano (x,y) y obtener su promedio con respecto al fondo.
- **Peligrosidad:** según la Normativa Española estipulada en la Real Orden 9/2008, la peligrosidad hidráulica se define a partir de los valores de calado, velocidad y el producto de ambas métricas, clasificando la peligrosidad como nula, moderada o elevada, de acuerdo con la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Criterios de Peligrosidad de la Normativa Española estipulada en la Real Orden 9/2008, utilizadas por el software Iber.

Peligrosidad	Velocidad (m/s)	Calado (m)	Velocidad * calado (m²/s)
Nula	<0,5	<0,5	<0,25
Moderada	0,5 - 1	0,5 - 1	0,25 – 0,5
Elevada	>1	>1	>0,5

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detalla la metodología llevada a cabo en la elaboración del proyecto, comenzando por la descripción del área de estudio y la fuente de los datos disponibles. Luego se describen los métodos utilizados para la caracterización geomorfológica del cauce, entre ellos: el procesamiento de las imágenes satelitales; el marco de desagregación y agregación (Alber y Piegay, 2011); y la primera etapa del marco *River Styles* para la clasificación de los estilos fluviales (Brierley y Fryirs, 2005). En último lugar, se exponen los pasos y valores adoptados para la construcción del modelo hidráulico bidimensional, que permite delimitar el área de inundación del río Duqueco.

4.2. ÁREA DE ESTUDIO

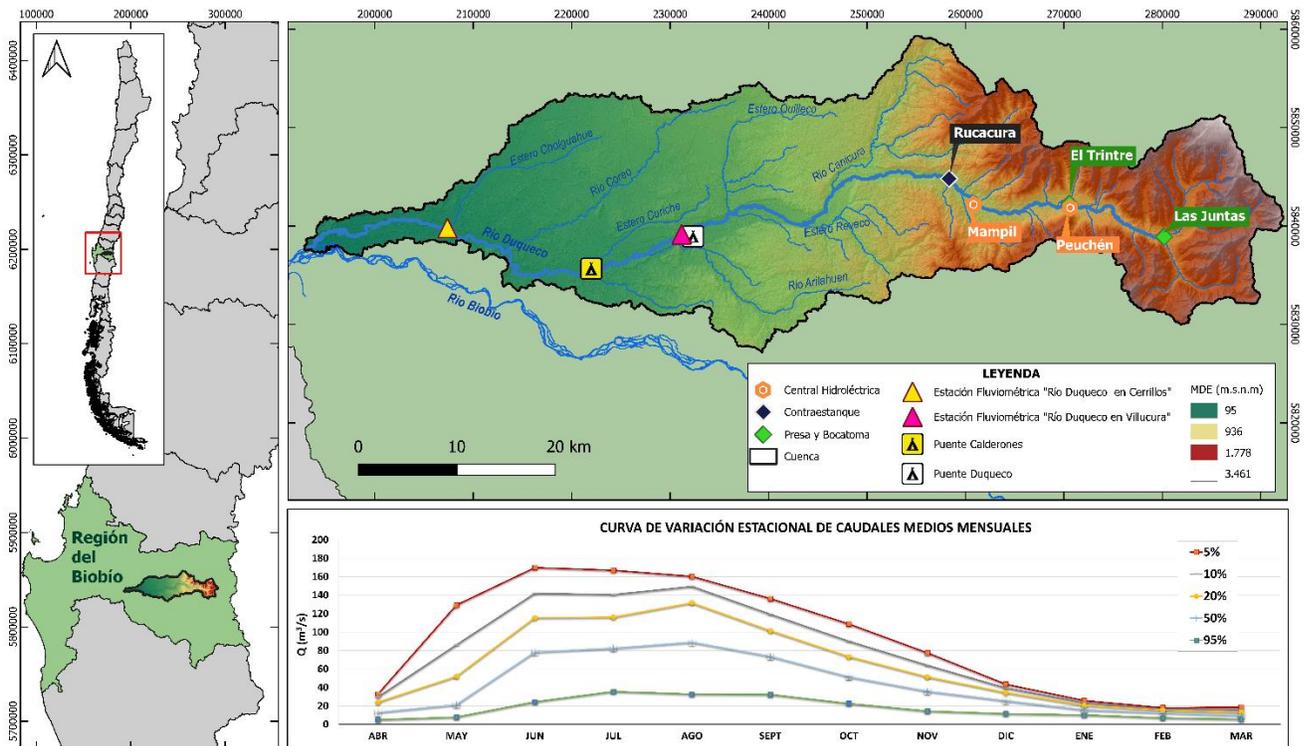
El área de estudio comprende el cauce del río Duqueco, ubicado en la región del Biobío, en la cuenca alta del río Biobío, subcuenca del río Duqueco, entre las latitudes 37,30° y 37,36° S y las longitudes 71,29° y 72,30° W, cercano a las ciudades de Los Ángeles, Quilleco y Santa Bárbara. Posee una longitud aproximada de 110,6 km (entre la bocatoma Las Juntas y la confluencia con el río Biobío) y un área de drenaje de 1550,7 km². Entre sus principales tributarios se encuentran, por la ribera norte: el río Canicura; el estero Quilleco; el río Coreo y el estero Cholguahue, y por la ribera sur: el estero Reveco y río Arilahuen.

El río presenta un régimen hidrológico pluvial, y es monitoreado por dos estaciones que registran datos fluviométricos y de calidad química del agua, en la parte media “Río Duqueco en Villucura” y en la parte baja “Río Duqueco en Cerrillos”.

En cuanto al clima, según la clasificación de Köppen para la ciudad de Los Ángeles este es cálido y templado con lluvias invernales. Según el balance hídrico de Chile (DGA, 1987), las isotermas de la zona varían entre 4 ° C - 15° C y las isoyetas entre 1200 – 4000 mm/anual con un fuerte gradiente orográfico en la zona cordillerana.

Finalmente, destaca la generación eléctrica de la zona, existen 4 centrales hidroeléctricas operativas en la cuenca, dos de tipo convencional “Mampil” y “Peuchén”, y dos centrales de pasada “Los Padres” y “Lleurequeo”. Sobre el cauce se ubican dos bocatomas, la primera en la parte más alta llamada “Las Juntas” en la confluencia entre el río Duqueco y el estero Quilaquin, que acumula la carga potencial y desvía parte del cauce a una canalización paralela al río hasta la central de “Peuchen”, y la segunda presa denominada “El Trintre” que cumple la misma función de la bocatoma anterior con la central de “Mampil”. Finaliza el recorrido con el contraembalse “Rucacura” que tiene por finalidad restituir el régimen natural del río.

La Figura 4.1 muestra el área de estudio junto a los principales puntos de interés.



*La curva de variación estacional, es construida a partir de los registros fluviométricos de la estación “Río Duqueco en Villucura” entre 1987 y 2019, adquiridos de la Dirección General de Aguas (DGA).

Figura 4.1 Área de estudio, cuenca del río Duqueco

4.3. DATOS DISPONIBLES

- Modelo de elevación digital (DEM, del inglés *Digital Elevation Model*) obtenido mediante técnicas de interferometría de Radar y radargrametría para el modelo TanDEM-X de 10m del DRL (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – German Aerospace Center) de Alemania.
- Imágenes satelitales de la constelación de nanosatélites *Planet Scope* desde noviembre del 2018, a una resolución de píxel de 3 metros y de la constelación *Rapid Eye* desde el año 2009 a una resolución de píxel de 5 metros, ambos tipos de imágenes satelitales con 4 bandas espectrales (región visible y región infrarroja).
- Datos de granulometría del cauce en 4 estaciones de medición, las que se pudieron realizar en la zona media – baja del cauce, entre el puente Duqueco y la confluencia con el río Biobío.
- Mapa Geológico de Chile, escala 1:1.000.000
- Registro fotográfico del cauce adquirido en las inspecciones en terreno, realizadas los días 22 de febrero de 2021 y 05 de enero de 2022.

4.4. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

4.4.1 Procesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes satelitales tiene por objetivo generar un polígono del canal activo del río Duqueco en condición de aguas altas, y de las unidades geomorfológicas del lecho, de forma más eficaz que una delimitación manual.

El primer paso, es la elección de las imágenes satelitales (disponibles desde el año 2009 en Planet Scope), para esto se evalúan las imágenes correspondientes a las fechas de máximo caudal diario de cada año disponible, descartando aquellas que presentan exceso de nubosidad. Luego, se realiza el procedimiento análogo para caudales bajos.

La Tabla 4.1 muestra la fecha de captura de las imágenes satelitales, el caudal en la estación de “Río Duqueco en Cerrillos” y la constelación de satélites utilizada.

Tabla 4.1 Características de las imágenes satelitales que constituyen el mosaico de la cuenca en estudio

Condición	Fecha	Caudal (m ³ /s)	Satélites /resolución
Aguas altas	30/06/2019	268	Planet Scope (3m)
	01/07/2019	171	Planet Scope (3m)
	05/07/2019	104	Planet Scope (3m)
Aguas bajas	29/01/2019	6,54	Planet Scope (3m)
	31/01/2019	6,16	Planet Scope (3m)

Estas imágenes requieren del siguiente procesamiento:

Calibración a reflectancia: dado que el conjunto de imágenes satelitales tiene sus datos originalmente como niveles digitales, es necesaria una calibración que convierta estos datos a valores de reflectancia (valor adimensional entre 0 y 1), este proceso y la unión de la escena en un mosaico se realiza en el *software* ENVI 5.6, la Figura 4.2 muestra el esquema de trabajo.



Figura 4.2 Flujo de trabajo en *software* ENVI para la obtención del mosaico de la cuenca con datos de reflectancia

Normalización a reflectancia: Debido a interferencias en la captura de las escenas, pueden existir valores de reflectancia que están fuera del rango normal (menores a 0 o mayores a 1), para corregir estos errores se realiza una normalización del ráster en el *software* ENVI. La Ecuación 4.1 muestra el criterio para normalizar y la Ecuación 4.2 la fórmula ingresada en el *software*:

$$\text{Si } \begin{cases} \mathbf{B1} < \mathbf{0} & \rightarrow \mathbf{0} \\ \mathbf{B1} > \mathbf{1} & \rightarrow \mathbf{1} \\ \mathbf{B1} \geq \mathbf{0} \text{ y } \mathbf{B1} \leq \mathbf{1} & \rightarrow \mathbf{B1} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$(\mathbf{B1} \text{ le } \mathbf{0}) * \mathbf{0} + (\mathbf{B1} \text{ ge } \mathbf{1}) * \mathbf{1} + (\mathbf{B1} \text{ gt } \mathbf{0} \text{ and lt } \mathbf{1}) * \text{float}(\mathbf{B1})/\mathbf{1} \quad (4.2)$$

Donde B1 corresponde al mosaico de la cuenca, es decir, se aplicó la normalización a las 4 bandas espectrales (visibles e infrarroja).

Índice de agua de diferencia normalizado (NDWI, del inglés *Normalized difference water index*): La Figura 4.3 muestra la frecuencia de la reflectancia del infrarrojo cercano (en porcentaje) en valores altos para vegetación o suelo y valores pequeños para cuerpos de agua, basados en esta relación McFeeters (1996), propuso el índice de agua de diferencia normalizado, que se define en la Ecuación 4.3.

$$NDWI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \tag{4.3}$$

Donde NIR corresponde a la banda espectral del infrarrojo cercano y GREEN a la banda espectral del color visible verde.

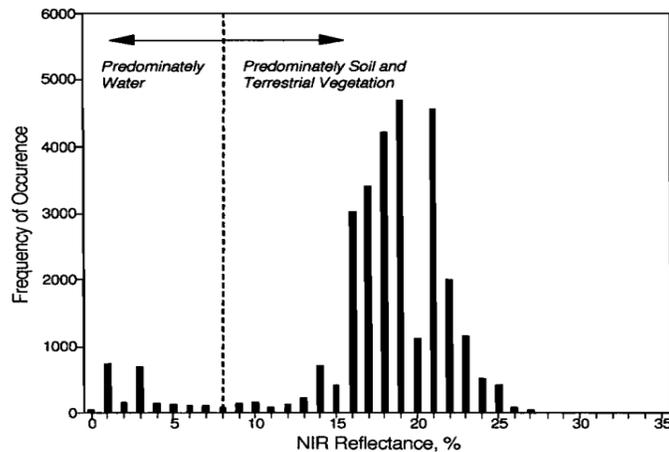


Figura 4.3 Distribución de frecuencia del porcentaje de reflectancia NIR para un área que incluye varios lagos

Fuente: McFeeters (1996)

Para este caso se toman todos los valores de NDWI menores a 0 como correspondientes a un cuerpo de agua. La Figura 4.4 detalla el flujo de trabajo en ENVI para obtener el polígono que representa la marca de agua.

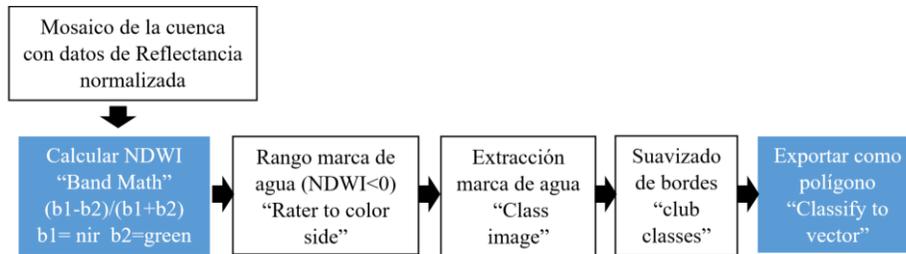


Figura 4.4 Flujo de trabajo en software ENVI, para la obtención del NDWI y el polígono de la marca de agua

4.4.2 Marco de desagregación y agregación del corredor fluvial

El marco desarrollado por Alber y Piégay (2011), consiste en la delimitación y caracterización de métricas fluviales basados en datos brutos a escala regional *e.g.* modelos de elevación digital, fotos aéreas, mapas antiguos, etc. Posee cuatro grandes pasos que se esquematizan en la Figura 4.5, y se explican a continuación:

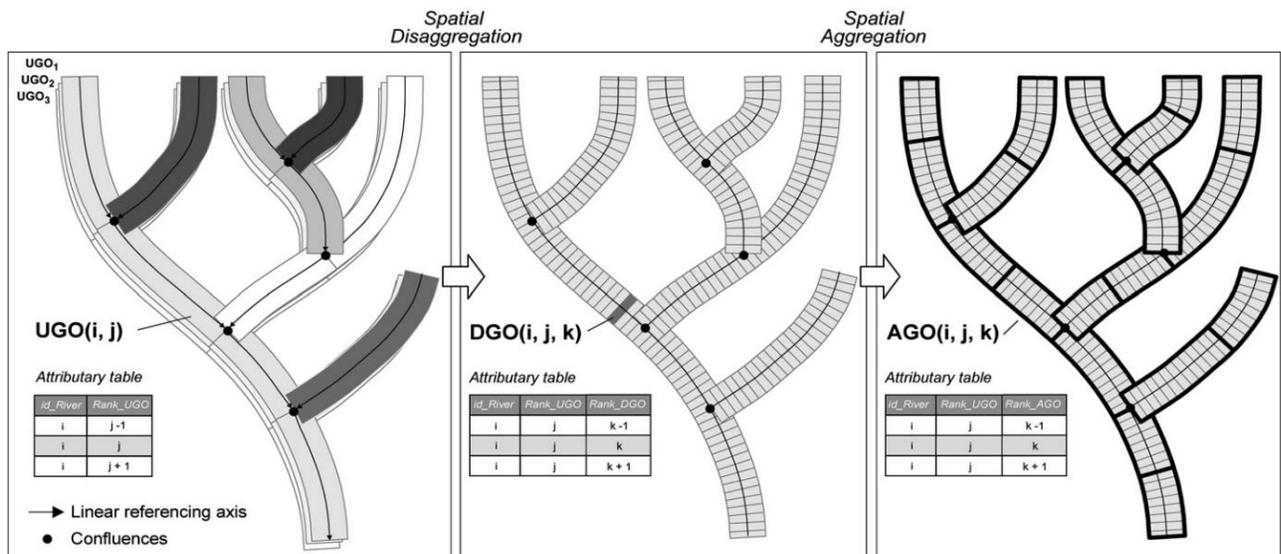


Figura 4.5 Definición de las unidades espaciales y el eje de referencia para la caracterización de los objetos geográficos a escala de red

Fuente: Alber y Piégay (2011)

Objetos geográficos unitarios (UGO, del inglés *Unitary Geographical Object*): son 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 (Alber y Piégay, 2011). En este trabajo se delimitan 5 UGO mediante herramientas SIG, que se detallan a continuación:

- **Envolvente del canal activo:** es el polígono que delimita el borde exterior del conjunto de canales, islas y barras, se obtiene a partir del polígono de la marca de agua, extraído del procesamiento de las imágenes satelitales.
- **Canal activo:** este incluye los canales y los elementos inundables en aguas altas (barras).
- **Unidades geomorfológicas:** estas se pueden encontrar dentro del envolvente de canales o en la llanura de inundación. En el primer grupo se encuentran las islas y barras (laterales, de punta o de medio canal) y en el segundo grupo los humedales y paleocauces cortados.
- **Llanura de inundación (VB, del inglés *Valley Bottom*):** se delimita usando el *software* ArcGIS con la herramienta *Valley Bottom Extraction Tool (V-BET)* desarrollada por Gilbert *et al.* (2016). Esta herramienta trabaja con pendientes transversales máximas en las que teóricamente el escurrimiento no podría seguir avanzando en esa dirección, generando así una delimitación demarcada por pendientes máximas trasversales.
- **Línea de central:** Es una polilínea que se utiliza como eje de referencia para el proceso de segmentación (creación de los DGO) y para guardar las métricas desagregadas, a lo largo del río.

Objetos geográficos desagregados (DGO, del inglés *Disaggregated Geographical Object*): consiste en la discretización longitudinal de los objetos geográficos unitarios en unidades espaciales de relativamente alta resolución. En este estudio, se particiona el cauce cada 50 metros.

Métricas a escala local: se calculan los atributos del corredor fluvial y su llanura de inundación de forma sistemática en cada DGO, una parte de los atributos se extrae de forma directa gracias a herramientas implementadas en SIG, otra parte a partir de datos de terreno (fotografías y granulometría) y otros más complejos dependen de una combinación de atributos simples.

Entre las métricas que se determinan de forma directa se encuentran: el ancho de la llanura de inundación, el ancho de la envolvente de canales, el número de canales, el área de drenaje, la sinuosidad, la presencia/ausencia de unidades geomorfológicas. La Figura 4.6 esquematiza algunos de estos atributos en el cauce del río Duqueco.

El material del lecho es un atributo que se determina a partir de los datos recopilados en terreno, en particular, de la granulometría de los cuatro puntos de extracción de material y las fotos del lecho del cauce. La clasificación del material del lecho se realiza de acuerdo con las clases de Wentworth que se muestran en la Tabla 4.2.

Por otro lado, el atributo más complejo de establecer es la forma en planta, por la gran variedad de formas y variantes existentes en la bibliografía, los problemas de escala y la consistencia para evaluar con el mismo criterio a lo largo de todo el cauce. Para superar estas complejidades, se aplicó el algoritmo desarrollado por Nardini y Brierley (2021), que automatiza la identificación de la forma en planta en cada segmento discretizado, al evaluar el grado de similitud de cada segmento con un arquetipo, es decir, una plantilla de cada tipo de forma en planta.

Si bien, la cantidad de plantillas de la configuración en planta es virtualmente infinita en el mundo real, se consideran las utilizadas por Nardini y Brierley (2021), ya que son una versión modificada del esquema de clasificación de Kleinhans y Van den Berg (2011), para adaptarse a los principios y procedimientos del marco *River Style* (Brierley y Fryirs, 2005). Así mismo, los umbrales y pesos necesarios para el funcionamiento del algoritmo se extraen inicialmente de la aplicación de este sobre el río Baker (Nardini y Brierley, 2021), y se calibran para el río Duqueco tras la realización de iteraciones. El esquema de la Figura 4.7, muestra los arquetipos considerados y sus principales atributos.

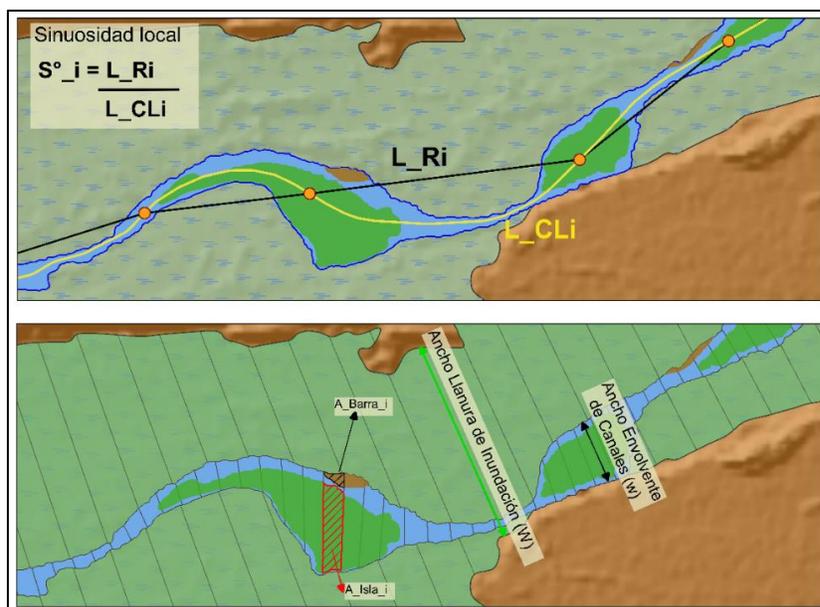


Figura 4.6 Atributos más relevantes calculados de forma directa sobre cada DGO.

Tabla 4.2 Tamaños del sedimento del lecho del río considerados en el estudio

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

Fuente: Wentworth (1922)

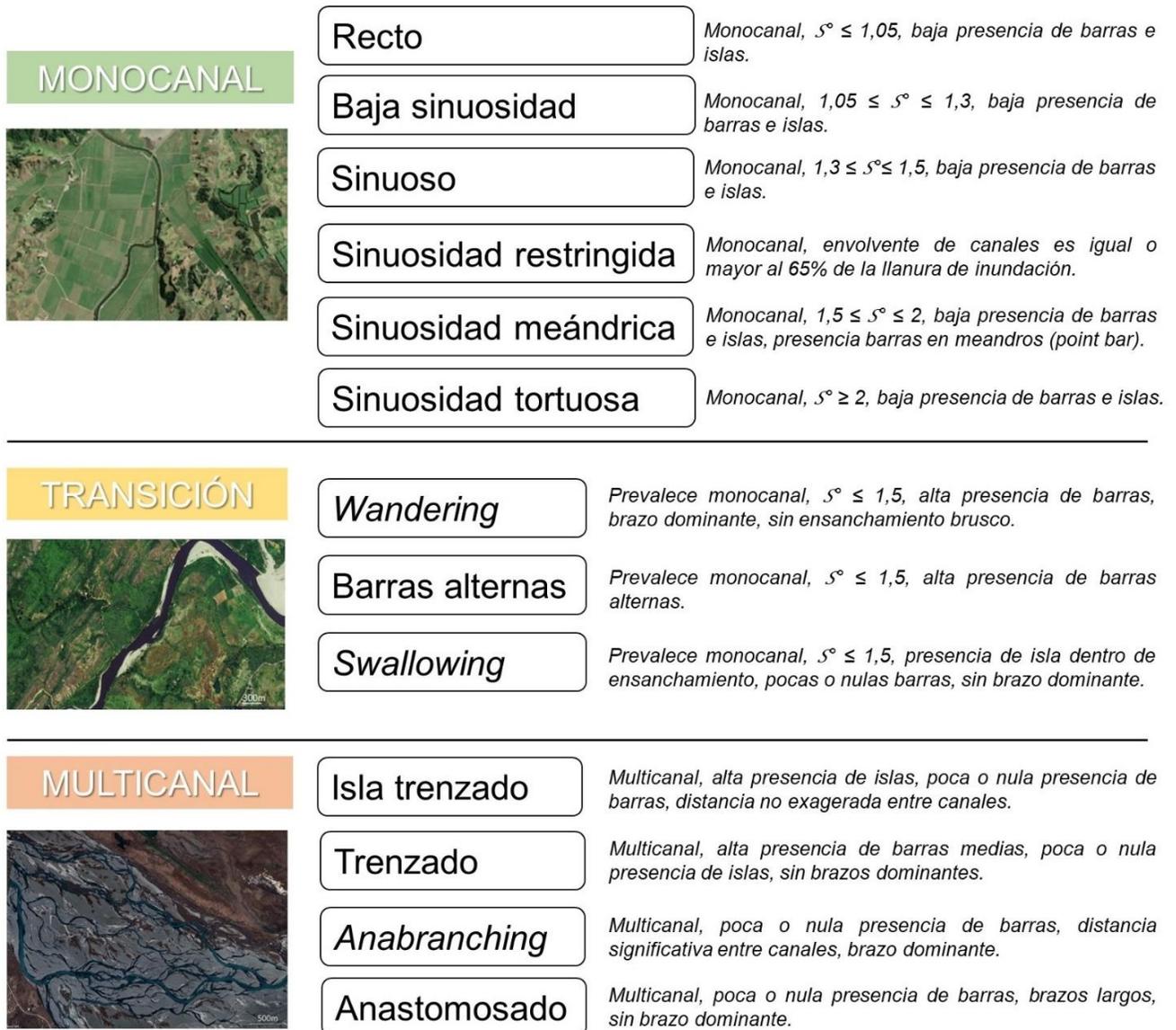


Figura 4.7 Características de las formas en planta.

El cálculo de las métricas se ha realizado de forma semiautomatizada con la caja de herramientas *South Rivers Toolbox (SRT)*, la cual es de desarrollo propio y código abierto, disponible para su instalación en QGIS en el repositorio: <https://github.com/vosores/SouthRiversToolbox>. En la sección de Anexos se puede encontrar un esquema con la herramienta utilizada para cada métrica determinada en este estudio.

Objetos geográficos agregados (AGO, del inglés *Aggregated Geographical Object*): consiste en la agregación espacial de los atributos basados en patrones estadísticos o procesos para obtener AGOs, que caracterizan al cauce a una escala mayor (Alber y Piégay, 2011). En particular, se realiza el proceso de agregación de la métrica del material del lecho y de la forma en planta, para el primer caso la agregación es visual y en el segundo caso se realiza un procedimiento para evitar segmentos muy cortos, restringiendo la longitud mínima de la forma en planta a 4 segmentos DGO.

Finalmente, se intersecan los polígonos de los AGO del material del lecho y de forma en planta en el software QGIS. Los tramos del río resultantes son la escala de análisis que se utiliza para la implementación del marco *River Style*.

4.4.3 Marco *River Styles*: Etapa 1

La primera etapa del marco *River Styles* contempla conocer el carácter y comportamiento del río a través de la definición y caracterización de los estilos fluviales. En las secciones siguientes, se explica el “árbol procedimental modificado” que determina los atributos necesarios para la clasificación, el orden de estos atributos en una matriz, y el algoritmo utilizado para definir los estilos fluviales (RS).

Árbol procedimental: la Figura 4.8 muestra el árbol procedimental que se utiliza en esta etapa, que es una versión simplificada del original propuesto por los autores (Fryirs y Brierley, 2018). Para clasificar el estilo de río principal se utilizan los atributos numerados desde el 1 al 4 (confinamiento, causa del confinamiento, forma en planta y material del lecho), y para obtener una subclasificación de estilo de río complementario, se incluye el atributo N°5 (presencia de unidades geomórficas).

Todos los atributos del árbol procedimental se deben evaluar en segmentos, donde la forma y los procesos se produzcan en forma casi homogénea, para esto se utilizan los tramos del cauce obtenidos con anterioridad al cruzar los AGO de material del lecho con la forma en planta.

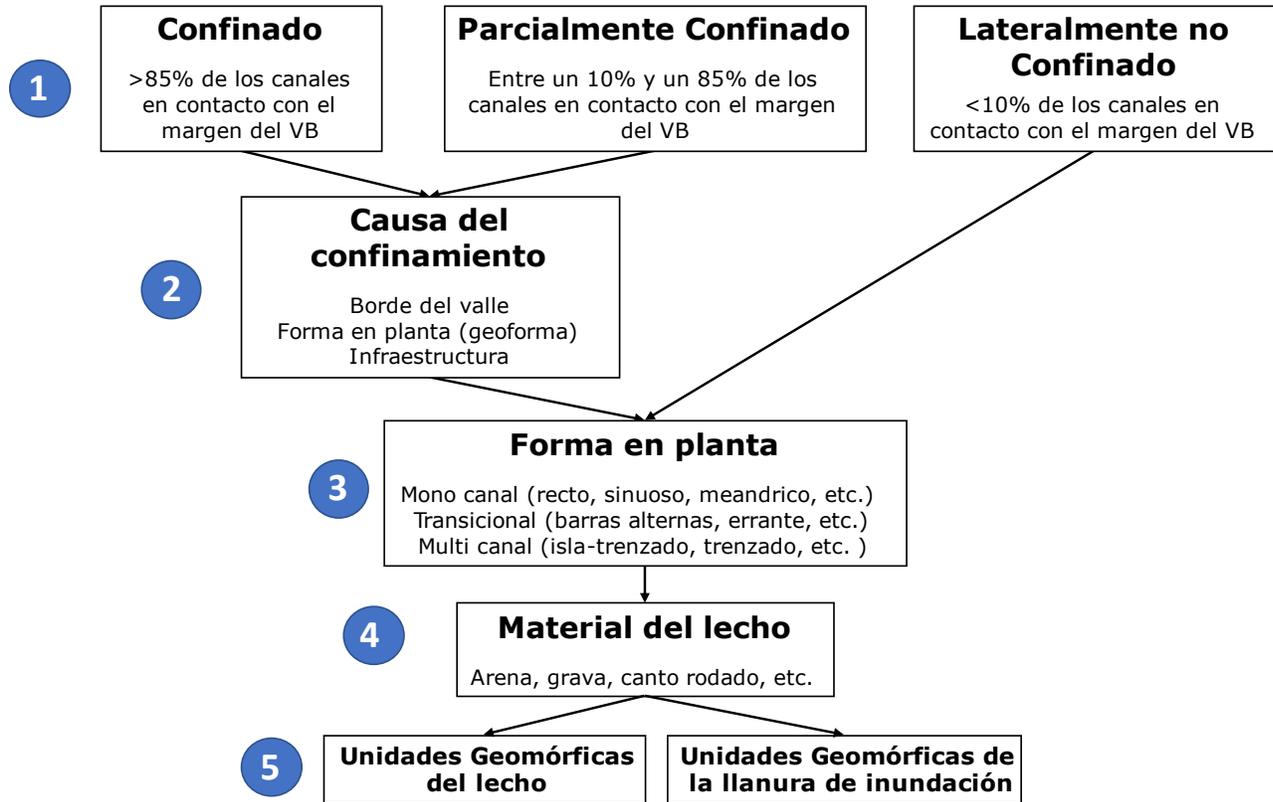


Figura 4.8 Árbol procedimental modificado del original propuesto por los autores

Fuente: Adaptado de Fryirs y Brierley (2018)

Matriz de atributos: las Figuras Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11 muestran el proceso para determinar los atributos de confinamiento, causa de confinamiento y presencia de unidades geomórficas. Para el caso de la forma en planta y el material del lecho, estos ya fueron determinados con anterioridad para cada segmento DGO del cauce y al tratarse de atributos que participaron en la definición de los tramos, poseen una agregación igual o mayor a estos, por lo que solo es necesario intersectar los objetos agregados de cada métrica con los tramos para obtener la misma codificación.

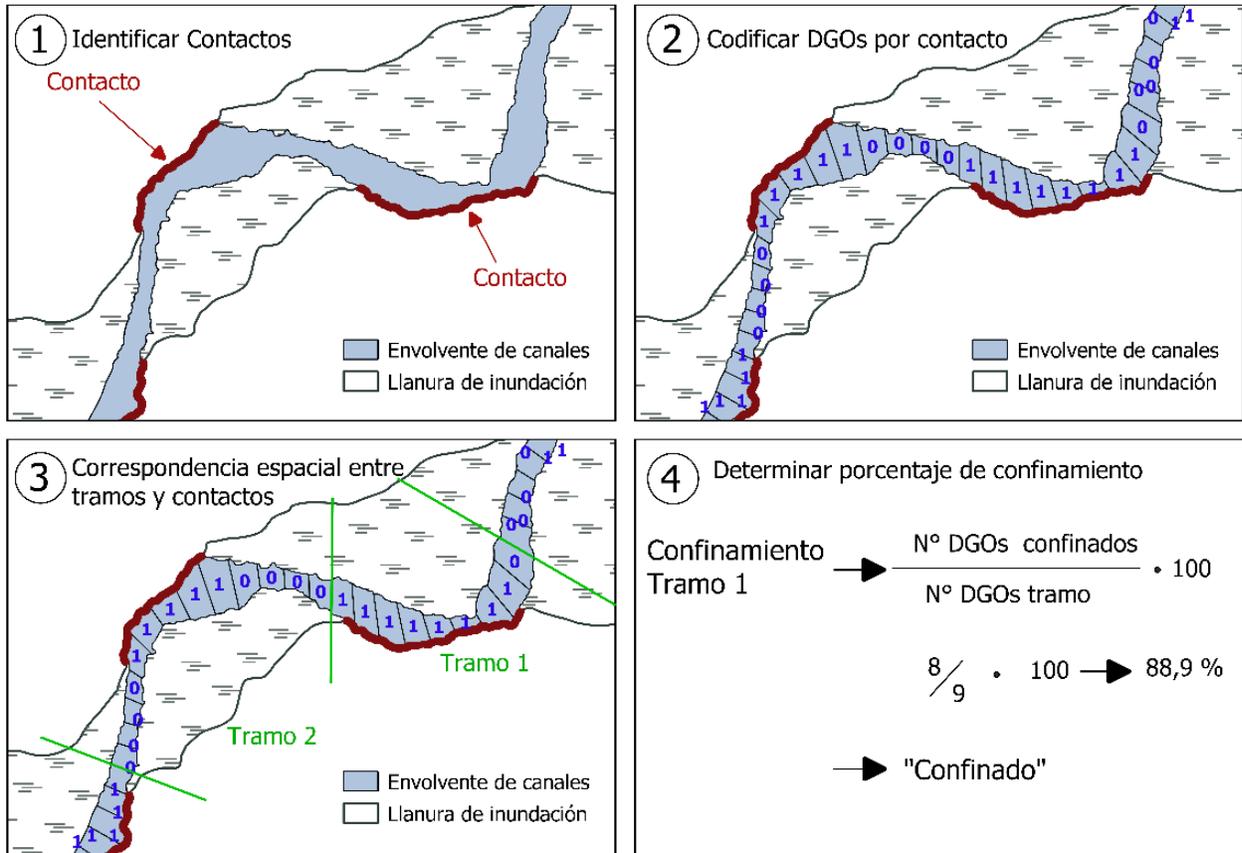


Figura 4.9 Proceso para determinar confinamiento del cauce

Fuente: Adaptado de Nardini et al. (2020a)

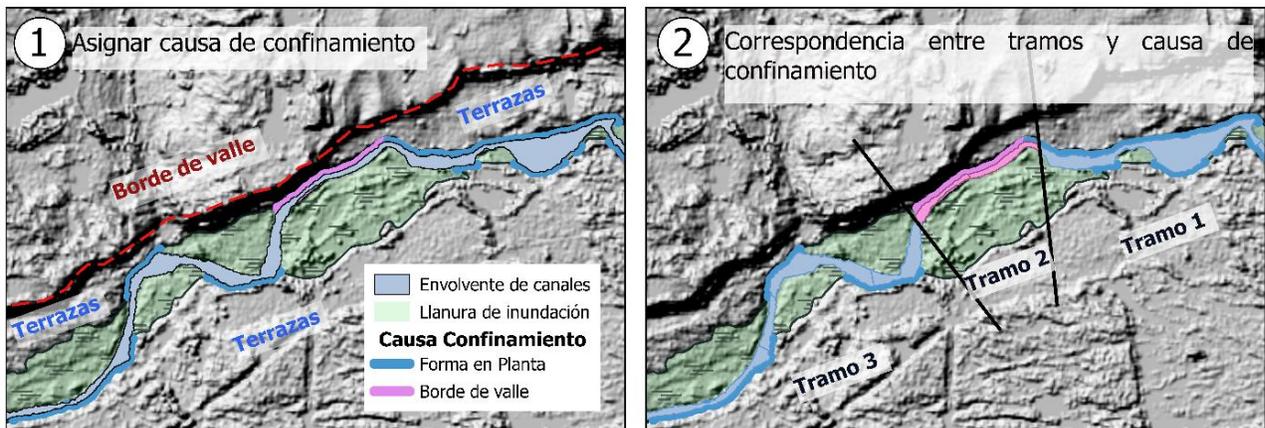


Figura 4.10 Proceso para determinar causa del confinamiento del cauce

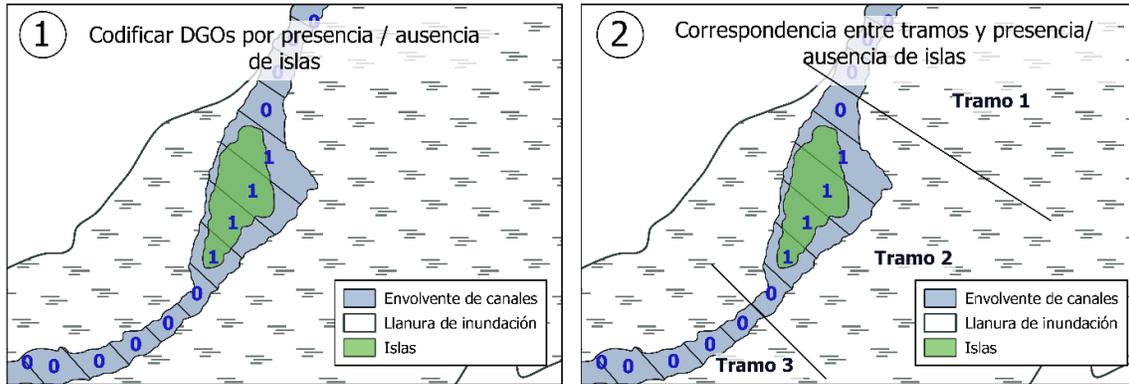


Figura 4.11 Proceso para determinar presencia o ausencia de Unidades Geomorfológicas

Algoritmo de clasificación: se crea una matriz en Excel que ordena los tramos del cauce desde aguas arriba hacia aguas abajo, asignando a cada tramo los atributos antes descritos con un código numérico. A continuación, la tabla es exportada al *software* QGIS para realizar la unión de atributos con un elemento de línea, en este caso la línea centro de la envolvente de canales. Finalmente, se realiza una clasificación no supervisada (*clúster*), mediante la herramienta “*Attribute based clustering*” de QGIS, que entrega una codificación de RS para cada combinación de atributos posible.

4.5. MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL CAUCE

La modelación hidráulica del cauce tiene por objetivo simular el comportamiento del río ante un evento hidráulico de interés, obteniendo el área de inundación, la altura y velocidad del escurrimiento. En este trabajo se realizó una modelación hidráulica bidimensional que resuelve las ecuaciones de aguas someras, mediante el *software* IBER, el cual trabaja con una interfaz de preproceso para la construcción del modelo, y post proceso para la visualización de los resultados.

4.5.1 Preproceso

Datos de entrada: se utiliza el modelo de elevación digital TanDEM-X de 10m del DRL de Alemania, y una ortofoto georreferenciada del tamaño de la cuenca con una resolución de 22377x7624 pixeles.

Generación de la geometría: se delimita la llanura de inundación y el cauce activo con las herramientas de Iber de puntos, líneas y polígonos. El borde exterior de esta geometría marca el límite de la zona a

modelar. Se utilizan los polígonos de cauce activo y llanura de inundación creados anteriormente como base para generar la nueva geometría.

Condiciones de contorno: se distingue entre contornos cerrados (tipo pared) y contornos abiertos por los cuales ingresa y sale el agua, sobre estos últimos es necesario imponer un numero de condiciones que dependen del tipo de escurrimiento (critico/subcrítico). La Tabla 4.3 muestra el número de condiciones necesarias para que el modelo funcione matemáticamente.

Tabla 4.3 Número de condiciones de contorno de entrada y salida para diferentes tipos de régimen de escurrimiento

Tipo de contorno	Régimen	Nº de condiciones
Entrada	Supercrítico	3
	Subcrítico	2
Salida	Supercrítico	0
	Subcrítico	1

Dada la falta de datos, se impone para el contorno de entrada la condición de flujo subcrítico, fijando el caudal de entrada y su dirección (perpendicular a la entrada). Para el contorno de salida, se impone la condición de flujo supercrítico que solo requiere indicar la ubicación de las líneas de salida del modelo. Si bien puede que la condición real no sea esta misma, esta condición solo influye en los tramos iniciales y finales de la modelación, sin ser relevante para la calidad del modelo a nivel cuenca.

Definición del caudal de crecida: se determina el caudal a modelar como aquel con un periodo de retorno de 100 años. La Tabla 4.4 muestra el periodo de análisis de cada estación fluviométrica, y el caudal correspondiente a una crecida centenaria.

Tabla 4.4 Caudal para un periodo de retorno de 100 años para las estaciones fluviométricas sobre el río Duqueco

Estación Fluviométrica	Periodo de análisis	Función de Densidad de probabilidad	Caudal para un T=100 años
Río Duqueco en Villucura	1987 - 2019	GEV	962,74
Río Duqueco en Cerrillos	1987 - 2019	GEV	1647

Dado que el caudal representativo ira aumentando aguas abajo en la medida que el área aportante es mayor, se hace necesario encontrar una relación que permita relacionar el caudal de crecida y el área aportante. A partir de 16 estaciones fluviométricas cercanas a la zona de estudio, cuyas cuencas aportantes tiene similitudes en la forma y altitud a la cuenca del río Duqueco, se obtuvo una relación entre el caudal promedio máximo anual y el área de drenaje. Luego se compararon los valores del caudal promedio máximo anual y el caudal (T=100), para obtener el factor que permite obtener la relación entre el caudal (T=100) y el área aportante.

Tras analizar el caudal de crecida a lo largo de todo el cauce, es posible notar que los grandes aumentos de caudal se deben a la entrada de los principales tributarios. Por esta razón, se generan 7 entradas de caudal en el modelo hidráulico, la primera para el nacimiento del río Duqueco y las otras seis para sus mayores tributarios. La Figura 4.12 muestra las entradas de caudal escalonadas en el modelo Iber.

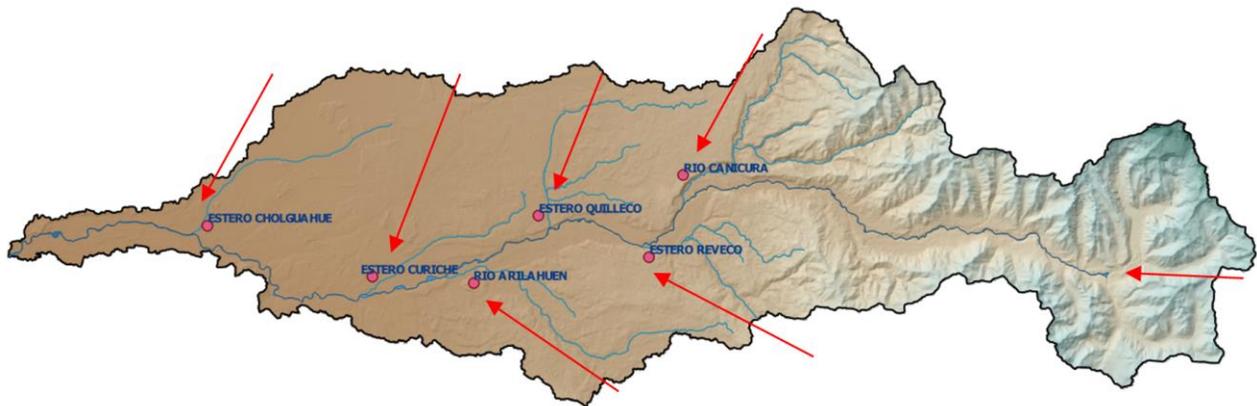


Figura 4.12 Ubicación de los principales aportes de caudal al río Duqueco

Condiciones iniciales: reflejan el estado del terreno al inicio de la simulación (seco-mojado). Dado que el modelo de elevaciones no reproduce el fondo del cauce, se establece una condición inicial de 0 para no aportar mayor altura al escurrimiento.

Condiciones internas: son condiciones que se establecen en el caso de obstáculos, tales como, vertederos, compuertas, puentes, entre otros. En este caso pese a la presencia de presas y puentes, el nivel de detalle del modelo de elevación digital no permite incluir estas infraestructuras, sería necesario contar con una topo-batimetría para modelar de forma exacta el terreno y las

infraestructuras. Luego de comparar el modelo con la inserción de puentes este no cambia de forma significativa siendo irrelevante para el estudio su inclusión.

Asignación de rugosidad: se asigna una rugosidad de Manning a cada superficie del estudio (lecho del cauce y llanura aluvial), la que se define con el Método de Cowan y fórmula de Strickler, para finalmente comparar y verificar los valores seleccionados con las fotografías del libro “*Roughness Characteristics of Natural Channels*” (Barnes, 1967).

El método de Cowan, asigna la rugosidad de Manning n , según la fórmula:

$$n = m(n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$$

Donde:

n_0 : rugosidad base para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.

n_1 : rugosidad adicional debida a irregularidades superficiales del perímetro mojado a lo largo del tramo en estudio.

n_2 : rugosidad adicional equivalente debida a variación de forma y de dimensiones de las secciones a lo largo del tramo en estudio.

n_3 : rugosidad adicional equivalente debida a obstrucciones existentes en el cauce.

n_4 : rugosidad adicional equivalente debida a la presencia de vegetación.

m : factor de corrección para incorporar efecto de sinuosidad del cauce o presencia de meandros.

En la Tabla 4.5 se presentan los valores a usar para los diferentes coeficientes:

Tabla 4.5 Estimación del coeficiente de Manning según método de Cowan

CONDICIONES DEL CANAL		VALOR	
Material del Lecho	Tierra	n_0	0,020
	Roca Cortada		0,025
	Grava Fina		0,024
	Grava Gruesa		0,028
Grado de Irregularidad	Despreciable	n_1	0,000
Perímetro Mojado	Leve		0,005

CONDICIONES DEL CANAL		VALOR	
	Moderado		0,010
	Alto		0,020
Variaciones de las Secciones	Graduales	n_2	0,000
	Alternándose Ocasionalmente		0,005
	Alternándose Frecuentemente		0,010 – 0,015
Efecto Relativo de las Obstrucciones	Despreciable	n_3	0,000
	Leve		0,010 – 0,015
	Apreciable		0,020 – 0,030
	Alto		0,040 – 0,060
Densidad de Vegetación	Baja	n_4	0,005 – 0,010
	Media		0,010 – 0,025
	Alta		0,025 – 0,050
	Muy Alta		0,050 – 0,100
Sinuosidad y Frecuencia de Meandros	Leve	m	1,000
	Apreciable		1,150
	Alto		1,300

Para la zona del lecho del cauce, donde existen datos de granulometría del sedimento, es posible utilizar la ecuación de Strickler para estimar n_0 , la que se presenta a continuación:

$$n_0 = 0,038 * D^{1/6}$$

Donde D, es el diámetro representativo de la rugosidad superficial y se expresa en metros.

Generación de la malla: la discretización espacial del dominio a estudiar se realiza mediante a la división del espacio en celdas (mallas de cálculo), las que pueden ser estructuradas o no estructuradas. En el estudio se utilizan mallas no estructuradas por su facilidad para adaptarse a cualquier geometría, con un tamaño de celda de 10 metros sobre el cauce y de 15 metros sobre la llanura de inundación. Una vez creada la malla es combinada con el modelo de elevación digital para asignar una cota a cada celda.

Opciones de cálculo: finalmente se definen los parámetros para realizar la simulación, se establece el tiempo total de la simulación en 144000 segundos, el que debe ser mayor al tiempo que se requiere para que todos los puntos de la cuenca estén aportando al caudal de salida, correspondiente a 133000 segundos. Se definen los resultados a determinar, entre ellos: la altura del calado, velocidad, caudal, cota del agua y número de Froude.

La Figura 4.13 esquematiza el procedimiento llevado a cabo en la construcción del modelo hidráulico bidimensional con el software Iber.

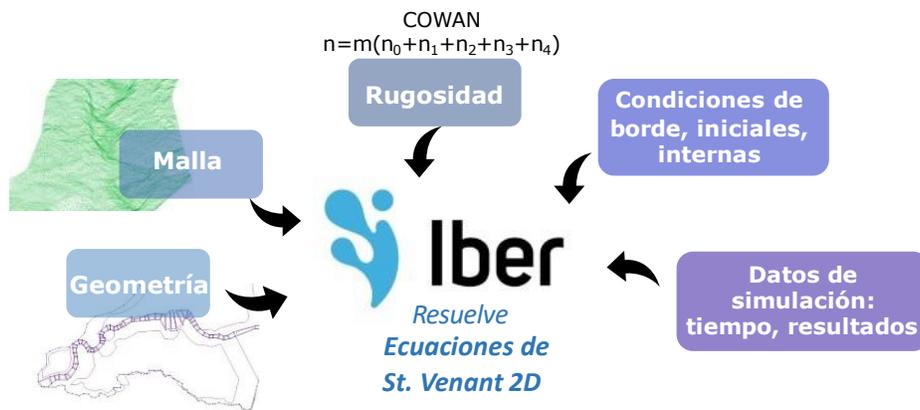


Figura 4.13 Esquema resumen de la construcción del modelo hidráulico bidimensional en Iber

4.5.2 Postproceso

El software permite una variedad de opciones para representar los resultados, ya sea en todo el espacio en un instante de tiempo, o en un lugar determinado para todo el tiempo de la modelación. En este estudio se exportaron los resultados del calado, la velocidad y peligrosidad para todo el cauce en el instante de su máximo valor.

4.6. CONCLUSIONES

En este capítulo se describió el área de estudio, se detalló el procedimiento para una caracterización geomorfológica del cauce, por medio de la definición de estilos fluviales (*River Styles*), y finalmente se describieron los pasos a seguir para la construcción de un modelo hidráulico 2D, que permita evaluar las zonas con riesgo de inundación ante crecidas extraordinarias.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados del estudio sobre el río Duqueco, bajo el enfoque geomorfológico con la determinación de los estilos fluviales, y bajo el enfoque hidráulico con la determinación de las zonas de inundación ante eventos de crecidas extremas. Luego, se realiza un análisis integral que relaciona ambos resultados para el correcto entendimiento del comportamiento y carácter del río Duqueco.

5.2. CARÁCTER DEL CAUCE: ENFOQUE GEOMORFOLÓGICO

A continuación, se presentan los productos del análisis de desagregación y agregación del cauce, entre ellos las métricas del corredor fluvial a distintas escalas espaciales, y su respectiva agrupación en estilos fluviales, otorgando así una visión a nivel de cuenca del carácter del cauce.

5.2.1 Objetos geográficos unitarios

Canal activo y su envolvente: en la Figura 5.1 se muestra en (I) el polígono de la marca de agua, correspondiente a los valores menores a 0 en el índice NDWI, extraído a partir del análisis espectral en el software ENVI, y en (II) el polígono del canal activo y su envolvente luego de la depuración.

Notar que en la parte baja de la cuenca, la marca de agua del índice NDWI delimita precisamente el canal activo, con mínimas áreas aledañas a borrar. En cambio, en la parte alta de la cuenca prácticamente no se identifica el curso del agua y se marcan numerosas áreas a borrar, debido a factores como, el reflejo que genera la nieve en la zona cordillerana, la sombra de las laderas que confinan el cauce y la vegetación ribereña que en ocasiones enmascara por completo al corredor fluvial.

Si bien se utilizan imágenes de aguas altas para delimitar la envolvente del canal activo, se permite el uso de imágenes de aguas bajas en la zona alta de la cuenca por la baja visibilidad.

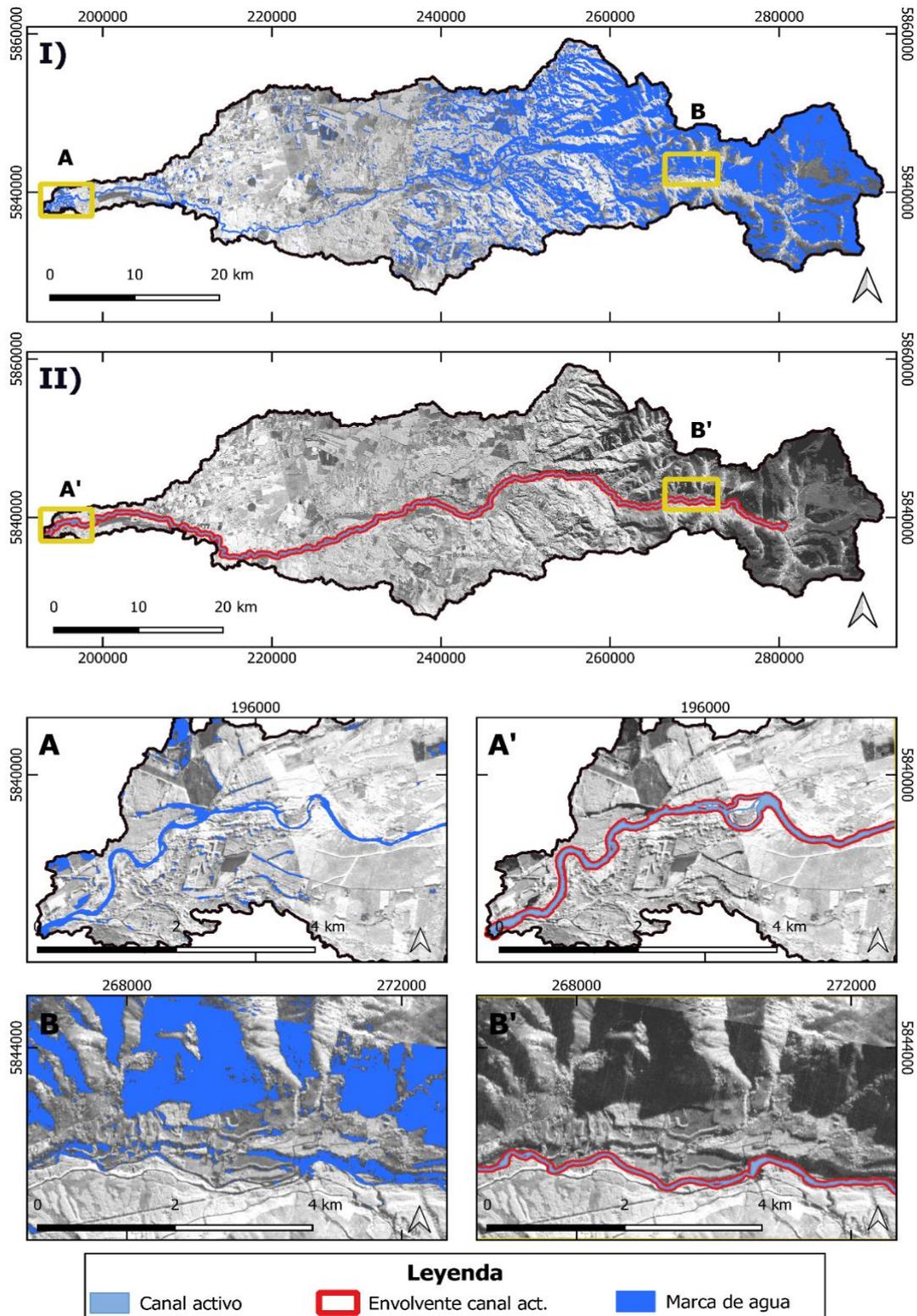


Figura 5.1 I) Cuenca del río Duqueco con marca de agua para todos los valores negativos de NDWI. II) Cuenca del río Duqueco con polígono del canal activo y su envolvente. A y A' ejemplifican la limpieza del polígono en la parte baja de la cuenca. B y B' ejemplifican la limpieza del polígono en la parte alta de la cuenca

Unidades geomórficas: la Figura 5.2 muestra de forma localizada algunas unidades geomórficas (UG) dentro del lecho (islas, barras medias, laterales y puntuales) y en la llanura de inundación (meandros cortados). El análisis de las UG a escala de cuenca, para analizar su variabilidad longitudinal en todo el corredor fluvial se encuentra en la sección 5.2.5 de este capítulo.

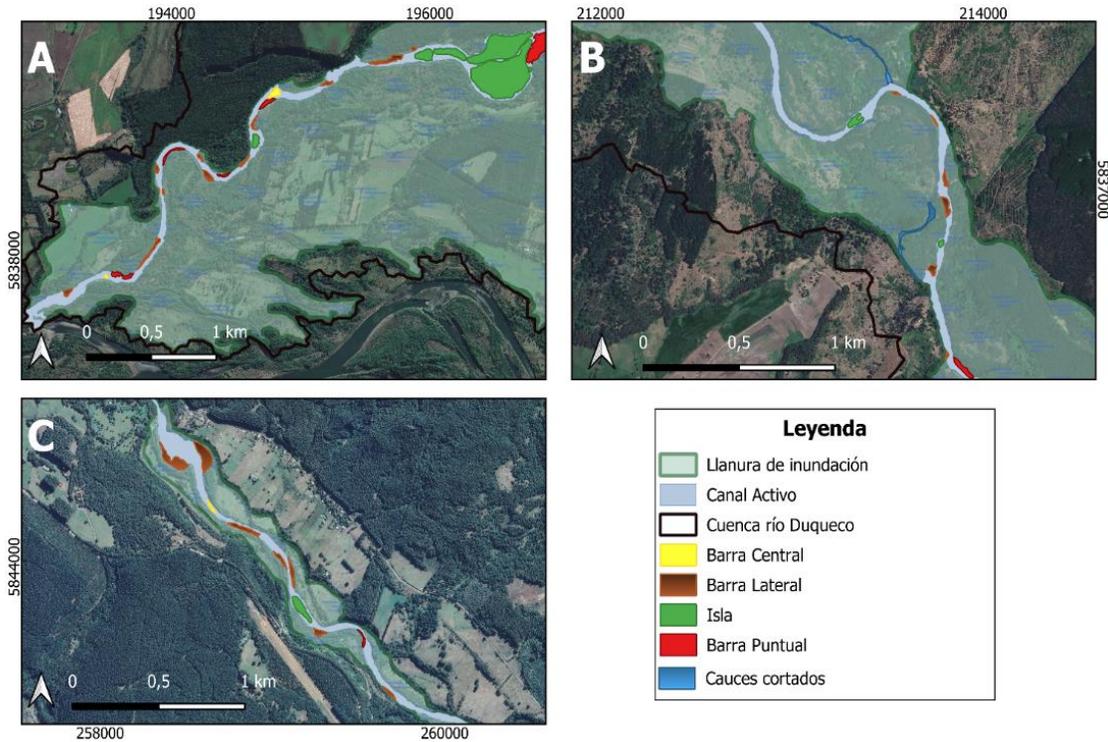


Figura 5.2 Unidades geomórficas en el río Duqueco, A) zona de confluencia con el río Biobío, alta presentación de UG, B) zona aguas arriba de A, presencia de meandros cortados, C) zona alta de la cuenca, formación de barras e isla aguas arriba del contraembalse Rucacura.

Llanura de inundación: la Figura 5.3 muestra el polígono de la llanura de inundación obtenida con la herramienta V-BET, la zona alta y media de la cuenca presentan una clara delimitación por la gran diferencia de pendiente entre la llanura y las laderas que la confinan, la parte baja cercana a la confluencia con el río Biobío presenta problemas por la baja pendiente de la zona, donde la herramienta no encuentra resistencia al desplazamiento del agua. Para evitar este error, se complementa el análisis con la herramienta “ValleyBottom” de *Fluvial Corridor Toolbox* en ArcGis, que trabaja con diferencia máxima de cota entre el lecho del cauce y el escurrimiento máximo, utilizando en este caso 10 metros.

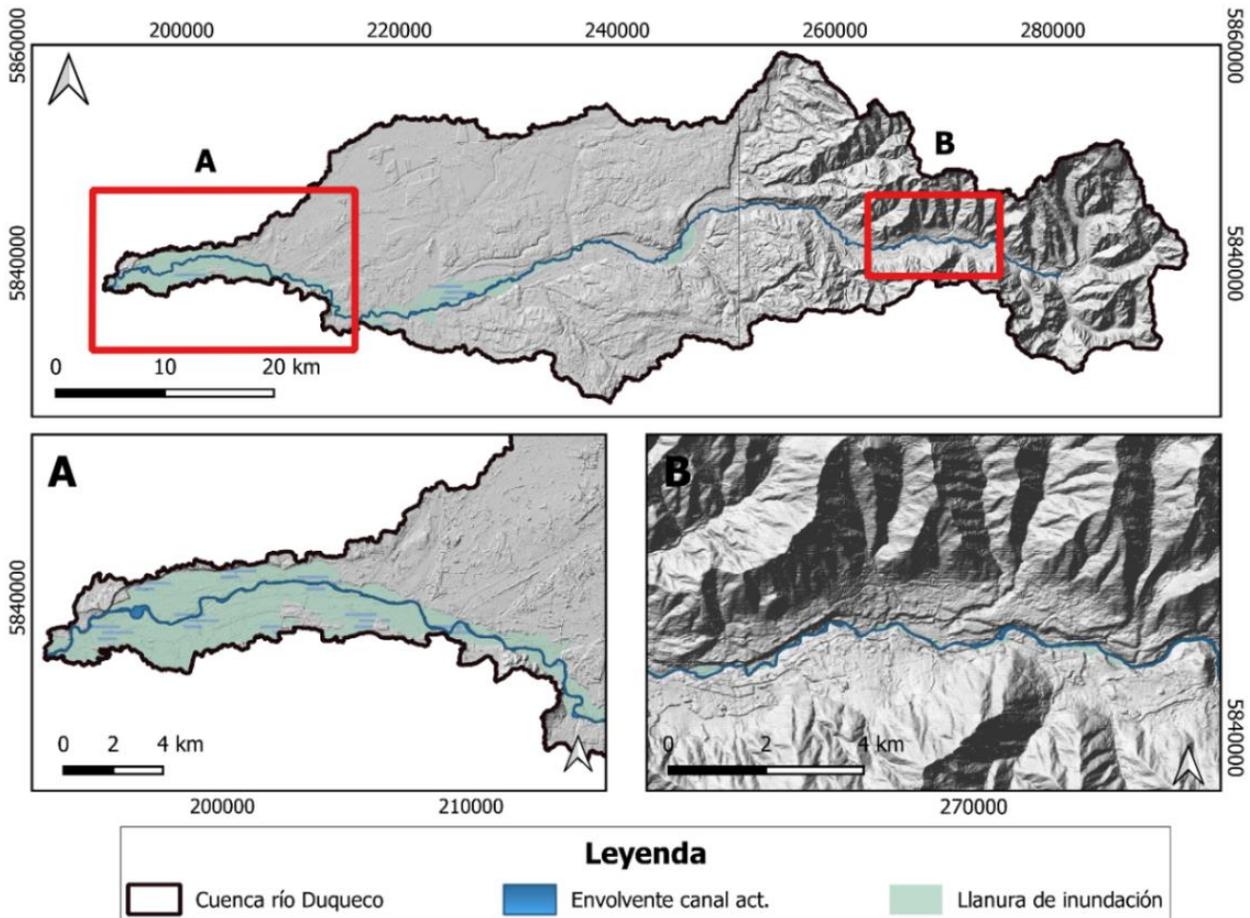


Figura 5.3 Polígono de la llanura de inundación. A) Detalle de la llanura de inundación en la zona cercana a la confluencia con el río Biobío. B) Detalle de la llanura de inundación en la zona alta de la cuenca

La calibración y validación de la llanura de inundación se realiza por medio de:

- Mapa de inundaciones (Asociación de Municipalidades de la región del Biobío [AMRBB], 2015) validado con el apoyo de las personas que viven en las comunas afectadas por inundaciones en la ribera del río Biobío, las que a partir de las experiencias vividas delimitaron las zonas de inundación. En la Figura 5.4 se observa que el polígono delimitado por VBET reproduce muy bien la llanura de inundación, a excepción de unas zonas en las que el mapa de inundación marca un área mayor, se determinó que estas áreas no correspondían a llanura por ser claramente terrazas que se identifican en el DEM.
- Mapa geológico (Servicio Nacional de Geología y Minería [Sernageomin], 2000) que se muestra en la Figura 5.5, se puede comprobar que la mayor parte de la llanura de

inundación se encuentra sobre depósitos aluviales y fluviales, que en el mapa se identifican como series sedimentarias. También se muestra en la parte alta del cauce como estos depósitos se encuentran confinados por rocas intrusivas y volcánicas.

- Perfiles de elevación transversales al cauce, se utilizan para calibrar y validar de forma más precisa las pendientes y anchos máximos que utiliza V-BET. Los perfiles se realizan a lo largo de toda la llanura, y con alta frecuencia en las zonas más planas de la cuenca, donde la herramienta tiene mayor dificultad. En la Figura 5.6 se pueden apreciar 3 perfiles transversales que muestran como la herramienta delimita de forma precisa la llanura de inundación, justo en el borde de terrazas y laderas.

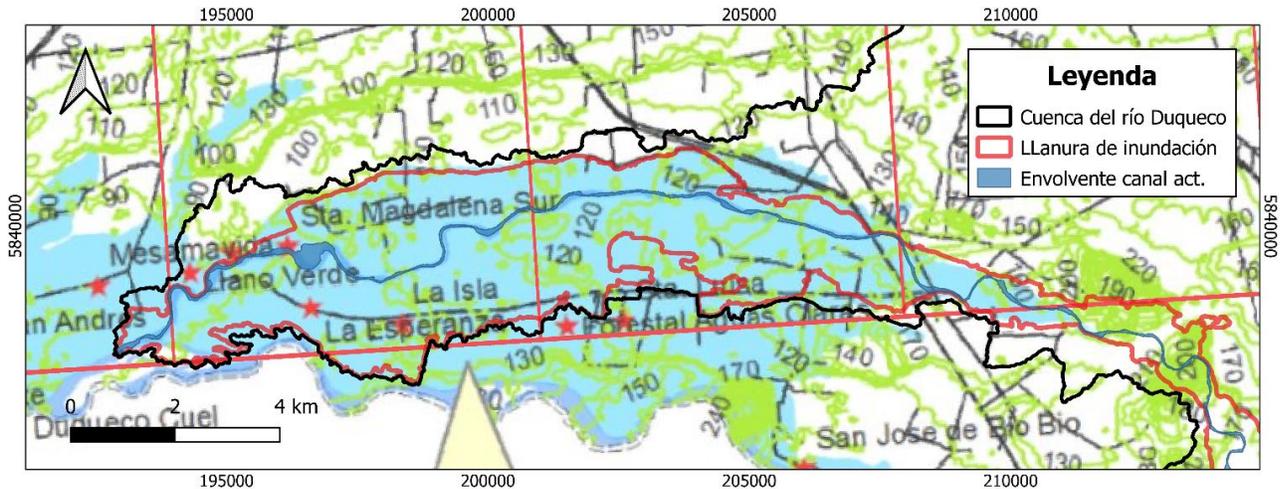
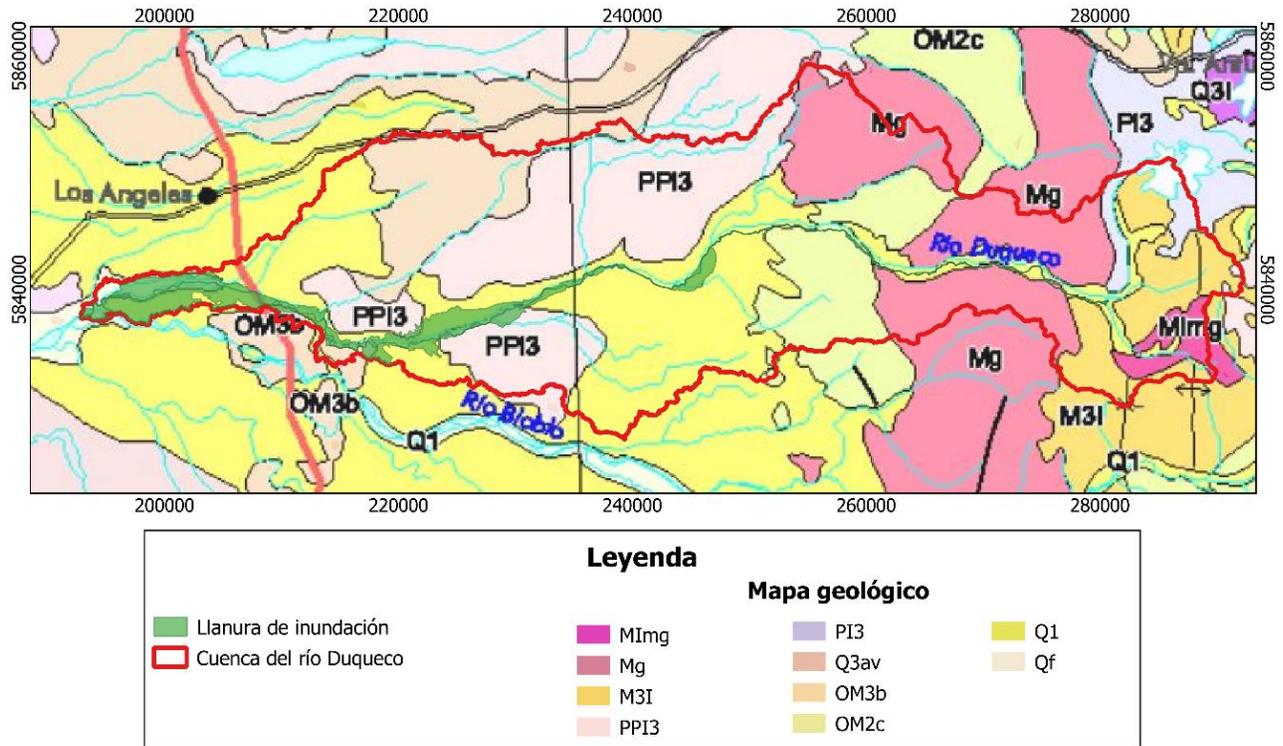


Figura 5.4 Comparación entre el polígono de la llanura de inundación delimitado con la herramienta VBET, y el mapa de inundaciones de la cartografía social en la zona cercana a la confluencia del río Duqueco y Biobío

Fuente: Adaptado de AMRBB (2015)



Serie	Cod	Detalle	id
Rocas Intrusivas	MImg	Mioceno inferior- medio: granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, dioritas de biotita y hornblenda	1
Rocas Intrusivas	Mg	Mioceno: granodioritas, dioritas y tonalitas.	2
Volcánica	M3I	Mioceno inferior-medio: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas	3
Volcánica	PPI3	Plioceno-pleistoceno: lavas, basálticos, tobas y conglomerados.	4
Volcánica	PI3	Pleistoceno: secuencias lávicas y centros volcánicos, depósitos piroclásticos andesíticos-basálticos.	5
Volcánica	Q3av	Cuaternario: depósitos de avalancha volcánica, asociados a colapso parcial de edificios volcánicos.	6
Volcánica	OM3b	Oligoceno- mioceno: lavas, brechas y rocas piroclásticas.	7
Volcano-Sedimentaria	OM2c	Oligoceno- mioceno: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.	8
Sedimentaria	Q1	Pleistoceno- holoceno: depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa, en menor proporción fluvio-glaciales y deltaicos.	9
Sedimentaria	Qf	Pleistoceno- holoceno: depósitos fluviales, gravas, arenas y limos del curso de los ríos, terrazas y llanuras de inundación.	10

Figura 5.5 Mapa geológico de la zona de estudio junto al polígono de la llanura de inundación del río Duqueco

Fuente: Adaptado de Sernageomin (2000)

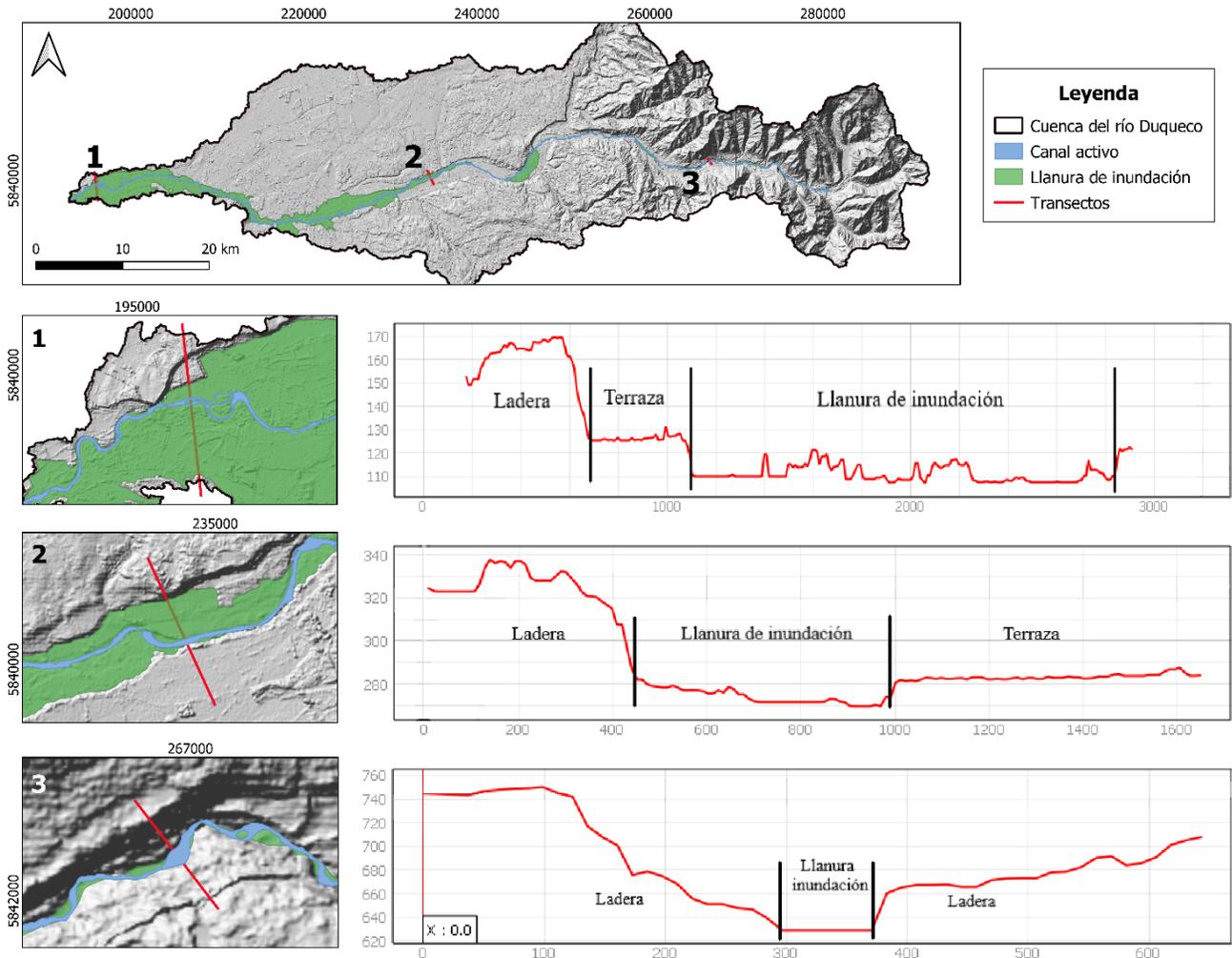


Figura 5.6 Perfiles de elevación transversal en tres zonas de la llanura de inundación del río Duqueco, extraídos con la herramienta *terrain profile* de QGIS, el eje vertical indica la elevación en m.s.n.m y el eje horizontal la distancia en metros

5.2.2 Objetos geográficos desagregados

La Figura 5.7 muestra la desagregación de la llanura de inundación cada 100 metros sobre su línea central, y la desagregación de la envolvente del canal activo cada 50 metros sobre su eje central, obteniendo 966 y 2038 DGOs respectivamente, numerados en orden ascendente a favor de la dirección del escurrimiento.

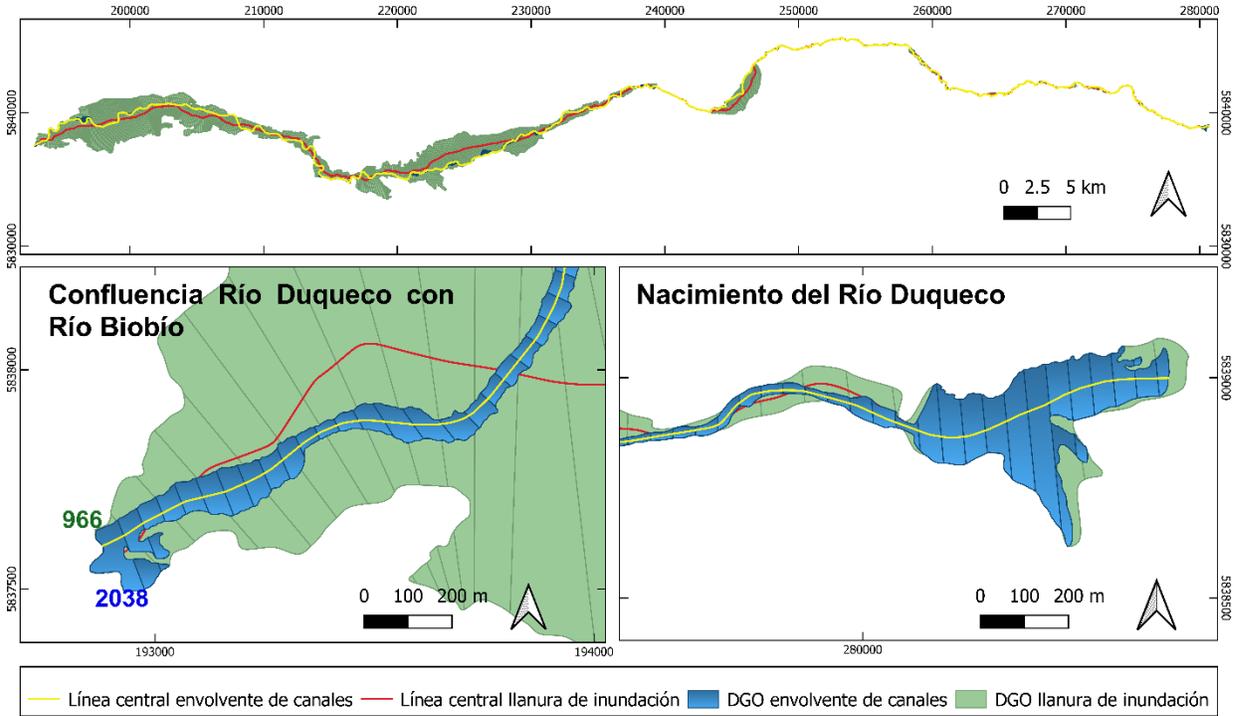


Figura 5.7 Llanura de inundación y envolvente de canales desagregadas cada 100 y 50 metros

5.2.3 Métricas locales

Ancho llanura de inundación: la Figura 5.8 muestra el ancho de la llanura de inundación, medida desde su eje central, se puede observar como el ancho aumenta desde aguas arriba hacia aguas abajo, debido a la disminución de pendiente y menor grado de confinamiento.

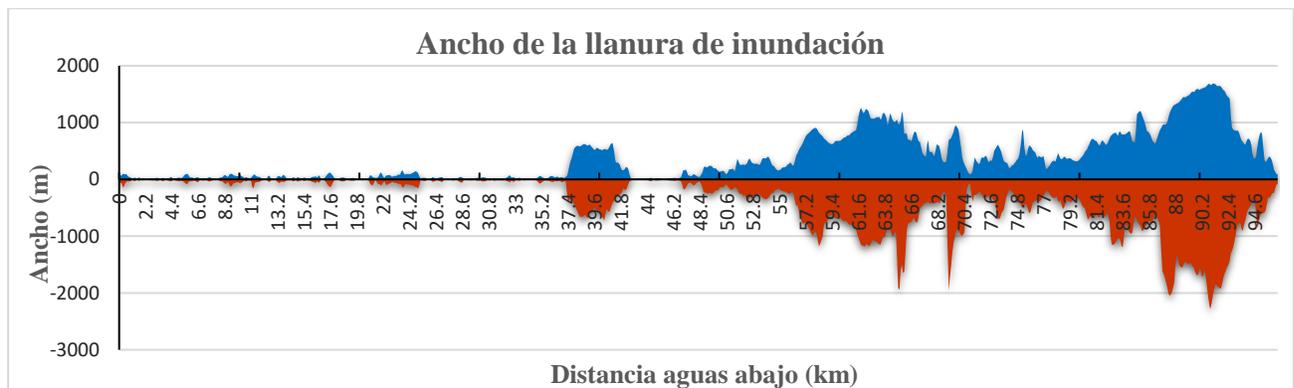


Figura 5.8 Ancho de la llanura de inundación, medida sobre el eje central desde aguas arriba hacia agua abajo

Ancho del canal activo: la Figura 5.9 muestra el ancho del canal activo y de su envolvente, los tres primeros *peak* del ancho están provocados por los espejos del agua embalsada producto de las obras de bocatomas de “Las Juntas” y “El Trintre”, y del contraembalse “Rucacura”. Se puede notar un aumento del ancho del canal activo que va de aguas arriba hacia aguas abajo, lo que se debe a varios factores como la disminución del confinamiento, la menor pendiente y el aumento de las barras. Finalmente, destaca en la zona media entre el kilómetro 52 y 75 zonas con una gran diferencia entre el ancho de la envolvente y el canal activo, debido a la presencia de islas de gran tamaño. La validación de esta métrica se realiza con la inspección visual de las imágenes satelitales.

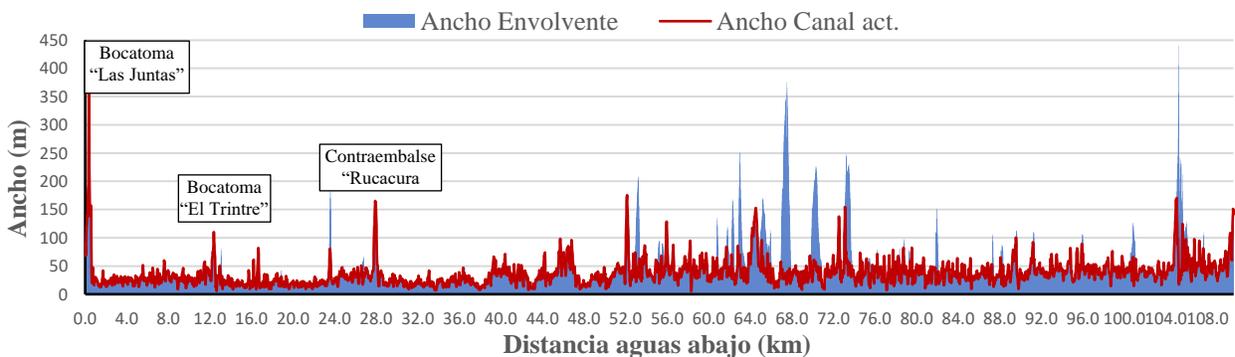


Figura 5.9 Comparación entre el ancho del canal activo y su envolvente

Área de drenaje, elevación y pendiente: la Figura 5.13 presenta de forma combinada el área de drenaje, elevación y pendiente, las que fueron medidas cada 20 metros sobre la línea central de la envolvente del canal activo. Se observa como los “saltos” en la línea del área de drenaje se deben al aporte de caudal que entregan los tributarios más importantes del río Duqueco, de aguas arriba hacia aguas abajo se encuentran, el río Canicura, estero Revenco, estero Quilleco, río Arilahuen, estero Curiche, río Coreo y el estero Cholguahue. Las mayores pendientes se encuentran en la parte alta de la cuenca, las que disminuyen aguas abajo, más notoriamente a partir del kilómetro 50.

Sinuosidad local: la Figura 5.12 muestra el grado y tipo de sinuosidad a lo largo del corredor fluvial, prácticamente la totalidad del cauce presenta un tipo de sinuosidad recta o sinuosa, con solo dos tramos meándricos en la zona baja cercana a la confluencia con el río Biobío. Se observa que en la dirección aguas abajo el grado de sinuosidad del cauce aumenta progresivamente y los tramos con sinuosidad restringida (debido al confinamiento del cauce), desaparecen a partir del kilómetro 50 hacia aguas abajo.

Potencia de la corriente específica (Specific Stream power): la Figura 5.11 presenta la potencia de la corriente específica calculada cada 20 metros sobre la línea central de la envolvente del canal activo. Su valor es considerado una estimación gruesa, al tener un grado de incertidumbre alto. En primer lugar, no se cuenta con el dato del caudal de cauce lleno (*bankfull*) a lo largo del corredor fluvial, ante esta dificultad, se utiliza una ecuación empírica entre el caudal promedio máximo anual y el área de drenaje (las estaciones utilizadas y el detalle de la relación empírica se encuentra en la sección ANEXO 4.1), esto tiene el problema de no tratarse exactamente del caudal *bankfull*, y que estas relaciones son válidas para áreas de drenaje similares, pero difícilmente siguen la misma tendencia en todo el corredor fluvial, ya que la cuenca no es homogénea en toda su extensión, por lo que hay un abuso de la interpolación realizada. En segundo lugar, la pendiente que se calculó en base a un “DEM quemado”, es decir, que ya ha sido manipulado, y con un suavizado que le resta exactitud. Por estos motivos, el valor de la potencia de la corriente específica se considera una “estimación gruesa”, y en lugar de dar énfasis a su valor numérico, su utilidad está en ver el plano general a nivel cuenca e identificar las zonas que en comparación a otras presentan un mayor potencial de corriente.

Con respecto a las obras de generación hidroeléctrica en el río Duqueco, la Figura 5.10 muestra un esquema de la operación de las centrales y ubicación de las obras en el cauce, se tiene en cuenta que, desde la presa y bocatoma “Las Juntas” se desvía parte del caudal a un canal que sigue paralelo al cauce y lleva el caudal hasta la central eléctrica “Peuchén”. Esta central aprovecha la energía potencial del agua para la generación eléctrica y descarga el agua nuevamente al cauce natural donde es embalsada por la presa y bocatoma “El Trintre”, aquí se repite el proceso y se desvía parte del caudal a un canal que lleva el agua hasta la central “Mampil” la que finalmente descarga hacia el cauce natural. El agua es embalsada una última vez por el contraembalse Rucacura, el que tiene por objetivo restaurar el régimen hidrológico natural del río. El río Duqueco no lleva el caudal natural desde el contraembalse hacia aguas arriba, donde debería conducir como mínimo un caudal ecológico, o uno mayor dependiendo de la operación de las dos presas aguas arriba, por lo que la potencia de la corriente calculada sobre esta zona no es representativa.

Analizando el valor de la potencia de la corriente específica, justo después del contraembalse, se concluye que, los valores más altos de la potencia de la corriente específica se encuentran en la zona media- alta de la cuenca, sin llegar a la parte más alta pues a pesar de tener una gran pendiente, el bajo caudal (área de drenaje que aporta es muy pequeña) genera que la potencia de la corriente no sea tan

elevada (el caso real con las presas existentes es que el caudal es más bajo aun por los desvíos a los canales y el potencial de la corriente más pequeño aun), lo mismo sucede en la zona baja, a pesar de tener caudales más altos la potencia de la corriente no aumenta por la baja pendiente de la zona. De esta forma en la zona media-alta (entre el kilómetro 28 y 70 aguas abajo) se encuentran los valores más altos de potencia de la corriente específica, donde es probable que la erosión y el transporte de sedimentos, tengan mayor relevancia. En contraste la zona desde el kilómetro 70 hasta la confluencia con el río Biobío, presenta un potencial de corriente específica mucho más bajo, por lo que probablemente se producirán procesos de sedimentación.

La Figura 5.14 muestra 7 zonas del cauce con alto valor de potencia de corriente específica. No se esperan migraciones laterales o ajustes en la forma en planta significativos en las zonas 1 a 5, pues a pesar del gran poder erosivo, las zonas se encuentran confinadas, es decir, tienen su movimiento restringido. En cambio las zonas 6 y 7 en las cercanías de los puentes Duqueco y Calderones, no se encuentran confinadas por lo que a largo plazo podrían experimentar migraciones laterales, dando lugar a desbordamientos y cambios en su régimen de comportamiento.

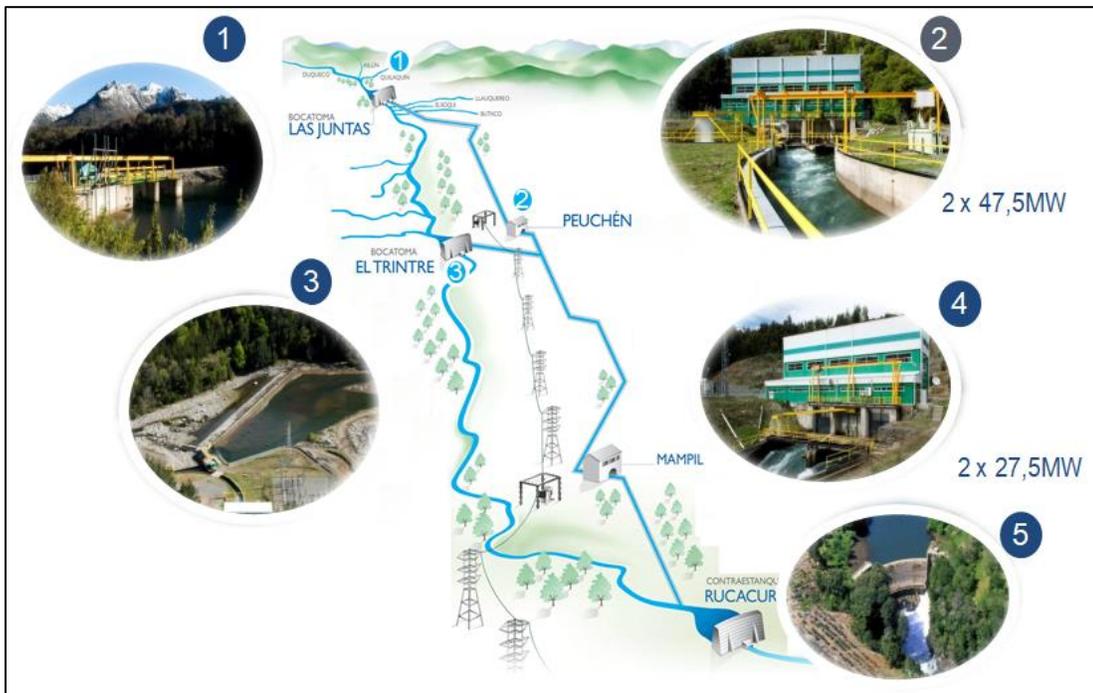


Figura 5.10 Esquema ubicación de centrales hidroeléctricas en río Duqueco

Fuente: Complejo Hidroeléctrico Duqueco , s. f.

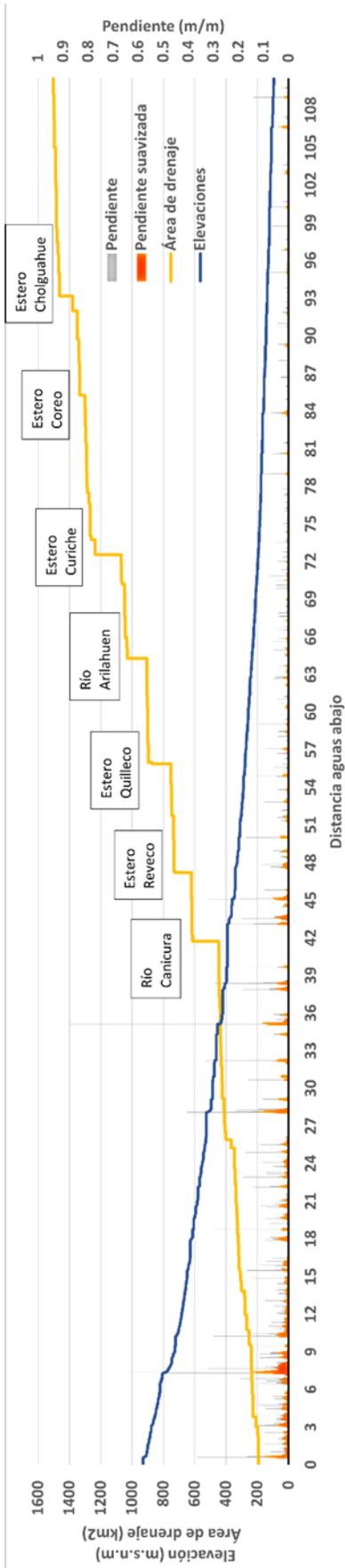


Figura 5.13 Elevación, área de drenaje y pendiente

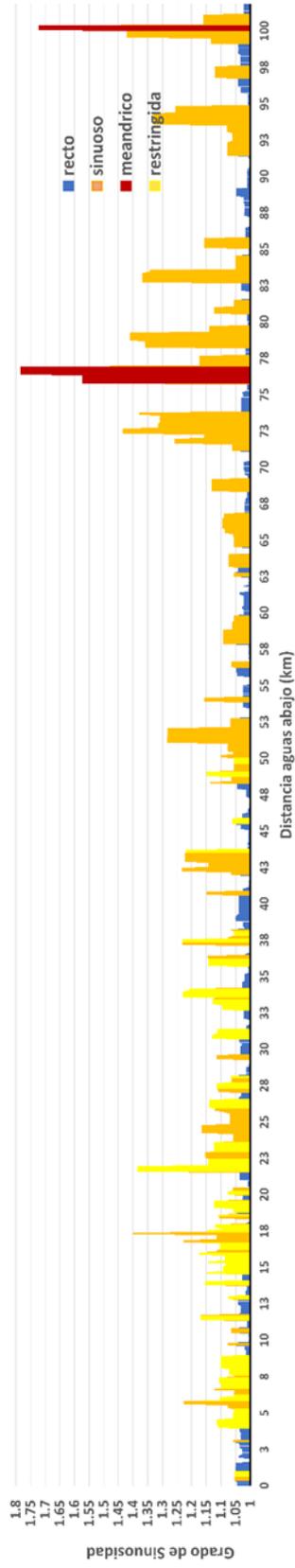


Figura 5.12 Sinuosidad local del cauce

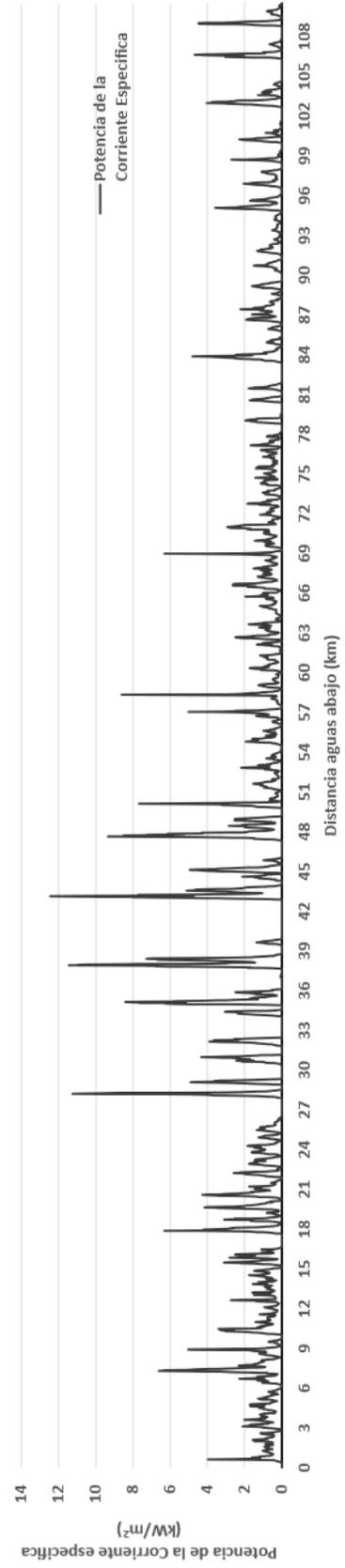


Figura 5.11 Potencia específica de la corriente

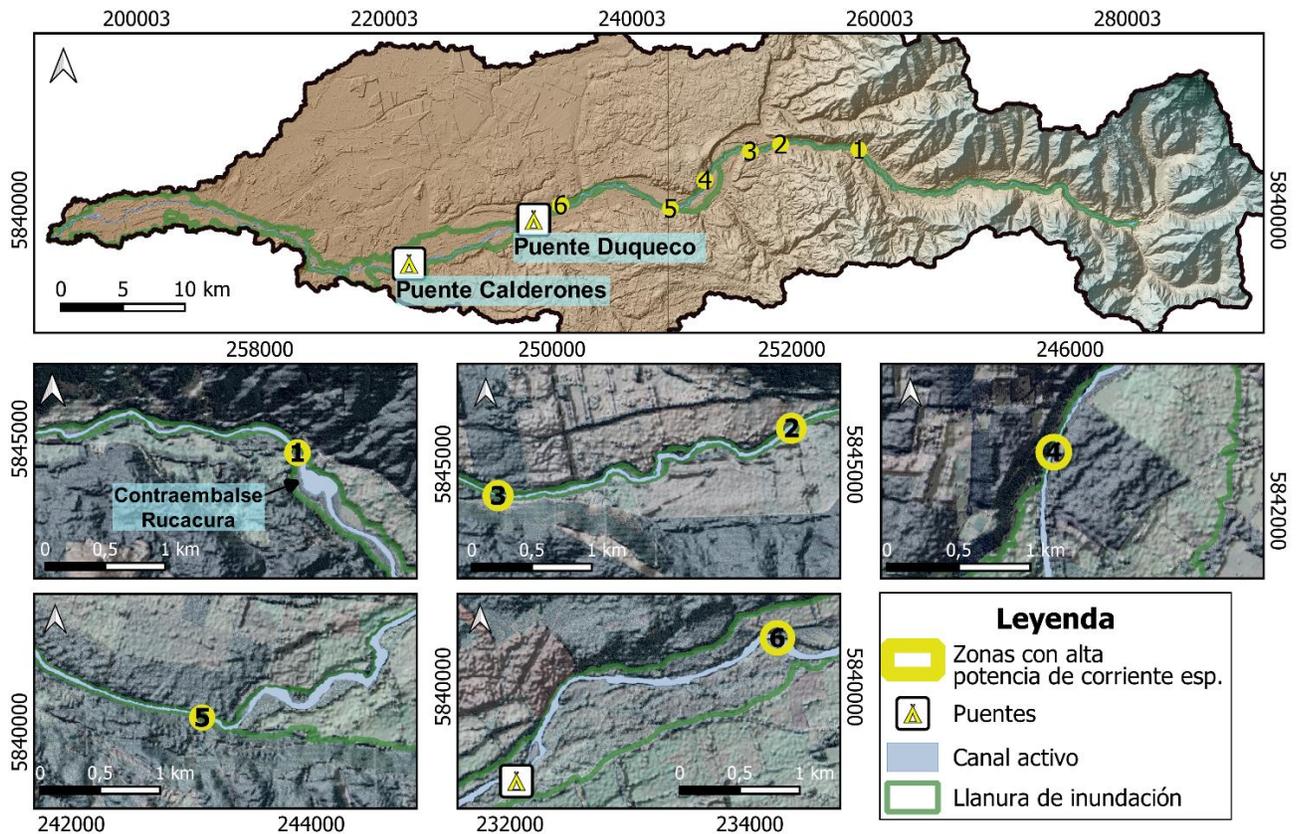


Figura 5.14 Zonas del cauce con alto potencial de corriente específica

Material del lecho: la Figura 5.15 muestra la clasificación del lecho del cauce en dos clases. La zona alta desde el nacimiento del cauce hasta el primer ensanchamiento apreciable de la llanura de inundación se clasifica como cantos rodados y bloques. Desde este punto hasta la confluencia con el río Biobío como lecho de cantos rodados. Notar que en los 4 puntos con datos granulométricos (estaciones 1 a 4) el diámetro de los áridos se clasifica como cantos rodados (entre 64 mm y 256 mm). Para la zona aguas arriba de la estación 1 y aguas abajo de la estación 4 se tiene un registro fotográfico, en la Figura 5.16 se puede apreciar en la zona D la presencia de bloques, y en la Zona A la presencia de cantos rodados.

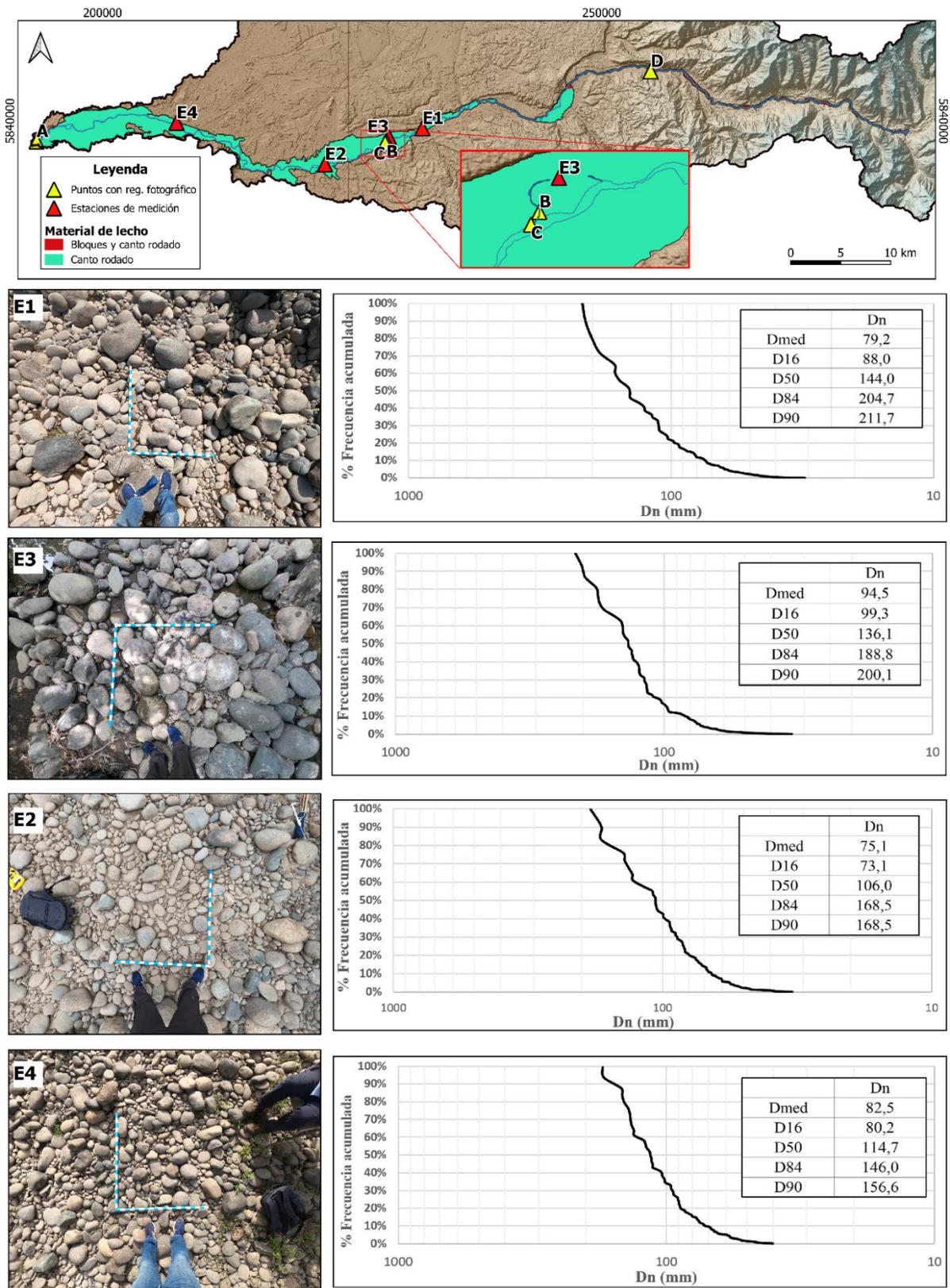


Figura 5.15 Clasificación del material del lecho en el río Duqueco

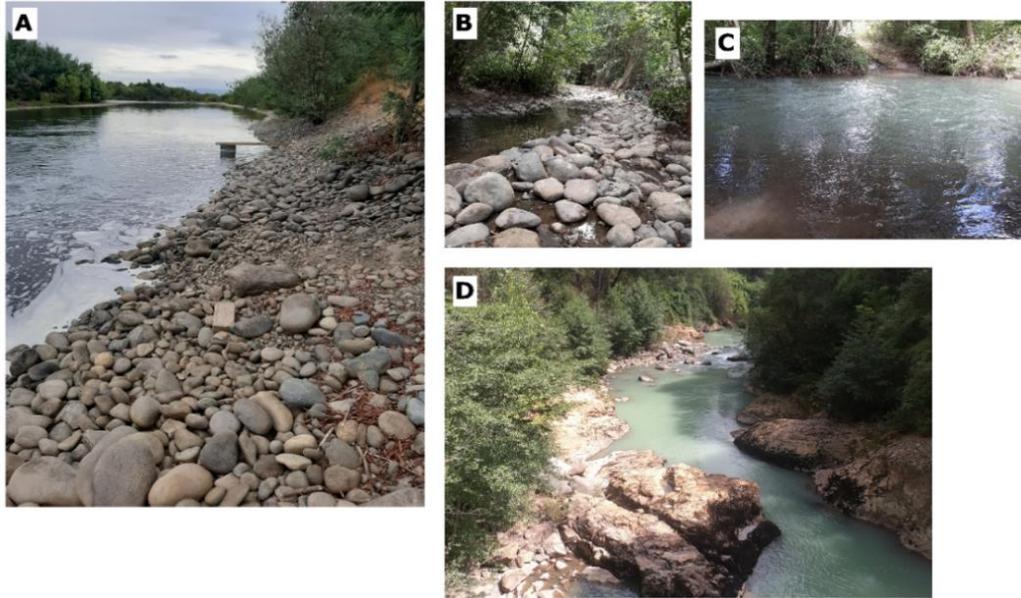


Figura 5.16 Registro fotográfico de zonas visitadas.

Forma en planta: la distribución de las formas en planta a lo largo del cauce es mayoritariamente del tipo monocal con el 56.9%, seguido de la forma transicional con el 37.4% , y minoritariamente las formas en planta multicanal con el 5.6%. Su distribución espacial se verá reflejada en la sección de los estilos fluviales.

5.2.4 Objetos geográficos agregados y tramos representativos

Producto de la agregación espacial de las métricas de material del lecho y de forma en planta, resultan 2 AGO para el primer caso y 92 AGO para el segundo. El cruce de ambas produce 92 tramos del cauce, que guardan homogeneidad en las formas y procesos.

5.2.5 Clasificación de estilos fluviales

A continuación, se analizan las métricas calculadas sobre los 101 tramos, necesarias para la clasificación de los estilos fluviales, en que la forma en planta y el material del lecho ya habían sido definidas sobre estos tramos por lo que no fueron calculadas nuevamente.

La Figura 5.17 muestra un gráfico **del confinamiento del cauce** desde aguas arriba hacia aguas abajo, con la componente del ancho de la llanura de inundación. En la zona alta el cauce está confinado casi en su totalidad hasta el kilómetro 54, luego se desconfina progresivamente hacia aguas abajo mostrando a la vez, el crecimiento de la llanura aluvial y un mayor espacio para al movimiento del cauce activo.

La Figura 5.18 muestra que la **causa del confinamiento** en la zona alta mayormente es por la cordillera de Los Andes, para luego intercalar con terrazas y formas aluviales, y con solo un tramo del cauce confinado por infraestructura en la zona del cruce de la ruta 5 sur.

La Figura 5.19 muestra la **presencia o ausencia de unidades geomorfológicas** como barras, islas y elementos de la llanura aluvial (paleocauces, meandros cortados, etc.). Se observa la presencia de las UG en la zona media y baja del cauce, en contraste con la ausencia de UG en la zona alta y confinada. La zona marcada con un círculo amarillo en los mapas A y B, corresponde al contraembalse Rucacura, se puede apreciar un sitio de barras laterales e islas, lo que es atípico para una zona de fuerte pendiente, que se puede explicar por los cambios en el régimen sedimentológico que provoca la presencia de la presa, generando estas zonas de sedimentación.

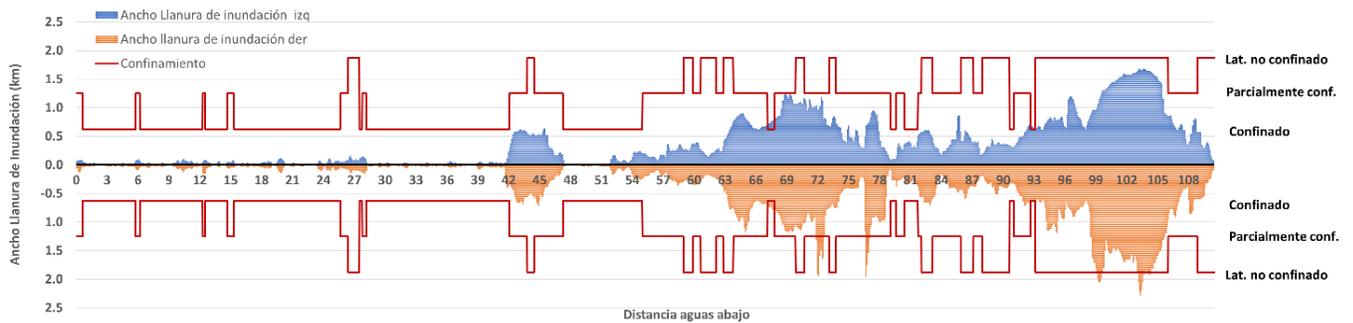


Figura 5.17 Confinamiento del cauce en comparación al ancho de la llanura aluvial

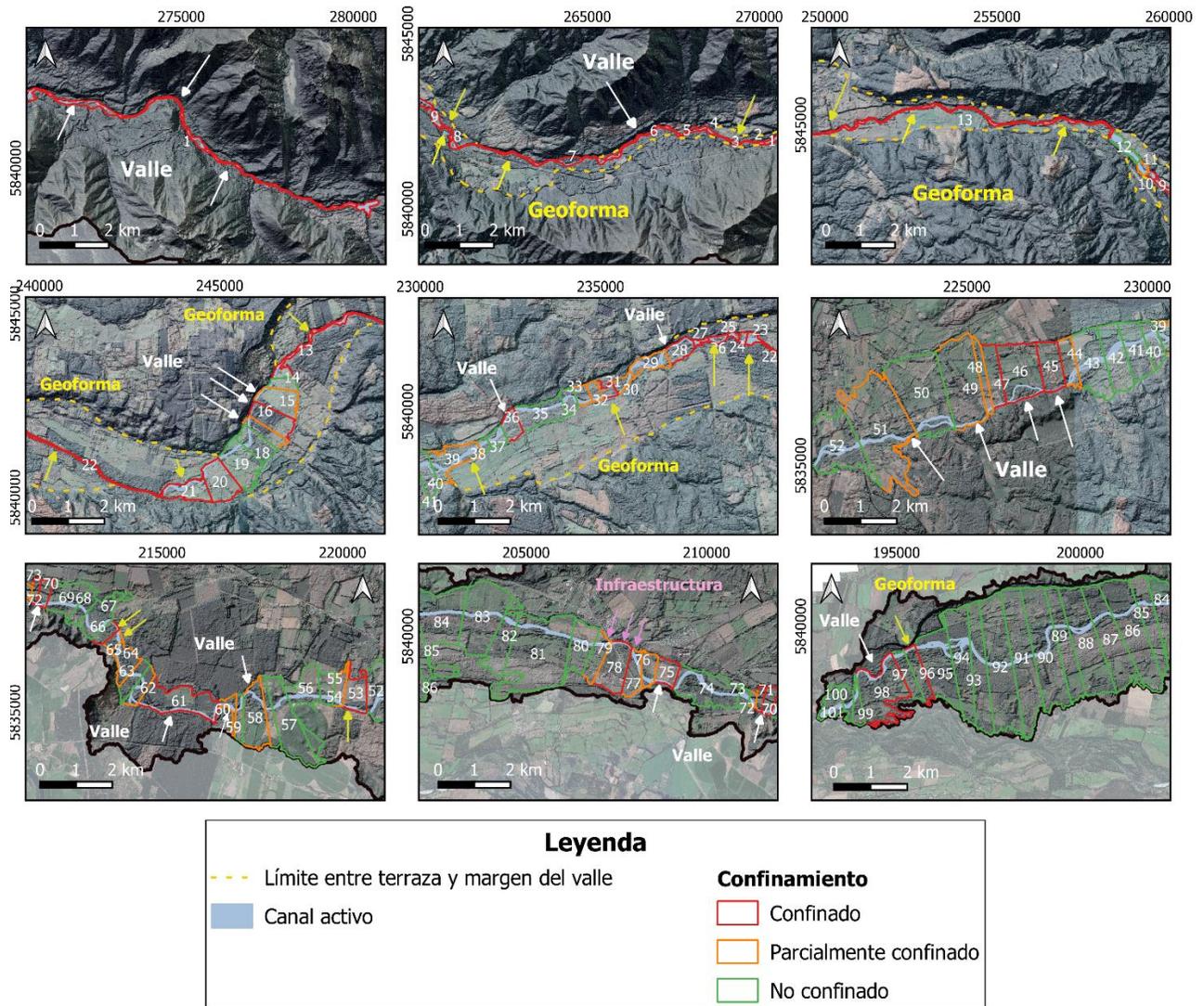


Figura 5.18 Confinamiento y su causa para cada segmento del cauce, en cada mapa la dirección del flujo es de derecha a izquierda, como se puede ver en la numeración de los segmentos siguiendo la misma dirección desde el número 1 hasta el 101

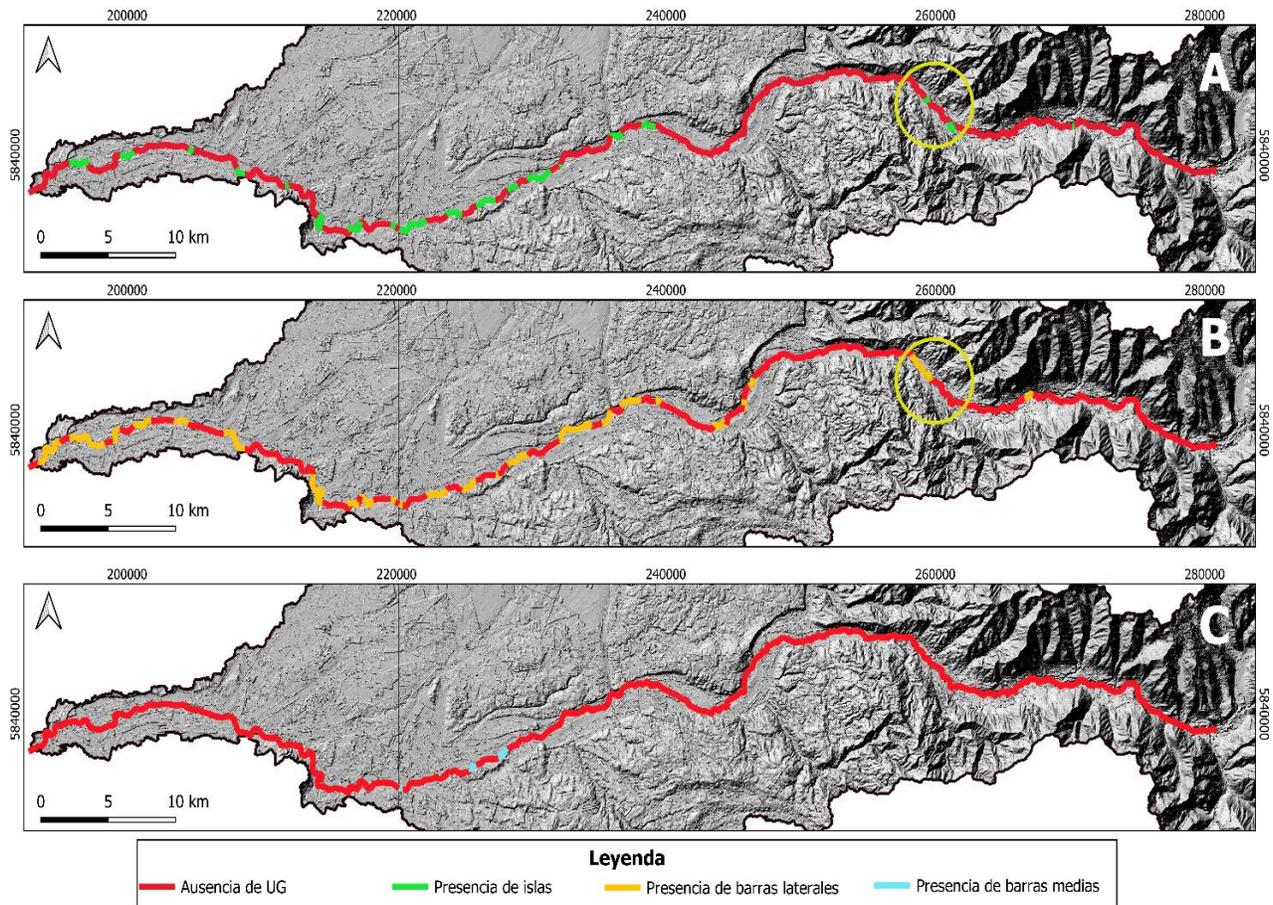


Figura 5.19 Presencia o ausencia de barras e islas en cada segmento del corredor fluvial

Matriz y algoritmo

Del algoritmo de clasificación resultan 42 estilos fluviales principales y una subclasificación de estos con un total de 57 subestilos fluviales. La Tabla 5.1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resume las características de cada estilo fluvial principal y complementario. La Figura 5.20 muestra su distribución espacial.

En la sección ANEXO 4.2 se muestra la matriz con la recopilación de las métricas expuestas en la sección anterior y su clasificación de estilo fluvial, para los 101 segmentos.

Tabla 5.1 Atributos hidromorfométricos de los estilos fluviales presentes en el río Duqueco

	Confinamiento	Causa del confinamiento	Forma en planta	Material del lecho	Estilo fluvial complementario	Barras	UG F	Islas
RS_1	Confinado	Geoforma	Monocanal confinado	Bloques y Canto Rodado	RS_1_1	0	0	0

	Confinamiento	Causa del confinamiento	Forma en planta	Material del lecho	Estilo fluvial complementario	Barras	UG F	Islas
RS_2	Confinado	Valle	Monocanal confinado	Canto Rodado	RS_2_1	0	0	0
					RS_2_2	1	0	0
RS_3	Confinado	Valle	Monocanal confinado	Bloques y Canto Rodado	RS_3_1	0	0	0
RS_4	Confinado	Geoforma	Monocanal confinado	Canto Rodado	RS_4_1	0	0	0
RS_5	No Confinado	-	Monocanal sinuoso	Canto Rodado	RS_5_1	0	1	0
					RS_5_2	1	0	0
RS_6	No Confinado	-	Monocanal recto	Canto Rodado	RS_6_1	0	0	0
					RS_6_2	0	1	0
RS_7	No Confinado	-	Monocanal de baja sinuosidad	Canto Rodado	RS_7_1	0	0	0
RS_8	No Confinado	-	Monocanal de sinuosidad restringida	Canto Rodado	RS_8_1	0	0	0
RS_9	No Confinado	-	Monocanal meándrico	Canto Rodado	RS_9_1	1	0	0
RS_10	Confinado	Geoforma	Monocanal de sinuosidad restringida	Canto Rodado	RS_10_1	0	0	0
					RS_10_2	1	0	1
RS_11	Confinado	Valle	Monocanal de sinuosidad restringida	Bloques y Canto Rodado	RS_11_1	0	0	0
RS_12	Confinado	Geoforma	Monocanal de sinuosidad restringida	Bloques y Canto Rodado	RS_12_1	0	0	0
RS_13	Parcialmente Confinado	Geoforma	Monocanal de sinuosidad restringida	Bloques y Canto Rodado	RS_13_1	1	0	0
RS_14	Parcialmente Confinado	Valle	Monocanal de baja sinuosidad	Canto Rodado	RS_14_1	0	0	0
RS_15	Parcialmente Confinado	Geoforma	Monocanal de baja sinuosidad	Canto Rodado	RS_15_1	0	0	0
RS_16	Parcialmente Confinado	Valle	Monocanal sinuoso	Canto Rodado	RS_16_1	1	0	1
RS_17	Parcialmente Confinado	Geoforma	Monocanal sinuoso	Canto Rodado	RS_17_1	0	0	0
RS_18	Parcialmente Confinado	Valle	Monocanal de baja sinuosidad	Bloques y Canto Rodado	RS_18_1	0	0	0
RS_19	Parcialmente Confinado	Geoforma	Monocanal de baja sinuosidad	Bloques y Canto Rodado	RS_19_1	0	0	0
RS_20	Parcialmente Confinado	Geoforma	Monocanal recto	Canto Rodado	RS_20_1	0	0	0
RS_21	Parcialmente Confinado	Valle	Monocanal meándrico	Canto Rodado	RS_21_1	1	0	0
RS_22	No Confinado	-	Transición SWALLOWING	Canto Rodado	RS_22_1	1	0	1
					RS_22_2	0	0	1
RS_23	No Confinado	-	Transición WANDERING	Canto Rodado	RS_23_1	1	0	0
					RS_23_2	1	1	0
					RS_23_3	1	1	1
					RS_23_4	1	0	1
RS_24	No Confinado	-	Transición barras alternas	Canto Rodado	RS_24_1	1	1	0
RS_25	No Confinado	-	Transición WANDERING	Bloques y Canto Rodado	RS_25_1	1	0	0

	Confinamiento	Causa del confinamiento	Forma en planta	Material del lecho	Estilo fluvial complementario	Barras	UG F	Islas
RS_26	Parcialmente Confinado	Valle	Transición barras alternas	Canto Rodado	RS_26_1	1	0	0
RS_27	Confinado	Valle	Transición WANDERING	Canto Rodado	RS_27_1	1	0	0
					RS_27_2	1	0	1
RS_28	Parcialmente Confinado	Valle	Transición WANDERING	Canto Rodado	RS_28_1	1	0	0
					RS_28_2	1	1	0
					RS_28_3	1	1	1
RS_29	Parcialmente Confinado	Geoforma	Transición WANDERING	Canto Rodado	RS_29_1	1	0	0
					RS_29_2	1	0	1
					RS_29_3	1	1	0
RS_30	Parcialmente Confinado	Geoforma	Transición barras alternas	Canto Rodado	RS_30_1	1	0	0
RS_31	Parcialmente Confinado	Geoforma	Transición SWALLOWING	Canto Rodado	RS_31_1	0	0	1
RS_32	Parcialmente Confinado	Valle	Transición SWALLOWING	Canto Rodado	RS_32_1	0	0	1
RS_33	Parcialmente Confinado	Infraestructura	Transición WANDERING	Canto Rodado	RS_33_1	1	0	0
RS_34	Confinado	Geoforma	Transición WANDERING	Canto Rodado	RS_34_1	1	0	1
RS_35	Confinado	Geoforma	Transición WANDERING	Bloques y Canto Rodado	RS_35_1	1	0	0
RS_36	Confinado	Infraestructura	Transición barras alternas	Canto Rodado	RS_36_1	1	0	0
RS_37	Confinado	Geoforma	Transición SWALLOWING	Bloques y Canto Rodado	RS_37_1	0	0	1
RS_38	Confinado	Valle	Multi canal anabranching	Canto Rodado	RS_38_1	1	0	1
RS_39	Parcialmente Confinado	Valle	Multi canal anabranching	Canto Rodado	RS_39_1	1	0	1
RS_40	No Confinado	-	Multi canal isla trezado	Canto Rodado	RS_40_1	0	0	1
RS_41	No Confinado	-	Multi canal anabranching	Canto Rodado	RS_41_1	1	0	1
					RS_41_2	0	0	1
RS_42	Parcialmente Confinado	Geoforma	Multi canal isla trezado	Canto Rodado	RS_42_1	0	0	1

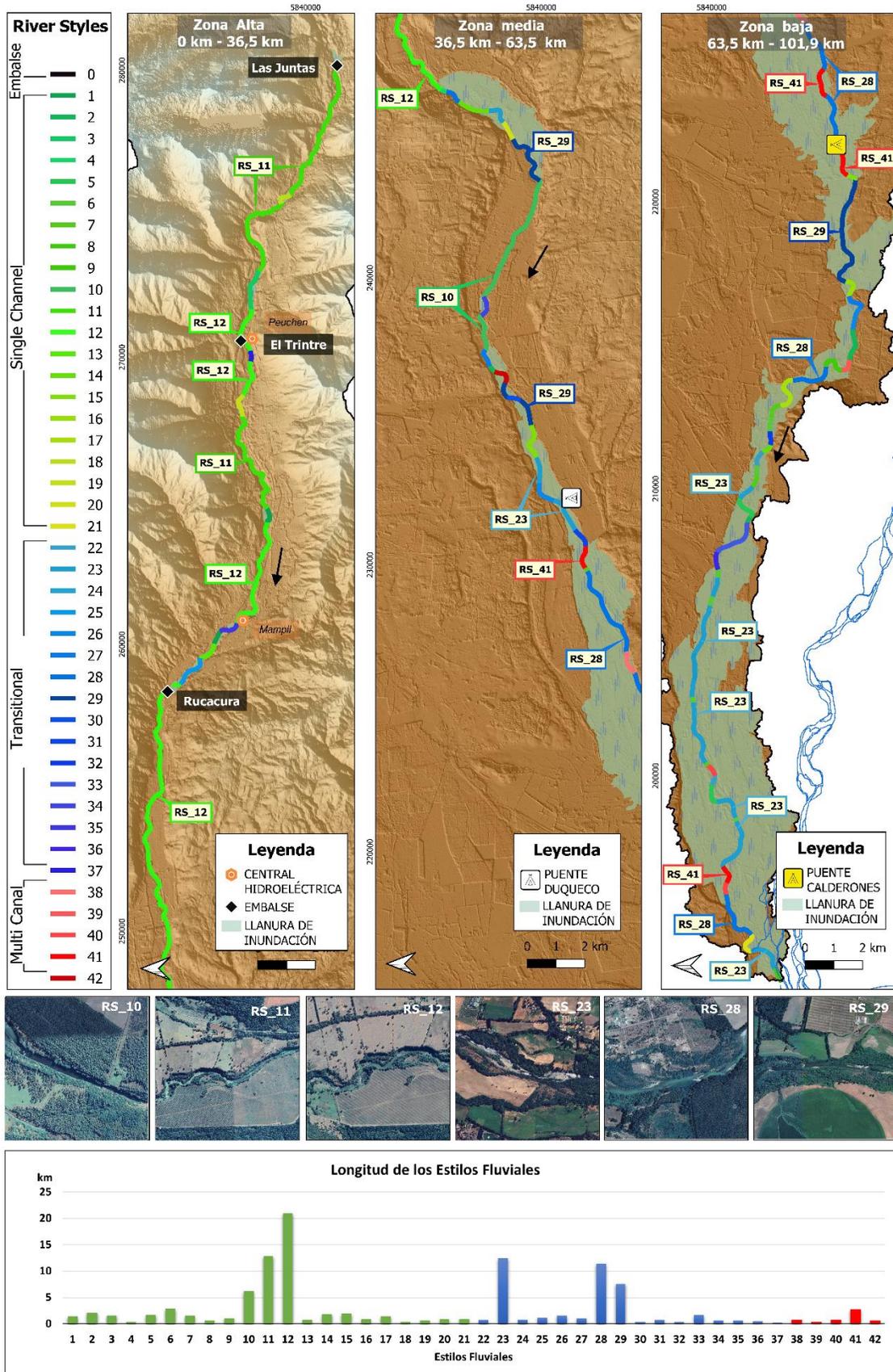


Figura 5.20 Distribución de estilos fluviales en el río Duqueco

A continuación, se analiza el río en 3 partes, la zona alta, media y baja. En cada zona se destacan los estilos fluviales que tienen mayor frecuencia y longitud.

Río Duqueco en zona alta: se caracteriza por la presencia de los estilos fluviales 11 y 12 que abarcan prácticamente la totalidad del cauce en la zona alta. Ambos estilos fluviales muy similares, caracterizan al río como totalmente confinado, la forma en planta es monocanal de sinuosidad restringida, no hay presencia importante de ningún tipo de unidad geomórfica y el lecho del cauce es de cantos rodados y bloques, diferenciándose únicamente por la causa del confinamiento, mientras que el RS_11 se encuentra confinado por las laderas de la cordillera de los Andes, aguas abajo están se abren dando paso a la formación de terrazas que confinan al RS_12. Como se explicó anteriormente el valor de la potencia de la corriente específica no tendría validez en la zona intervenida por las presas, aun así, por el alto valor de la pendiente, y baja presencia de unidades geomórficas, se identifica como una zona de transporte de sedimentos, a excepción de la zona inmediatamente aguas arriba del contraembalse Rucacura donde se ubican los estilos fluviales transicionales, que se caracterizan por tener formación de barras e islas. Este fenómeno se puede explicar por la acumulación de sedimentos que genera el contraembalse al frenar la velocidad del agua y disminuir la pendiente y energía del flujo.

Río Duqueco en zona media: zona comprendida entre el primer ensanchamiento de la llanura de inundación hasta el Puente Duqueco, se caracteriza por la presencia mayoritaria de estilos fluviales monocanal con RS_12 y RS_10, seguidos de los estilos fluviales transicionales RS_29 y RS_23. A partir de esta zona cambia la caracterización del lecho a una granulometría de cantos rodados, para el monocanal RS_10 sigue siendo confinado por terrazas con una sinuosidad restringida, aguas abajo aparecen los estilos no confinados en su totalidad, como el RS_23 y RS_29 (parcialmente confinado en una de sus riberas), ambos con una forma en planta transicional tipo *Wandering* que se caracteriza por una alta frecuencia de barras laterales y la presencia de un brazo dominante entre sus canales. En cuanto a la potencia de la corriente, esta alcanza sus mayores valores en el inicio de la zona, al igual que la zona alta, estos puntos se encuentran confinados, por lo que la erosión no afecta la forma del río (migraciones laterales) y solo se podría esperar un transporte de sedimentos mayor, siguiendo aguas abajo existen dos puntos con alta potencia de corriente, aguas arriba del puente Duqueco y otro ante el puente Duqueco y Calderones, ambas zonas se encuentran con un confinamiento parcial en

una de sus riberas, por lo que tienen un grado libertad de ajustar su forma en el largo plazo o durante eventos extremos.

Río Duqueco en zona baja: es la zona más extensa que va desde la zona intermedia entre los dos puentes hasta la confluencia con el río Biobío. Se caracteriza por la presencia mayoritaria de los estilos fluviales transicionales RS_28, RS_28 y RS_29, como también en zonas puntuales la ocurrencia de estilos multicanal RS_41. A partir de esta zona hay un marcado ensanche de la llanura de inundación, se encuentra en mayor parte no confinado, y aumentan los segmentos multicanal, aunque sigue prevaleciendo el monocal, la variedad de estilos fluviales es mucho más amplia, debido a la mayor frecuencia de UG que dan paso a segmentos de transición o multicanales. En particular el estilo fluvial multicanal RS_41, se desarrolla libre de confinamiento, con una forma en planta multicanal *anabanching*, que se caracteriza por la presencia de islas y escasas barras, con un brazo predominante entre canales largos y distantes. La potencia de la corriente tiende a ser más baja, en concordancia con la disminución de la pendiente, creando zonas de sedimentación que forman las UG, la pérdida paulatina de confinamiento permite el mayor movimiento del cauce, evidenciado en la presencia de paleocanales o meandros cortados (véase columna UGF de la Tabla 5.1)

5.3. COMPORTAMIENTO DEL CAUCE: ENFOQUE HIDRÁULICO

5.3.1 Área de inundación

La Figura 5.21 muestra el área de inundación del río Duqueco para una crecida con un periodo de retorno de 100 años ($T=100$). En la parte superior se muestra la zona de inundación a escala cuenca, donde se detectan las áreas con mayor desborde del cauce y población ribereña afectada. En la parte inferior se muestra un acercamiento a las dos zonas con mayor área inundada, ambas ubicadas en la zona baja de la cuenca. Las características observadas son:

Área 1: ubicada entre el puente Duqueco y puente Calderones, presenta desbordamiento del cauce por la ribera norte, cubriendo gran parte del terreno con población ribereña del sector conocido como Llano Blanco.

Área 2: ubicada antes de la confluencia del río Duqueco con el río Biobío, en que se presenta un desbordamiento por ambas riberas del cauce, afectando a la población ribereña, pero en menor medida, por los escasos asentamientos. Tener en cuenta que es probable que esta área sea mucho mayor, por la acción conjunta del desbordamiento del río Duqueco y río Biobío.

En la Figura 5.21 se muestra la delimitación de la llanura de inundación (*valley bottom*), con una línea verde, determinada en el análisis geomorfológico con la herramienta VBET, que trabaja con una pendiente máxima transversal para determinar la extensión máxima que tendría el escurrimiento. Tras la modelación hidráulica es posible verificar que la llanura de inundación determinada con VBET es muchos más conservadora que la determinada con el análisis hidráulico, conteniendo completamente la crecida de 100 años. Esto es esperable, pues la herramienta VBET no considera un periodo de retorno o caudal, solo el impedimento físico del avance del escurrimiento dado por la topografía de la zona.

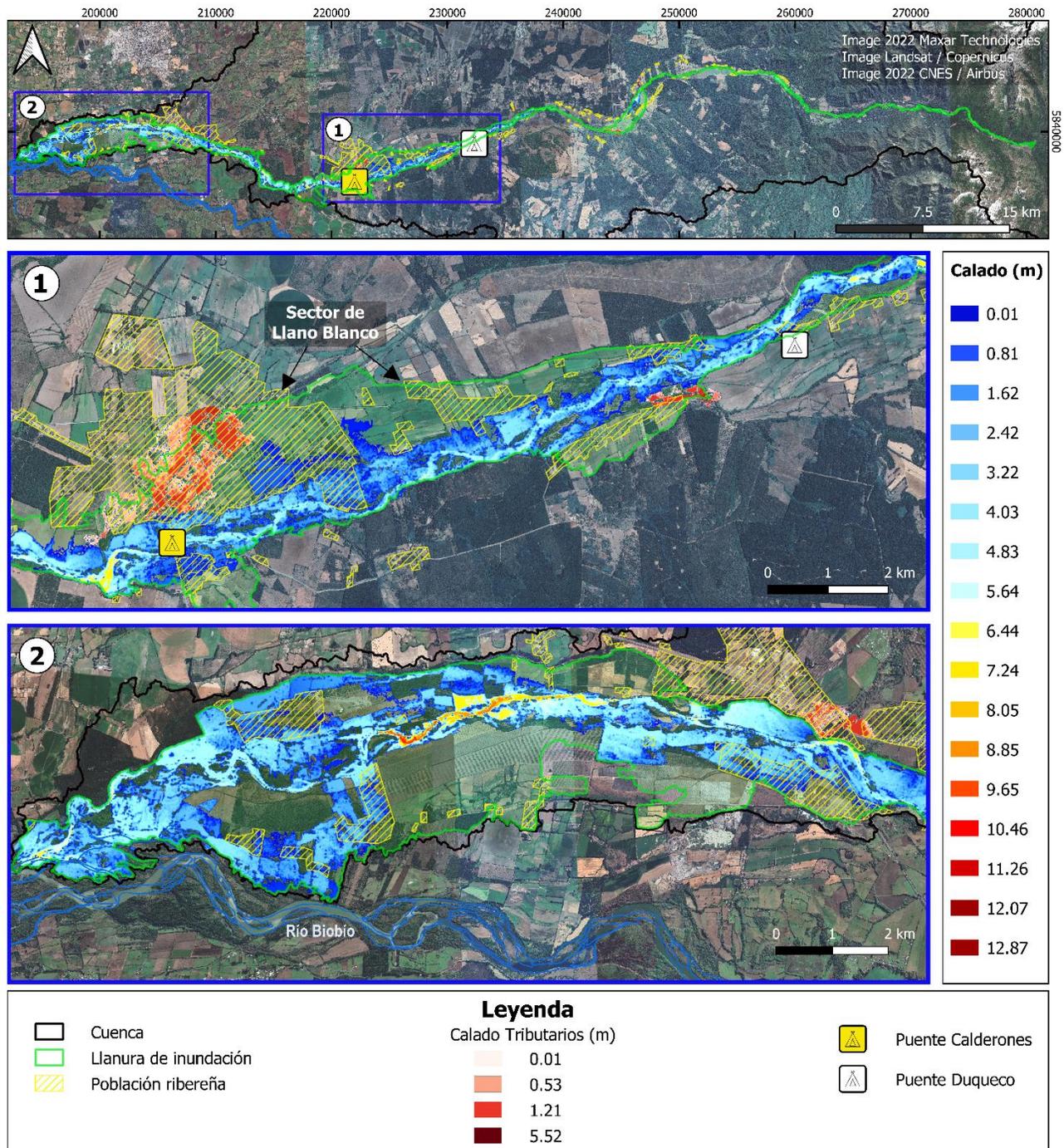


Figura 5.21 Área de inundación del río Duqueco para una crecida centenaria

5.3.2 Mapa de peligrosidad

La Figura 5.22 muestra el mapa de peligrosidad asociado a un evento de crecida con periodo de retorno de 100 años, de forma análoga a la figura anterior, se realiza un acercamiento en las dos zonas que presentan la mayor extensión de área afectada. Notar que durante el desarrollo de la crecida toda la zona de inundación presenta alta peligrosidad.

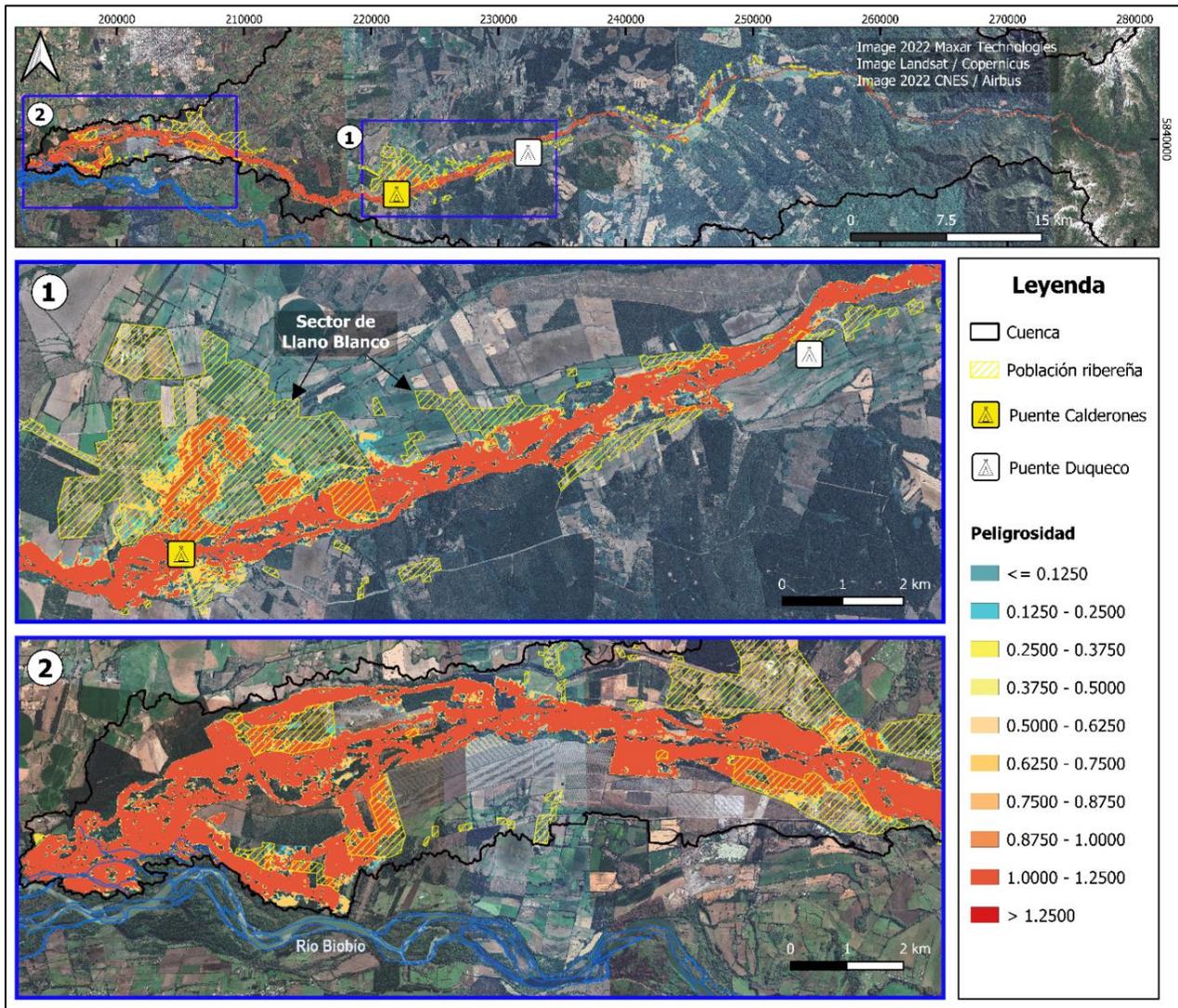


Figura 5.22 Mapa de peligrosidad ante una crecida centenaria en el río Duqueco

5.4. ANÁLISIS INTEGRAL HIDRÁULICO- GEOMORFOLÓGICO

A continuación, se describe un análisis integral del cauce, aplicando la clasificación de estilos fluviales y la identificación de las zonas con mayor desborde debido a una crecida extraordinaria.

La zona alta del cauce presenta pequeños desbordes del cauce para la crecida centenaria, limitados por los bordes de las laderas y terrazas que confinan al cauce. Esta zona se ha caracterizado geomorfológicamente con estilos fluviales del tipo monocanal de sinuosidad restringida (la sinuosidad no se puede desarrollar completamente producto de la estrecha llanura de inundación), con ausencia de unidades geomorfológicas en el lecho, cauce completamente confinado, y las mayores pendientes de la cuenca. La pendiente y ausencia de formaciones geomorfológicas como barras e islas identifican a la zona como erosiva. Luego de comparar estas características con el resto del cauce, se observó que todas las zonas con formas en planta tipo monocanal de sinuosidad restringida, tienen de características que no permiten el desborde del cauce, así como su desarrollo en zonas altamente confinadas. Si solo se observan los resultados de la modelación hidráulica, la ausencia de desbordamiento solo ocurre en los estilos fluviales del tipo monocanal de sinuosidad restringida completamente confinados.

Al analizar las zonas que presentan grandes áreas de inundación, se observa que la zona entre el puente Duqueco y puente Calderones, se caracteriza por los estilos fluviales RS_23 y RS_28, anteriormente descritos. La zona cercana a la confluencia con el río Biobío nuevamente se repite el RS_23, de forma en planta transicional, sin confinamiento o solo confinado parcialmente, con alta presencia de barras. La pendiente del cauce es mucho más baja que la zona alta y confinada, en que la presencia de unidades geomorfológicas identifica a la zona que facilita la sedimentación de las partículas en suspensión. A diferencia de la zona alta, la zona media y baja de la cuenca es mucho más diversa en estilos fluviales, si bien se puede notar un mayor número de estilos de transición también los hay multicanales y monocanal. Por lo tanto, no es posible establecer una conexión directa entre las zonas propensas a grandes desbordamientos del cauce con un estilo fluvial específico.

5.5. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentaron los resultados del análisis geomorfológico del río Duqueco con la clasificación del cauce en 42 estilos fluviales principales y 57 estilos complementarios, que permiten

conocer el carácter del río y su evolución aguas abajo con el cambio en los atributos que lo definen. Luego se presentaron los resultados de la modelación hidráulica bidimensional del cauce, que permite identificar las zonas más propensas a inundaciones y su correspondiente peligrosidad hidráulica. Finalmente, se relacionan ambos análisis para comprender el comportamiento del cauce y realizar conexiones entre las características morfológicas del cauce y su comportamiento hidráulico.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

La aplicación del marco de agregación y desagregación permite la obtención de los atributos hidromorfológicos del río Duqueco, a distintas escalas espaciales, de forma completamente semiautomatizada, gracias a las herramientas del conjunto *South Rivers Toolbox* y en menor medida de *Fluvial Corridor Toolbox*, y con criterios objetivos, lo que proporciona un mayor grado de seguridad, al encontrarse fuera el juicio experto.

La validación de los atributos se realiza, principalmente a partir de las imágenes satelitales (de resolución espacial de 3 metros), donde se comprueba de forma visual, que los resultados del ancho del canal, número de canales, sinuosidad, confinamiento y su causa, forma en planta y presencia de UG, son coherentes con lo que se observa en las imágenes. Por otro lado, el área de drenaje es validada con la coincidencia entre los aumentos bruscos del área de drenaje, y la llegada de los principales tributarios al río Duqueco. Finalmente, el ancho de la llanura de inundación depende de la buena delimitación del polígono de la llanura, siendo este calibrado y validado mediante un mapa de inundación, un mapa geológico, así como perfiles de elevación transversales al cauce.

Con la implementación de la primera etapa del marco *River Style* sobre el río Duqueco, se diferencian 42 estilos fluviales principales y 57 estilos complementarios. Su distribución espacial permite conocer el carácter del río Duqueco. En particular, la zona más alta presenta estilos fluviales completamente confinados, por el valle de la cordillera Andina y terrazas aluviales, monocanal, con lecho de cantos rodados y bloques. La zona media, mayoritariamente confinada y monocanal, con un cambio en el tipo de lecho a cantos rodados. Finalmente, la zona baja es más diversa en estilos, mayoritariamente no confinada, con alta presencia de unidades geomórficas que dan paso a las zonas multicanales y de transición.

Por otro lado, la construcción del modelo hidráulico bidimensional en el software Iber, permite simular el comportamiento del cauce ante una crecida centenaria, obteniendo las zonas de inundación y la peligrosidad asociada a cada una de ellas. Entre las zonas afectadas se encuentra la localidad de Llano Blanco, población ribereña, ubicada aguas abajo del puente Duqueco, y el área próxima a la confluencia con el río Bíobio, presentado ambas altas peligrosidades por efecto de la cota y velocidad del escurrimiento.

La principal dificultad de la modelación hidráulica se presenta en la gran extensión del cauce, con más de 100 km de longitud, por lo que obtener una topografía a nivel centimétrico requiere de un alto costo monetario y computacional. Por esta razón, la modelación se realiza sobre la topografía del modelo de elevación digital TanDEM de 10 metros, la cual no entrega el detalle exacto del fondo del lecho, ni de las estructuras pequeñas. Por ende, la modelación hidráulica no reproduce los fenómenos hidráulicos a pequeña escala. Aun así, el modelo entrega buenos resultados a escala cuenca, identificando las principales áreas con problemas de desbordamiento, comparando la peligrosidad hidráulica de las mismas zonas y la población ribereña afectada.

De ambos análisis es posible relacionar las zonas con estilos fluviales RS_11 y RS_12 cuya forma en planta es monocanal de sinuosidad restringida y cauce totalmente confinado, con las zonas de baja o nulo desbordamiento del cauce, donde se desprende que el confinamiento es inequívocamente una barrera que impide el desbordamiento del cauce, y al mismo tiempo impide el movimiento lateral del cauce, restringiendo el desarrollo de la sinuosidad, y la formación de UG. Por otro lado, las zonas con mayor desbordamiento del cauce, tiene mayoritariamente estilos fluviales transicionales, no confinados o parcialmente confinados, con amplia variedad de UG, pero debido a la diversidad de estilos fluviales que se pueden formar en las zonas propensas a desbordamientos, no es posible asociar solo un estilo fluvial, pero si características relevantes como el desconfinamiento del cauce, la menor pendiente y la presencia de unidades geomórficas.

Este estudio ha sido una línea base en el río Duqueco para el enfoque integrado geomorfológico e hidráulico. Su utilidad radica en problemas que requieren una plena comprensión del cauce, como la ubicación de estaciones de control fluviométrica, obras de mitigación contra las inundaciones, planificación territorial del borde ribereño, ubicación de extracciones de áridos, entre otras. El desafío a futuro es lograr la completa automatización del análisis geomorfológico que permita el constante monitoreo de los cambios en el cauce (migraciones, nuevas formaciones o pérdida de unidades geomórficas), que se complementa con modelaciones del cauce a escala cuenca y localizadas en áreas de interés, para predecir de forma conjunta el carácter y comportamiento del cauce ante factores naturales y antrópicos.

REFERENCIAS

- Alber, A., y Piégay, H. (2011). Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 125(3), 343-360.
- Álvarez, M., Puertas, J., Peña, E., & Bermúdez, M. (2017). Two-dimensional dam-break flood analysis in data-scarce regions: The case study of Chipembe dam, Mozambique. *Water*, 9(6), 432.
- Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., & Thieken, A. H. (2009). Flood risk analyses—how detailed do we need to be?. *Natural hazards*, 49, 79-98.
- Asociación de Municipalidades de la Región del Biobío. (2015). Planificación Estratégica Participativa en Reducción de Riesgos de Desastres en las comunas pertenecientes a la Comisión de Municipios Ribereños del Río Biobío de la Asociación de Municipalidades de la Región del Biobío.
- Barnes, H. H. (1967). *Roughness characteristics of natural channels* (No. 1849). US Government Printing Office.
- BHUIYAN, M. J. A. N., y DUTTA, D. (2012). Analysis of flood vulnerability and assessment of the impacts in coastal zones of Bangladesh due to potential sea-level rise. *Natural Hazards*, vol. 61, no. 2, p. 729-743. DOI 10.1007/s11069-011-0059-3.
- Bizzi, S., Demarchi, L., Grabowski, R. C., Weissteiner, C. J., y Van de Bund, W. (2016). The use of remote sensing to characterise hydromorphological properties of European rivers. *Aquatic sciences*, 78(1), 57-70.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 30(1), 1-10.

- Bodoque, J. M., Amérgo, M., Díez-Herrero, A., García, J. A., Cortés, B., Ballesteros-Cánovas, J. A., & Olcina, J. (2016). Improvement of resilience of urban areas by integrating social perception in flash-flood risk management. *Journal of Hydrology*, *541*, 665-676.
- Bonasia, R., Areu-Rangel, O. S., Tolentino, D., Mendoza-Sanchez, I., González-Cao, J., & Klapp, J. (2018). Flooding hazard assessment at Tulancingo (Hidalgo, Mexico). *Journal of Flood Risk Management*, *11*, S1116-S1124.
- Brierley, G. J., y Fryirs, K. (2000). River styles, a geomorphic approach to catchment characterization: Implications for river rehabilitation in Bega catchment, New South Wales, Australia. *Environmental Management*, *25*(6), 661-679.
- Brierley, G., y Fryirs, K. (2005). Geomorphology and river management: applications of the river styles framework. John Wiley & Sons.
- Brierley, G., y Fryirs, K. (2009). Don't fight the site: three geomorphic considerations in catchment-scale river rehabilitation planning. *Environmental Management*, *43*(6), 1201-1218.
- Brierley, G., Fryirs, K., Outhet, D., y Massey, C. (2002). Application of the River Styles framework as a basis for river management in New South Wales, Australia. *Applied Geography*, *22*(1), 91-122.
- Brookes, A., Boon, P. J., Calow, P., y Petts, G. E. (1992). Recovery and restoration of some engineered British river channels. In *Unknown Host Publication Title*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
- Carbonneau, P., y Piégay, H. (Eds.). (2012). *Fluvial remote sensing for science and management*. John Wiley & Sons.
- Carrasco, J., Casassa, G., y Quintana, J. (2005). Changes of the 0° C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences*, *50*(6), 933-948.

- Castillo, C., Pérez, R., & Gómez, J. A. (2014). A conceptual model of check dam hydraulics for gully control: efficiency, optimal spacing and relation with step-pools. *Hydrology and Earth System Sciences, 18*(5), 1705-1721.
- Castro, M., Hidalgo, X., & Poveda, R. (2003). Sobre la modelación hidráulica en obras de saneamiento básico. *Departamento deficiencias del agua-Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador*.
- Cea, L., & Bladé, E. (2008). Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable. *Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial, CEDEX–Ministerio de Fomento*.
- Cea, L., Bladé i Castellet, E., Sanz Ramos, M., Bermúdez Pita, M., & Mateos Alonso, Á. (2019). Iber applications basic guide: two-dimensional modelling of free surface shallow water flows.
- Complejo Hidroeléctrico Duqueco*. (s. f.). Recuperado 1 de enero de 2023, de <https://www.duqueco.cl/complejo-hidroelectrico-duqueco>.
- CONESA, C., & PEREZ, P. (2014). Alteraciones geomorfológicas recientes en los sistemas fluviales mediterráneos de la Península Ibérica: Síntomas y problemas de incisión en los cauces. *Revista de Geografía Norte Grande*, N° 59, p. 25-44.
- Dirección General de Aguas. (1987). Balance hídrico de Chile. *Santiago, Chile*.
- Duarte, C. M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo Buendía, M., ... y Valladares, F. (2006). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. CSIC. Consejo superior de investigaciones científicas.
- Fe, J. (2005). Aplicación del método de volúmenes finitos a la resolución numérica de las ecuaciones de aguas someras con incorporación de los esfuerzos debidos a las turbulencias (Doctoral dissertation, Universidade da Coruña).

- Fryirs, K. A. (2015). Developing and using geomorphic condition assessments for river rehabilitation planning, implementation and monitoring. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), 649-667.
- Fryirs, K. A., y Brierley, G. J. (2016). Assessing the geomorphic recovery potential of rivers: forecasting future trajectories of adjustment for use in management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(5), 727-748.
- Fryirs, K. A., y 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.
- 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.
- González, P. (1987). Perspectiva Geográfica del Riesgo de Inundación en la ciudad de Talca. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 30, 63-79.
- Graf, W., Leitner, P., Hanetseder, I., Ittner, L. D., Dossi, F., & Hauer, C. (2016). Ecological degradation of a meandering river by local channelization effects: a case study in an Austrian lowland river. *Hydrobiologia*, 772, 145-160.
- Gregory, K. J., Benito, G., y Downs, P. W. (2008). Applying fluvial geomorphology to river channel management: Background for progress towards a palaeohydrology protocol. *Geomorphology*, 98(1-2), 153-172.
- Hillman, M., y Brierley, G. (2005). A critical review of catchment-scale stream rehabilitation programmes. *Progress in Physical Geography*, 29(1), 50-76.

- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2021). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp.
- 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.'
- Kleinhans, M. G., y van den Berg, J. H. (2011). River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and a physics-based method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(6), 721-738.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., ... & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28.
- 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.
- Nardini, A., y Brierley, G. (2021). Automatic river planform identification by a logical-heuristic algorithm. *Geomorphology*, 375, 107558.
- Nardini, A., Yépez, S., y Bejarano, M. D. (2020a). A Computer Aided Approach for River Styles— Inspired Characterization of Large Basins: A Structured Procedure and Support Tools. *Geosciences*, 10(6), 231.
- Nardini, A., Yépez, S., Mazzorana, B., Ulloa, H., Bejarano, M. D., & Laraque, A. (2020b). A systematic, automated approach for river segmentation tested on the Magdalena River (Colombia) and the Baker River (Chile). *Water*, 12(10), 2827.

- Nardini, A., Yépez, S., Zuniga, L., Gualtieri, C., y Bejarano, M. D. (2020c). A Computer Aided Approach for River Styles—Inspired Characterization of Large Basins: The Magdalena River (Colombia). *Water*, 12(4), 1147.
- Newson, M. D., Clark, M. J., Sear, D. A., y Brookes, A. (1998). The geomorphological basis for classifying rivers. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 8(4), 415-430.
- Orr, H. G., Large, A. R. G., Newson, M. D., y Walsh, C. L. (2008). A predictive typology for characterising hydromorphology. *Geomorphology*, 100(1-2), 32-40.
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia. *Información tecnológica*, 29(4), 143-156.
- Phillips, J. D. (2008). Geomorphic controls and transition zones in the lower Sabine River. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(14), 2424-2437.
- Piégay, H., Arnaud, F., Belletti, B., Bertrand, M., Bizzi, S., Carbonneau, P., ... y Slater, L. (2020). Remotely sensed rivers in the Anthropocene: State of the art and prospects. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(1), 157-188.
- Quintanilla, V. (1995). Riesgos que actúan sobre el medio ambiente de la ciudad de Santiago. In *Anales de geografía de la Universidad Complutense* (No. 15, pp. 559-569). Servicio de Publicaciones.
- Rojas, O. (2015). Cambios Ambientales y Dinámica de Inundaciones Fluviales en una Cuenca Costera del Centro Sur de Chile (Tesis Doctoral), Universidad de Concepción, Concepción.
- ROJAS, O., y MARTÍNEZ, C. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*, p. 83-116.

- Roux, C., Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L., y Piégay, H. (2015). "FluvialCorridor": A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology*, 242, 29-37.
- Sanz Ramos, M., Cea Gómez, L., Bladé i Castellet, E., Lopez Gomez, D., Sañudo Costoya, E., Corestein Poupeau, G., ... & Aragón Hernández, J. L. (2022). Iber v3: manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones.
- Schmitt, L., Maire, G., Nobelis, P., y Humbert, J. (2007). Quantitative morphodynamic typology of rivers: a methodological study based on the French Upper Rhine basin. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(11), 1726-1746.
- Sear, D. A. (1994). River restoration and geomorphology. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 4(2), 169-177.
- Sedano, R. (2012). Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. *Universitat Politècnica de València*
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2000). Mapa Geológico de Chile. Escala 1:1.000.000.
- STOKER, J. J. (1992). Water Waves. The mathematical theory with applications. WILEY CLASSICS LIBRARY EDITIONS.
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S. J. E. M. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modelling & software*, 90, 201-216.
- Trenberth, K.E. (2011). Changes in Precipitation with Climate Change, *Climate Research*, 47(1-2), 123-138
- Urrutia de Hazbún, R., y Lanza, C. (1993). *Catástrofes en Chile 1541-1992* (p. 440). Santiago:La Noria.

Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.

Yan, K., Di Baldassarre, G., Solomatine, D. P., & Schumann, G. J. P. (2015). A review of low-cost space-borne data for flood modelling: topography, flood extent and water level. *Hydrological processes*, 29(15), 3368-3387.

ANEXO 3.1: ESQUEMAS DE TRABAJO DE MODELOS CREADOS EN QGIS

Las Figura A3.1.1 muestra el esquema de trabajo de la herramienta “*mono-multi channel*”, la Figura A3.1.2 muestra el esquema de trabajo de la herramienta “*Local Sinuosity*”, y la Figura A3.1.3 muestra el esquema de trabajo de la herramienta “*Local Confinement*”. Notar que las casillas naranjas representan los datos de entrada, las blancas las herramientas de QGIS del modelo y las verdes el resultado final.

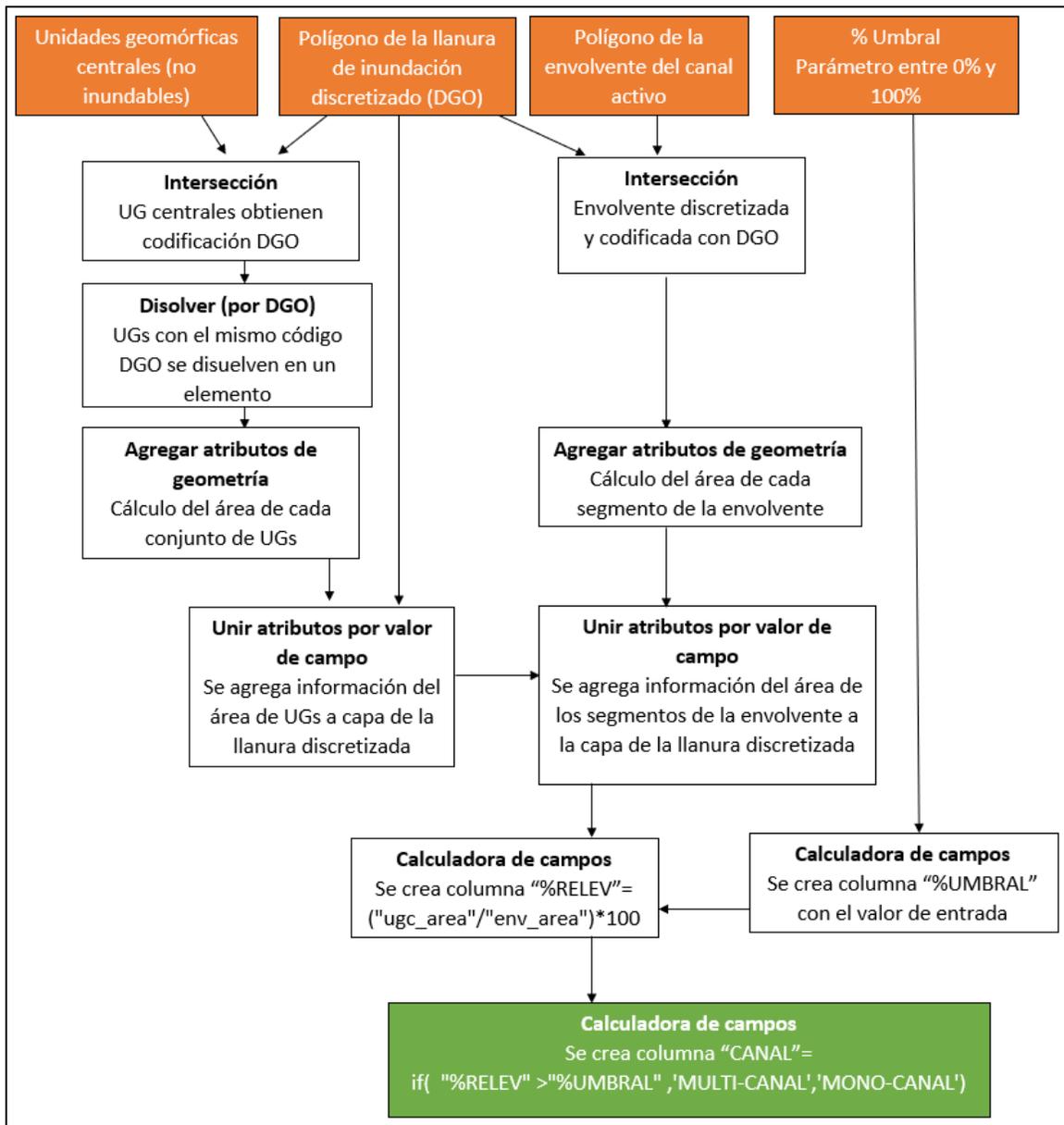


Figura A3.1.1 Esquema de trabajo de la herramienta “*mono-multi channel*”

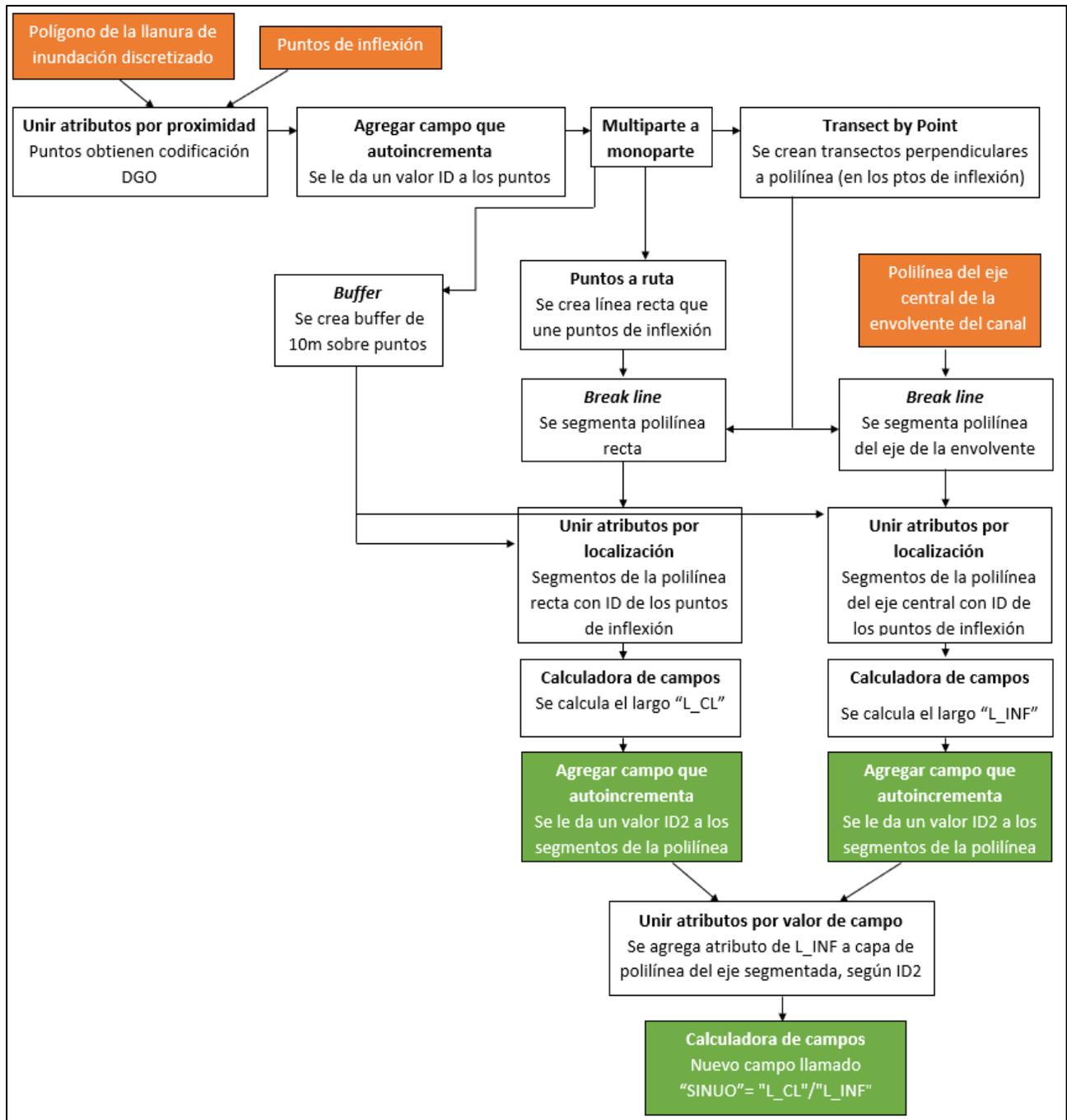


Figura A3.1.2 Esquema de trabajo de la herramienta “Local Sinuosity”

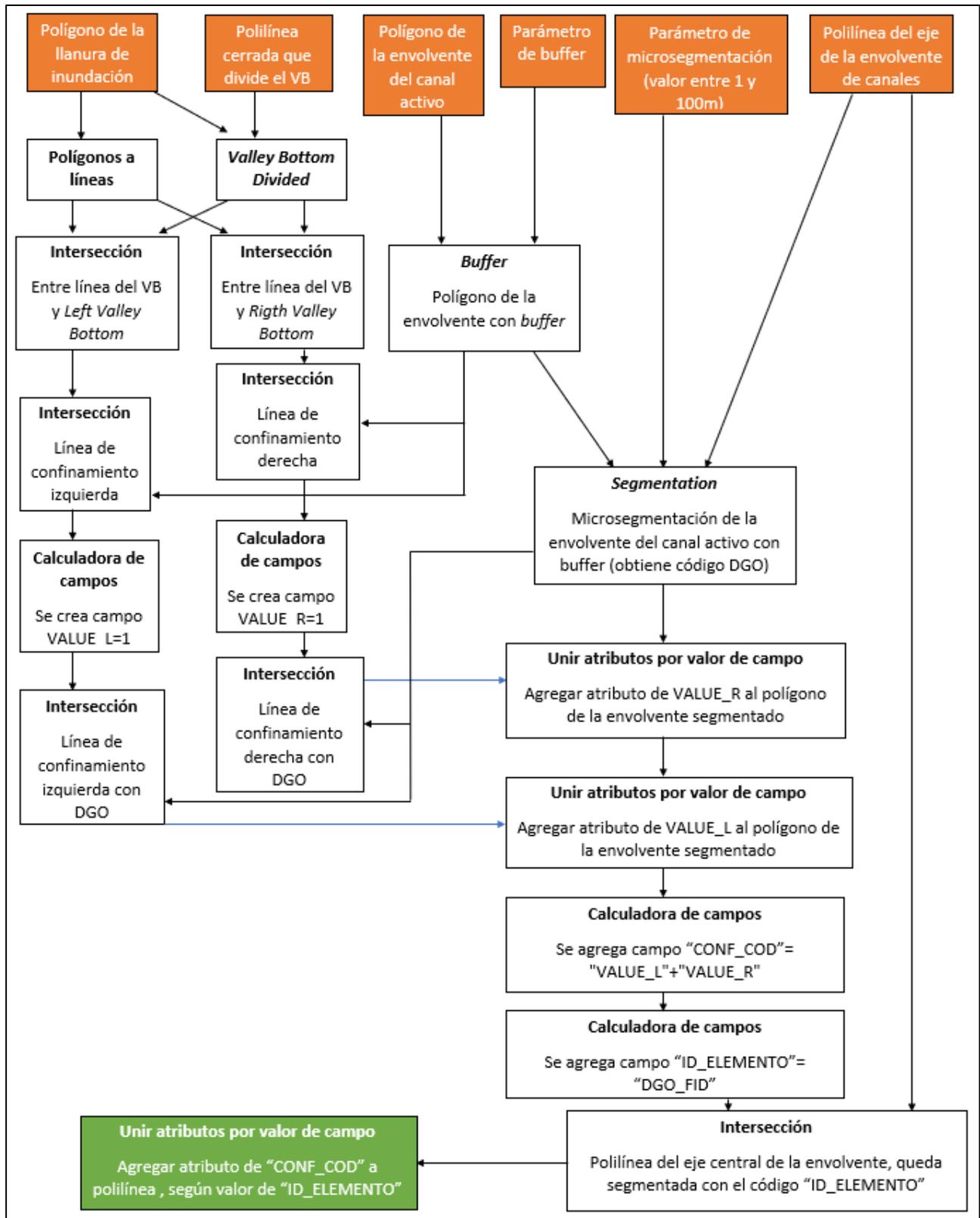


Figura A3.1.3 Esquema de trabajo de la herramienta “Local Confinement”

ANEXO 4.1: RELACIÓN EMPÍRICA ENTRE CAUDAL MÁXIMO ANUAL Y ÁREA DE DRENAJE PARA EL RÍO DUQUECO

Tabla A4.1.1 Estaciones fluviométricas seleccionadas para relación entre caudal y área de drenaje

Estación Fluviométrica	Área (km ²)	Caudal promedio máx. anual (m ³ /s)
Río Itata En Cholguan	859,58	452,31
Río Itata En Trilaleo	1147,70	510,76
Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	466,67	156,95
Río Pangué En Captación	135,55	68,49
Río Lirquen En Cerro El Padre	103,36	69,10
Río Duqueco En Cerrillos	1338,93	620,94
Río Duqueco En Villucura	817,04	422,22
Río Mulchen En Mulchen	428,20	122,46
Río Bureo En Mulchen	540,77	322,79
Río Renaico En Longitudinal	688,06	369,98
Río Mininco En Longitudinal	440,42	125,49
Río Malleco En Collipulli	415,09	303,18
Río Rucue En Camino A Antuco	210,89	174,44
Río Traiguén En Victoria	93,84	33,94
Río Quino En Longitudinal	276,79	122,02
Río Blanco En Curacautín	170,91	47,77

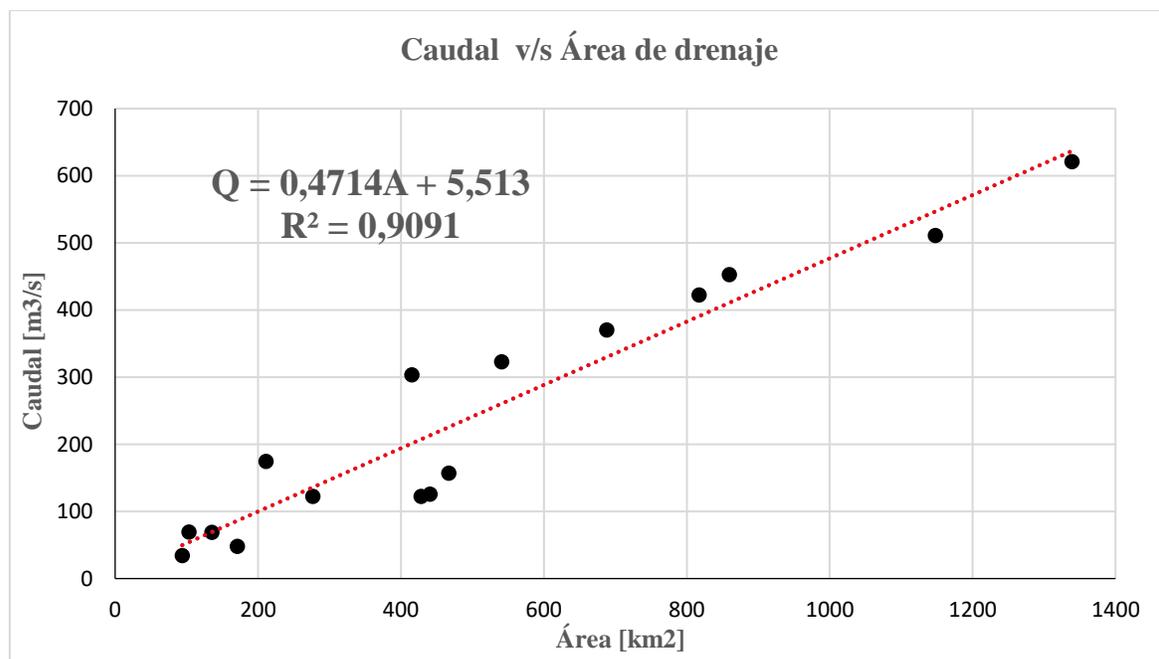


Figura A4.1.1 Gráfico caudal promedio máximo anual versus área de drenaje

ANEXO 4.2: MATRIZ CON RECOPIACIÓN DE ATRIBUTOS A ESCALA DE TRAMO Y CLASIFICACIÓN DEL ESTILO FLUVIAL

Tabla A4.2.1 Matriz con atributos a escala de tramo y clasificación del estilo fluvial

Tramo	RS	RS_comp	Confinamiento	Causa Conf.	Forma en Planta	Material del lecho	Barras	UGF	Islas
1	11	11_1	Confinado	Valle	Monocanal sinuosidad restringida	bloques y canto rodado	1	0	1
2	18	18_1	Parcialmente Confinado	Valle	Monocanal baja sinuosidad	bloques y canto rodado	0	0	0
3	11	11_1	Confinado	Valle	Monocanal sinuosidad restringida	bloques y canto rodado	0	0	0
4	3	3_1	Confinado	Valle	Monocanal confinado	bloques y canto rodado	0	0	0
5	3	3_1	Confinado	Valle	Monocanal confinado	bloques y canto rodado	0	0	0
6	3	3_1	Confinado	Valle	Monocanal confinado	bloques y canto rodado	0	0	0
7	12	12_1	Confinado	geomorfa	Monocanal sinuosidad restringida	bloques y canto rodado	0	0	0
8	37	37_1	Confinado	geomorfa	Transicional swallowing	bloques y canto rodado	1	0	0
9	12	12_1	Confinado	geomorfa	Monocanal sinuosidad restringida	bloques y canto rodado	0	0	0
10	19	19_1	Parcialmente Confinado	geomorfa	Monocanal baja sinuosidad	bloques y canto rodado	0	0	0
11	11	11_1	Confinado	Valle	Monocanal sinuosidad restringida	bloques y canto rodado	0	0	0
12	1	1_1	Confinado	geomorfa	Monocanal confinado	bloques y canto rodado	0	0	0
13	1	1_1	Confinado	geomorfa	Monocanal confinado	bloques y canto rodado	0	0	0
14	12	12_1	Confinado	geomorfa	Monocanal sinuosidad restringida	bloques y canto rodado	0	0	0
15	35	35_1	Confinado	geomorfa	Transicional wandering	bloques y canto rodado	1	0	1
16	1	1_1	Confinado	geomorfa	Monocanal confinado	bloques y canto rodado	0	0	0
17	13	13_1	Parcialmente Confinado	geomorfa	Monocanal sinuosidad restringida	bloques y canto rodado	0	0	0
18	25	25_1	No confinado	-	Transicional wandering	bloques y canto rodado	1	1	0
19	12	12_1	Confinado	geomorfa	Monocanal sinuosidad restringida	bloques y canto rodado	0	0	0
20	4	4_1	Confinado	geomorfa	Monocanal confinado	canto rodado	0	0	0
21	28	28_1	Parcialmente Confinado	Valle	Transicional wandering	canto rodado	1	0	1
22	14	14_1	Parcialmente Confinado	Valle	Monocanal baja sinuosidad	canto rodado	1	0	0
23	23	23_1	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	0	1
24	20	20_1	Parcialmente Confinado	geomorfa	Monocanal recto	canto rodado	0	0	0
25	29	29_1	Parcialmente Confinado	geomorfa	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
26	10	10_1	Confinado	geomorfa	Monocanal sinuosidad restringida	canto rodado	1	0	0
27	34	34_1	Confinado	geomorfa	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
28	10	10_2	Confinado	geomorfa	Monocanal sinuosidad restringida	canto rodado	0	0	0
29	27	27_1	Confinado	Valle	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
30	2	2_1	Confinado	Valle	Monocanal confinado	canto rodado	0	0	0
31	42	42_1	Parcialmente Confinado	geomorfa	Multicanal Isla trenzado	canto rodado	0	0	1
32	29	29_1	Parcialmente Confinado	geomorfa	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
33	30	30_1	Parcialmente Confinado	geomorfa	Transicional barras alternas	canto rodado	1	1	0
34	29	29_2	Parcialmente Confinado	geomorfa	Transicional wandering	canto rodado	1	0	1
35	15	15_1	Parcialmente Confinado	geomorfa	Monocanal baja sinuosidad	canto rodado	0	0	0
36	23	23_1	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
37	26	26_1	Parcialmente Confinado	Valle	Transicional barras alternas	canto rodado	1	0	0
38	23	23_1	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
39	31	31_1	Parcialmente Confinado	geomorfa	Transicional swallowing	canto rodado	1	0	0
40	41	41_1	No confinado	-	Multicanal Anabranching	canto rodado	0	0	1
41	7	7_1	No confinado	-	Monocanal baja sinuosidad	canto rodado	0	0	0
42	28	28_1	Parcialmente Confinado	Valle	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
43	38	38_1	Confinado	Valle	Multicanal Anabranching	canto rodado	0	0	1
44	28	28_1	Parcialmente Confinado	Valle	Transicional wandering	canto rodado	1	1	1
45	41	41_1	No confinado	-	Multicanal Anabranching	canto rodado	1	0	1
46	28	28_1	Parcialmente Confinado	Valle	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0

Tabla A.4.2.1 Matriz con atributos a escala de tramo y clasificación del estilo fluvial (continuación)

Tramo	RS	RS_comp	Confinamiento	Causa Conf.	Forma en Planta	Material del lecho	Barras	UGF	Islas
47	41	41_1	No confinado	-	Multicanal Anabranching	canto rodado	1	0	1
48	15	15_1	Parcialmente Confinado	geoforma	Monocanal sinuoso	canto rodado	0	0	0
49	29	29_3	Parcialmente Confinado	geoforma	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
50	16	16_1	Parcialmente Confinado	Valle	Monocanal sinuoso	canto rodado	0	0	0
51	27	27_2	Confinado	Valle	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
52	26	26_1	Parcialmente Confinado	Valle	Transicional barras alternas	canto rodado	1	0	0
53	2	2_1	Confinado	Valle	Monocanal confinado	canto rodado	0	0	0
54	2	2_1	Confinado	Valle	Monocanal confinado	canto rodado	0	0	0
55	2	2_1	Confinado	Valle	Monocanal confinado	canto rodado	1	0	0
56	39	39_1	Parcialmente Confinado	Valle	Multicanal Anabranching	canto rodado	1	0	1
57	9	9_1	No confinado	-	Monocanal meandrónico	canto rodado	0	0	0
58	28	28_2	Parcialmente Confinado	Valle	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
59	17	17_1	Parcialmente Confinado	geoforma	Monocanal sinuoso	canto rodado	1	0	1
60	7	7_1	No confinado	-	Monocanal baja sinuosidad	canto rodado	0	0	0
61	6	6_1	No confinado	-	Monocanal recto	canto rodado	1	0	0
62	32	32_1	Parcialmente Confinado	Valle	Transicional swallowing	canto rodado	0	0	1
63	14	14_1	Parcialmente Confinado	Valle	Monocanal baja sinuosidad	canto rodado	0	0	0
64	22	22_1	No confinado	-	Transicional swallowing	canto rodado	1	0	0
65	6	6_1	No confinado	-	Monocanal recto	canto rodado	0	0	0
66	7	7_1	No confinado	-	Monocanal baja sinuosidad	canto rodado	0	0	0
67	23	23_1	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	0	1
68	5	5_1	No confinado	-	Monocanal sinuoso	canto rodado	0	0	0
69	2	2_2	Confinado	Valle	Monocanal confinado	canto rodado	0	0	0
70	33	33_1	Parcialmente Confinado	Infraestructura	Transicional wandering	canto rodado	0	0	1
71	36	36_1	Confinado	Infraestructura	Transicional barras alternas	canto rodado	1	0	0
72	6	6_1	No confinado	-	Monocanal recto	canto rodado	0	0	0
73	23	23_1	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	1	1
74	6	6_1	No confinado	-	Monocanal recto	canto rodado	0	0	0
75	23	23_1	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
76	24	24_1	No confinado	-	Transicional barras alternas	canto rodado	1	0	0
77	23	23_2	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	1	0
78	6	6_1	No confinado	-	Monocanal recto	canto rodado	0	0	0
79	23	23_2	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	1	0
80	7	7_1	No confinado	-	Monocanal baja sinuosidad	canto rodado	0	0	0
81	40	40_1	No confinado	-	Multicanal Isla trezado	canto rodado	1	0	1
82	22	22_2	No confinado	-	Transicional swallowing	canto rodado	0	0	1
83	5	5_2	No confinado	-	Monocanal sinuoso	canto rodado	0	1	0
84	23	23_2	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	1	0
85	6	6_2	No confinado	-	Monocanal recto	canto rodado	0	1	0
86	23	23_3	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
87	41	41_2	No confinado	-	Multicanal Anabranching	canto rodado	1	0	1
88	40	40_1	No confinado	-	Multicanal Isla trezado	canto rodado	0	0	1
89	28	28_3	Parcialmente Confinado	Valle	Transicional wandering	canto rodado	1	1	0
90	21	21_1	Parcialmente Confinado	Valle	Monocanal meandrónico	canto rodado	0	0	0
91	23	23_4	No confinado	-	Transicional wandering	canto rodado	1	0	0
92	8	8_1	No confinado	-	Monocanal sinuosidad restringida	canto rodado	0	0	0