

Análisis de la geodiversidad de la cuenca del río Biobío: Bases para la definición de tramos de alto valor de conservación.

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniero Ambiental

Ignacio Andrés Espinoza Soto

Profesora Guía: Dra. Evelyn Habit Conejeros
Universidad de Concepción

Concepción, Chile 2025



“ANÁLISIS DE LA GEODIVERSIDAD DE LA CUENCA DEL RÍO BIOBÍO: BASES PARA LA DEFINICIÓN DE TRAMOS DE ALTO VALOR DE CONSERVACIÓN”

Profesor Guía: Dra. Evelyn Habit Conejeros

Profesor Guía: Dr. Gustavo Díaz Garrido

Profesor Comisión: Dr. Octavio Rojas Vilches

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad: (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, abril 2025



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Pregunta de investigación.....	3
1.2. Objetivo general.	3
1.3. Objetivos específicos.....	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1. Ciencia de ríos.....	4
2.2. Marcos conceptuales para el estudio de ríos.....	5
2.2.1. Ríos como sistemas jerárquicos.	5
2.2.2. Enfoque hidrogeomorfológico.	7
2.3. Geomorfología fluvial.....	8
2.4. Geodiversidad.	9
2.5. Geodiversidad en los ecosistemas de ríos.....	12
2.6. Geomorfología del Río Biobío.....	13
2.6.1. Usos del suelo y agua que entrega el Río Biobío.....	14
3. METODOLOGÍA	15
3.1. Área de estudio y base de datos.....	15
3.2. Determinación de grupos geomorfológicos homogéneos.....	18
3.2.1. Etapa 1: Matriz de datos de entrada.....	18
3.2.2. Etapa 2: Agrupamiento.....	18
3.2.3. Etapa 3: Caracterización de grupos.	19
3.3. Análisis de composición de grupos geomorfológicos.....	20
3.4. Análisis de geodiversidad a escala local, regional y tasa de recambio.	23
3.5. Identificación de secciones más geodiversas dentro de la cuenca.	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1. Conformación de grupos geomorfológicos.....	25
4.2. Asignación de nombres a los grupos geomorfológicos identificados.....	30
4.3. Caracterización de grupos geomorfológicos.	31
4.4. Distribución de los grupos geomorfológicos en la red hídrica.	42
4.5. Caracterización global de los grupos geomorfológicos.	43
4.6. Geodiversidad en la red hídrica.	54
4.6.1. Geodiversidad alfa.....	57



4.6.2.	Geodiversidad beta.....	58
4.6.3.	Geodiversidad gamma.....	60
4.7.	Relación entre los Índices de Geodiversidad y la longitud de los ríos.....	61
4.8.	Distribución de los valores de índice de geodiversidad alfa, beta y gamma.....	66
4.9.	Categorización de ríos de acuerdo con índices de geodiversidad alfa y beta. ..	68
4.10.	Distribución espacial de los ríos de acuerdo con su categorización de geodiversidad alta, media y baja.	70
5.	CONCLUSIÓN.....	74
6.	REFERENCIAS.....	76
7.	ANEXOS.....	81



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación cartográfica de los 52 ríos presentes en la red hídrica del Biobío que contienen información a partir de los 998 segmentos fluviales.....	17
Figura 2: Diagrama de flujo que representa las diferentes actividades a realizar en las diferentes etapas.....	20
Figura 3: Heatmap de correlaciones entre las 16 variables geomorfológicas analizadas.	25
Figura 4: Dendrograma obtenido a partir del análisis de similitud de Gower para los 998 segmentos.	27
Figura 5: Curva de similitud entre los segmentos y el número de grupos en el dendrograma. .	28
Figura 6: Diagrama de cajas sobre variable elevación para los 11 grupos geomorfológicos.....	30
Figura 7: Diagrama de cajas sobre variable precipitación anual para los 11 grupos geomorfológicos.	31
Figura 8: Diagrama de cajas sobre variable pendiente aguas abajo para los 11 grupos geomorfológicos.....	33
Figura 9: Diagrama de cajas sobre variable ancho de valle para los 11 grupos geomorfológicos.	34
Figura 10: Diagrama de cajas sobre variable tasa de valle para los 11 grupos geomorfológicos.	35
Figura 11: Diagrama de cajas sobre variable ancho de canal para los 11 grupos geomorfológicos.....	35
Figura 12: Diagrama de cajas sobre variable sinuosidad de cauce para los 11 grupos geomorfológicos.....	37
Figura 13: Diagrama de cajas sobre variable sinuosidad de banda de canal para los 11 grupos geomorfológicos.....	38
Figura 14: Diagrama de cajas sobre variable longitud de banda de canal para los 11 grupos geomorfológicos.....	39
Figura 15: Diagrama de cajas sobre variable pendiente derecha para los 11 grupos geomorfológicos.....	40
Figura 16: Diagrama de cajas sobre variable pendiente izquierda para los 11 grupos geomorfológicos.....	41
Figura 17: Cartografía correspondiente a la distribución espacial de los 11 grupos geomorfológicos en la red hídrica del Biobío.....	42
Figura 18: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico A-RAP en la red hídrica del río Biobío.	43
Figura 19: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico B-RC en la red hídrica del río Biobío.	44
Figura 20: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico C-RPC en la red hídrica del río Biobío.	45



Figura 21: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico D-RM en la red hídrica del río Biobío.	46
Figura 22: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico C-RSM en la red hídrica del río Biobío.	47
Figura 23: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico C-RDI en la red hídrica del río Biobío.	48
Figura 24: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico A-RAE en la red hídrica del río Biobío.	49
Figura 25: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico C-RCU en la red hídrica del río Biobío.	50
Figura 26: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico E-RVA en la red hídrica del río Biobío.	51
Figura 27: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico E-RLC en la red hídrica del río Biobío.	52
Figura 28: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico F-RBE en la red hídrica del río Biobío.	53
Figura 29: Cartografía correspondiente al reordenamiento de ríos presentes en la red hídrica, obteniendo un número definitivo de 33 ríos.	55
Figura 30: Representación gráfica de los valores de geodiversidad alfa obtenidos para los 33 ríos en orden ascendente.	58
Figura 31: Representación gráfica de los valores de geodiversidad beta obtenidos para los 33 ríos en orden ascendente.	59
Figura 32: Representación gráfica de los valores de geodiversidad gamma obtenidos para los 33 ríos en orden ascendente.	61
Figura 33: Representación gráfica de los valores de geodiversidad alfa y la longitud de cada uno de los ríos estudiados.	63
Figura 34: Representación gráfica de los valores de geodiversidad beta y la longitud de cada uno de los ríos estudiados.	64
Figura 35: Representación gráfica de los valores de geodiversidad gamma y la longitud de cada uno de los ríos estudiados.	65
Figura 36: Diagramas de cajas sobre la distribución de los valores de índices de geodiversidad Alfa, Beta y Gamma.	67
Figura 37: Categorización de geodiversidad alfa y beta, para los 33 ríos de la red hídrica.	70
Figura 38: Cartografía correspondiente a la distribución espacial de la geodiversidad alfa, de acuerdo con las categorías alta, media y baja para los 33 ríos de la red hídrica.	70
Figura 39: Cartografía correspondiente a la distribución espacial de la geodiversidad beta, de acuerdo con las categorías alta, media y baja para los 33 ríos de la red hídrica.	73



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estudios que relacionan la influencia de elementos de la geodiversidad en el mantenimiento de la biodiversidad.	11
Tabla 2: Variables geomorfológicas que caracterizan a los 998 segmentos fluviales que están medidos en escalas de cuenca, valle y canal.	16
Tabla 3: Variables geomorfológicas correspondientes a geología y confinamiento con sus respectivos valores asignados.	17
Tabla 4: Número de segmentos representados en cada uno de los grupos inicialmente identificados.	29
Tabla 5: Número de segmentos representados para los grupos definitivos.	29
Tabla 6: Nombres asignados para los grupos geomorfológicos definitivos a partir de sus características principales y clasificación de Rosgen.	30
Tabla 7: Representación tabulada de los 33 ríos junto a su longitud (Km) a los cuales se les aplicó índices de geodiversidad.	56

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I: Análisis de Similitud Porcentual (SIMPER) realizados para cada uno de los grupos geomorfológicos definidos y para integrar a las descripciones de cada uno de ellos.	81
Tabla Anexo II: Cursos de agua que tuvieron que unirse a sus cauces principales y recibir el nombre de estos mismos debido a que tenían una menor longitud dentro de la red hídrica.	83
Tabla Anexo III: Correspondiente a los valores obtenidos de índices de geodiversidad alfa, beta y gamma para los 33 ríos.	84
Tabla Anexo IV: Distribución de datos en forma resumida para los índices de geodiversidad alfa, beta y gamma.	85



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis profesores guías, quienes durante todo este proceso me apoyaron desde el primer día y confiaron en mis capacidades. Me entregaron las herramientas necesarias para poder abordar el tema de esta investigación de la forma más ligera posible. A la profesora Evelyn agradecer por su paciencia y por tener siempre la bondad de compartir sus conocimientos, material y su tiempo durante largas reuniones y a Gustavo, quien fue un apoyo fundamental durante todo el proceso de mis resultados, entregándome tips y consejos que me incentivaban a avanzar de forma rápida en esta habilitación profesional.

A mis amigas y amigos con los que finalizo esta etapa, Monse, Flo, Camilo y Rodri con quienes tuve la oportunidad de formar una linda amistad y de compartir este proceso, agradecido por siempre hacernos compañía y darnos energía a partir de palabras de aliento.

Agradecer a mis padrinos, Walter y Marcela quienes durante mi vida siempre han estado presentes y se han preocupado de apoyarme en mis decisiones, entregándome las herramientas necesarias para poder cumplir mis metas.

También agradecer a mi perrito Pequeño, quien a pesar de no vernos todos los días siempre que viajaba a Los Ángeles me entregaba de su cariño y alegría con sus saltos gigantes, y me daba la oportunidad de distraerme cada vez que salíamos a pasear.

Finalmente agradecer a mi madre, Sandra quien toda la vida me ha acompañado y me ha apoyado a lograr las metas que me propongo, quien con su amor me ha enseñado a siempre mirar la vida desde otra perspectiva y a nunca rendirme en los momentos difíciles. También agradecer a su pareja, Eric quien durante todos estos años de universidad siempre ha estado dispuesto ayudarme y acompañarme durante periodos de mudanza y por todos aquellos viajes desde Los Ángeles a Concepción.



RESUMEN

Como parte de la ciencia de los ríos, la cual estudia las interacciones físicas, químicas y biológicas en ecosistemas fluviales, está el marco conceptual denominado Síntesis de Ecosistemas Ribereños. Este explica la interacción entre tres dominios principales (geomorfología, hidrología y ecología), estableciendo que los procesos geomorfológicos e hidrológicos determinan los procesos ecológicos en un río. A partir de este paradigma, el presente estudio se centra en el dominio de la geomorfología, enfocado en los procesos de erosión, transporte y sedimentación que determinan las formas fluviales de un río. Tales procesos generan formas de ríos con diferentes características geomorfológicas que hacen surgir el concepto de geodiversidad, definido como las variaciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas en un determinado lugar. Este concepto que es relativamente reciente y en estudios ha demostrado ser esencial para comprender la biodiversidad y los servicios geosistémicos, determinando así, la salud de un sistema fluvial.

La presente habilitación profesional tiene como objetivo general analizar la geodiversidad de la cuenca del río Biobío. La pregunta de investigación que guía este estudio es: ¿Cómo se distribuyen espacialmente los tramos con alta geodiversidad en la red hídrica de la cuenca del río Biobío? Para responder esta pregunta se analizaron 998 segmentos fluviales caracterizados por 16 variables geomorfológicas para la conformación de grupos geomorfológicos distribuidos en toda la red hídrica del Biobío, con las cuales se determinó la geodiversidad alfa, beta y gamma.

Los resultados mostraron que los ríos con alta geodiversidad, como el río Biobío Alto, el río Bureo y el río Duqueco, presentan una mayor complejidad geomorfológica. Por otro lado, el Estero Quilacoya y el río Claro fueron identificados como los ríos con menor geodiversidad. En términos de distribución espacial, los ríos con alta geodiversidad se ubicaron principalmente en sectores de alta montaña y en la depresión intermedia, donde la diversidad de procesos geomorfológicos es mayor. Los ríos con geodiversidad media se concentraron en zonas de transición, mientras



que aquellos con baja geodiversidad se localizaron mayormente en sectores con menor complejidad geomorfológica.

1. INTRODUCCIÓN

La conservación de los ecosistemas fluviales es esencial para garantizar la salud de los recursos hídricos y la biodiversidad de las cuencas. Los ríos y sus afluentes desempeñan un papel crucial en el ciclo del agua, el abastecimiento de recursos, la regulación del clima y el soporte de una rica biodiversidad. Estos ecosistemas son particularmente sensibles a las perturbaciones humanas, como la construcción de embalses y centrales hidroeléctricas, que alteran el régimen de flujo, la conectividad de los hábitats y las dinámicas sedimentarias (Gurí et al., 2024). El impacto de tales intervenciones demanda la comprensión de los sistemas fluviales desde un enfoque integral, que contemple no solo los aspectos biológicos, sino también los procesos geomorfológicos que definen la estructura y funcionalidad de estos ecosistemas.

De acuerdo a lo anterior, la geodiversidad entendida como la variabilidad de las formaciones geológicas y procesos geomorfológicos de un paisaje, se ha convertido en un componente clave para entender la relación entre los factores abióticos y bióticos en los ecosistemas fluviales (Gray, 2021). La geodiversidad abarca la variedad de paisajes fluviales y su preservación es fundamental para el mantenimiento de los hábitats acuáticos y la diversidad biológica (Tukiainen et al., 2023). En los ríos, la interacción de procesos como el transporte de sedimentos, la erosión de las orillas y los cambios en la morfología de los cauces influye directamente en la calidad del hábitat acuático y en la capacidad de los ecosistemas para sustentar especies (Dauwalter et al., 2008). En este contexto, la longitud de los ríos también emerge como un factor relevante, ya que los cauces más extensos suelen atravesar una mayor variedad de paisajes, unidades geológicas y condiciones topográficas, lo que incrementa la diversidad de ambientes físicos y, por ende, la geodiversidad asociada (Alsbach et al., 2024).

En el caso específico de la cuenca del río Biobío, se observa una alta variabilidad geomorfológica a lo largo de su red hídrica, lo que resulta en la formación de diferentes tramos con características



únicas. Estas variaciones geomorfológicas son cruciales para entender cómo los cambios en el paisaje afectan la biodiversidad acuática. A través de este estudio, se busca analizar cómo la geodiversidad en la cuenca del río Biobío se distribuye espacialmente, enfocándose en identificar los tramos más geodiversos que pueden ser priorizados para conservación. Este enfoque no solo contribuye al entendimiento de los ecosistemas fluviales, sino también a la gestión sostenible de los recursos hídricos, proponiendo una base para la protección de aquellos tramos de río que son fundamentales para la resiliencia ecológica (Silva et al., 2015).

La importancia de incorporar la geodiversidad en las estrategias de conservación radica en que los sistemas fluviales con mayor diversidad geomorfológica son, por lo general, más resistentes a las perturbaciones externas. Esto hace que sean áreas clave para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, como la filtración de agua, la regulación de caudales y la disponibilidad de hábitats para especies de interés ecológico y económico (Quintero-Marín et al., 2023). De esta manera, la geodiversidad no solo contribuye a la estabilidad de los ecosistemas acuáticos, sino que también juega un papel crucial en la conservación de los servicios que estos ecosistemas brindan a las comunidades humanas.



1.1. Pregunta de investigación.

De acuerdo con la influencia que ejerce la geodiversidad en el mantenimiento de la biodiversidad acuática, y considerando que los ecosistemas fluviales están sometidos a diversas presiones antrópicas, surge la necesidad de comprender cómo se representa la geodiversidad en la red hídrica del Biobío.

¿Cómo se distribuyen espacialmente los tramos con alta geodiversidad en la red hídrica de la cuenca del río Biobío?

1.2. Objetivo general.

Evaluar la distribución espacial de la geodiversidad presente en la red hídrica del río Biobío.

1.3. Objetivos específicos.

- I. Determinar grupos geomorfológicos homogéneos a través de la red hídrica del río Biobío.
- II. Analizar la geodiversidad en escalas local, regional y su tasa de recambio en la red hídrica.
- III. Identificar las secciones de la red hídrica del río Biobío con mayor geodiversidad.



2. ANTECEDENTES

2.1. Ciencia de ríos.

Dentro de la heterogeneidad presente en los paisajes naturales, es posible evidenciar la presencia de largos ríos que nacen en zonas de alta elevación y descienden por valles hasta llegar al nivel del mar. Para estudiar cómo funcionan estas corrientes continuas de agua, existe una rama de las ciencias llamada ciencia de ríos, la cual es un campo de estudio interdisciplinario que se encuentra en un rápido desarrollo y que se centra en las interacciones entre los componentes físicos, químicos y biológicos dentro de los paisajes ribereños (Thoms et al., 2016).

A partir de lo anterior, es fundamental destacar que los sistemas fluviales involucran una serie de interacciones complejas que incluyen fenómenos naturales y que se integran en la gestión de los paisajes ribereños. Para comprender completamente cómo funcionan y se desarrollan los ríos, se utiliza una amplia gama de campos de investigación y disciplinas especializadas, las cuales ofrecen un estudio detallado y multidisciplinario que permiten comprender la naturaleza de los ríos (Thoms, 2016). Entre estas áreas de estudio se destacan la hidroecología, que analiza la relación entre los organismos acuáticos y su entorno; la hidrogeomorfología, que examina la interacción entre el agua y la forma del paisaje; la geomorfología fluvial, centrada en la forma y evolución de los ríos; y la geohidráulica, que estudia los aspectos hidráulicos y geológicos de los sistemas fluviales, entre otras disciplinas relevantes. La combinación y sinergia de estas áreas de estudio proporciona una comprensión más completa y holística de la dinámica de los ríos y sus ecosistemas asociados (Serlet et al., 2020).

Dentro del campo de investigación de los ríos es fundamental considerar la escala espacial a la que se quiere analizar estos sistemas. De acuerdo con lo anterior, se realizan investigaciones tanto a macroescala que abarca la totalidad de una cuenca hidrográfica y análisis a microescala, donde se estudian procesos específicos que suceden dentro del propio río (Church, 2007). A nivel de cuenca hidrográfica, se estudian las interacciones complejas entre la red fluvial y su



entorno, comprendiendo aspectos como la distribución de la precipitación, la topografía, la vegetación y la dinámica del flujo de agua a lo largo de toda la cuenca. Estos estudios de gran escala son fundamentales para comprender la hidrología de la región y cómo los cambios en un área pueden afectar a todo el sistema fluvial. Por otro lado, a una escala más pequeña, se analizan procesos más detallados que ocurren dentro del propio cauce del río. Estos pueden incluir el transporte y la sedimentación de materiales, la interacción entre el régimen hidrológico y la biota acuática, así como los procesos bioquímicos que tienen lugar en el lecho del río. Este enfoque observado desde una escala menor permite entender cómo los procesos que son de un aspecto más específico contribuyen a la dinámica general del río y su ecosistema (Baptist, 2001; Reed et al., 2006).

2.2. Marcos conceptuales para el estudio de ríos.

2.2.1. Ríos como sistemas jerárquicos.

La ciencia que se encarga de estudiar los sistemas de agua dulce destaca la existencia de que estos conforman estructuras jerárquicas, es decir, diferentes niveles de organización, haciendo referencia a que los sistemas de ríos tienen niveles de organización anidados que abarcan una multitud de relaciones en una variedad de escalas espaciales y temporales, en donde los niveles superiores tienen un impacto significativo en los niveles inferiores. Destacan de igual forma que los niveles inferiores ejercen una influencia recíproca sobre la estructura y el funcionamiento de los niveles superiores (DeLong & Thoms, 2016).

Dentro de los diferentes niveles jerárquicos que conforman los sistemas fluviales, es posible evidenciar que existen dominios presentes en estos sistemas que contienen una estructura jerárquica, que utilizan las escalas espaciales y temporales que facilitan a los investigadores formular preguntas que reconozcan la existencia de la conexión entre los diferentes subsistemas que estudian los ríos.



Para comprender con más profundidad cómo funcionan los sistemas de ríos, es importante tener en cuenta que existen tres dominios principales, conformados por la hidrología, geomorfología y la ecología. La hidrología se centra en el movimiento del agua a través de los paisajes y sistemas fluviales. La geomorfología, en el contexto de geomorfología fluvial, considera las formas de erosión y sedimentación de los sistemas fluviales y los diferentes procesos que lo conforman. La ecología hace referencia a la respuesta por parte de los organismos, ya sea flora y fauna ante los cambios de suministro de agua, el movimiento de sedimentos y la morfología de los canales (DeLong & Thoms, 2016; Tukiainen et al., 2023).

A partir de la interacción entre los tres dominios mencionados (hidrología, geomorfología y ecología) se evidencia que la integración de cada uno de estos factores es esencial para obtener un análisis claro del estado de salud de los ecosistemas fluviales. Cada dominio aborda diferentes aspectos fundamentales de los ríos y sus cuencas, y juntos proporcionan una comprensión más holística de los sistemas fluviales.

La integración de estos tres dominios proporciona una visión más completa y detallada de los sistemas fluviales, lo que permite identificar de manera precisa los impactos negativos que afectan su calidad. Estos impactos incluyen la contaminación, la alteración de los flujos naturales y las modificaciones en la geomorfología fluvial debido a actividades humanas como la construcción de presas, la deforestación y la sobreexplotación de los recursos hídricos (Postel, 2002; Lytle & Poff, 2004). Es fundamental entender cómo estos factores están interrelacionados, ya que la modificación de un dominio puede desencadenar una serie de efectos en los otros, generando un efecto cascada sobre la salud ecológica de los ríos (Reich et al., 2023). A partir de esto se puede deducir que los ríos como sistemas jerárquicos, requieren formas de gestión y conservación sostenibles que minimicen estas perturbaciones. Estas estrategias deben estar orientadas a preservar la biodiversidad, restaurar los hábitats naturales y asegurar que los ecosistemas fluviales puedan continuar brindando servicios ecosistémicos fundamentales, como



el abastecimiento de agua potable, la protección contra inundaciones y la regulación del clima (Arthington et al., 2010). Para ello, es necesario integrar enfoques basados en la gestión adaptativa que puedan hacer frente a los cambios en el entorno, como los derivados del cambio climático y la presión humana sobre los recursos naturales (de Paula et al., 2022).

2.2.2. Enfoque hidrogeomorfológico.

La comprensión del funcionamiento de los sistemas fluviales puede ser realizado a partir de un enfoque hidrogeomorfológico. Esta perspectiva que permite unificar la hidrología y la geomorfología nos permite examinar cómo los procesos ecológicos naturales responden a los cambios físicos que ocurren dentro del sistema fluvial. Un paradigma que analiza los ecosistemas de ríos aplicando lo mencionado con anterioridad es la Síntesis de Ecosistemas de Ríos (RES), la cual integra las construcciones hidrológicas y geomorfológicas desde la perspectiva de la hidrogeomorfología con las respuestas ecológicas esperadas ante los cambios físicos del río (Thorp et al., 2008).

Este sistema de RES considera tres aspectos fundamentales, los cuales permiten desarrollar una imagen completa de la salud y funcionamiento de los ríos, como también explicar una respuesta de los diferentes ecosistemas asociados. Para ello se utilizan indicadores relevantes como el largo de las cadenas tróficas, debido a que estas representan las interacciones alimentarias entre los diferentes organismos de un ecosistema fluvial y a la vez demuestran los diversos actores que participan dentro de estas cadenas, destacando los productores correspondientes a las algas y plantas acuáticas. También cuentan los consumidores primarios, secundarios y terciarios (herbívoros, carnívoros, entre otros).

El espiral de nutrientes, es un segundo aspecto que se considera debido a que este describe los diferentes ciclos de nutrientes presentes en un ecosistema fluvial. Este tipo de espiral hace referencia a que cuando los ecosistemas de ríos están en constante movimiento, los diferentes



organismos presentes tienen la capacidad de absorber los nutrientes presentes en las secciones de un río. Mientras más rápido es el caudal del río, más alargado será este espiral.

Finalmente, como tercer aspecto que considera este paradigma es la diversidad de especies, esto debido a la gran variedad de organismos que coexisten en un ecosistema fluvial. En los ecosistemas de ríos se pueden evidenciar diferentes individuos, dentro de los cuales se pueden mencionar peces, insectos, macroinvertebrados, plantas acuáticas, aves, entre otros. Esta diversidad de organismos es fundamental debido a que cada especie, tiene una función dentro del ecosistema, permitiendo que exista un equilibrio entre los diferentes componentes que conforman un ecosistema de ríos.

2.3. Geomorfología fluvial.

Para el propósito de esta investigación, es esencial comprender con profundidad el concepto de geomorfología, específicamente enfocado a la geomorfología fluvial, la cual tiene el objetivo de estudiar las relaciones entre procesos físicos del flujo en canales de lecho móvil, la mecánica del transporte de sedimentos forzados por el flujo y la forma de las canales aluviales creadas por el transporte de sedimentos (Brierley et al., 2002). En otras palabras, se intenta explicar cómo el agua mueve sedimentos de diferentes composiciones y rocas en el fondo del río y cómo esa acción cambia la forma del lecho del río a medida que pasa el tiempo (Hooke, 2022).

A partir de lo anterior, se evidencia que los ríos funcionan de forma dinámica, manifestada en una diversidad de procesos que predominan en distintas zonas geomorfológicas. En las zonas altas de un sistema fluvial, se observa la producción de sedimentos y procesos erosivos que desgastan las orillas en las áreas montañosas (Thorndycraft et al., 2008). A medida que el río desciende y su caudal aumenta, se identifica la zona media o de transición, donde predomina el transporte de materiales y sedimentos, incluyendo la disolución, el rodamiento y la saltación, cuya combinación depende de la velocidad del flujo del río. Por último, en la zona baja del río se



evidencian procesos de sedimentación, que si bien pueden ocurrir en cualquier sección del lecho fluvial, son más frecuentes cerca de la desembocadura (Guo et al., 2020).

Debido a la diversidad de procesos que ocurren a lo largo de una red hidrográfica, se puede mencionar que estos generan diferentes formas a lo largo del recorrido de un río, a escala de cuenca es posible observar grandes estructuras como los valles fluviales, correspondientes a zonas amplias por donde fluye el río, a medida que se observa con mayor precisión es posible identificar estructuras más específicas como meandros encajados, correspondiente a curvas pronunciadas (Thoms et al., 2005). En cuanto a la clasificación de ríos, existen distintos tipos según la forma que adopta su canal, como por ejemplo: ríos rectos correspondiente a ríos de un solo canal definido y de trayectorias lineales, ríos meándricos caracterizados por curvas suaves generadas por la alternancia entre los procesos de erosión en el exterior y disposición de sedimentos en el interior, y ríos trenzados caracterizados principalmente por múltiples canales entrelazados (Sholtes et al., 2018).

2.4. Geodiversidad.

El concepto de geodiversidad nace y se define como el rango natural (diversidad) de tipo geológico (rocas, minerales, fósiles), geomorfológico (tierra, forma, procesos) y características del suelo (Gray, 2004). Entre otras definiciones, la geodiversidad es un concepto reciente en las ciencias terrestres y ambientales, y hace referencia a la variedad de componentes abióticos, características y procesos de la superficie y del subsuelo de la tierra (Tukiainen et al., 2023). De acuerdo con la literatura es posible determinar que este concepto se describe mayormente a nivel de escala de cuenca, es decir, haciendo referencia a la superficie terrestre delimitada por altas cumbres, sin considerar la perspectiva de lo que sucede en la red hídrica.

Se ha descrito que la geodiversidad se relaciona con la biodiversidad en diferentes ecosistemas (Tabla 1). Se ha demostrado en diversos estudios que las zonas montañosas con alta variación topográfica presentan un alto endemismo de plantas vasculares, subrayando la influencia de los



sustratos geológicos sobre la vegetación. Por otro lado, se destaca, que a pesar de que existan variables climáticas que influyan en la diversidad, se menciona que las áreas con alta geodiversidad topográfica muestran una mayor diversidad de árboles y aves. De igual forma, a escala de paisaje, la variedad de tipos de rocas y formas terrestres crea diversos ecosistemas que sustentan una rica flora y fauna. En paralelo a nivel de escala local se ha estudiado que la heterogeneidad de componentes abióticos genera el incremento de la riqueza de especies. También se ha determinado que los afloramientos rocosos únicos contribuyen significativamente a la diversidad y rendimiento de las plantas. Diferentes estrategias de conservación resaltan la idea de que la geodiversidad conforma el escenario a los diferentes organismos vivos, es decir, cuanto mayor es la diversidad de componentes abióticos (geodiversidad), existe una mayor variación de especies a diferentes escalas (Tukiainen et al., 2023).

La geodiversidad al proporcionar las bases y la variedad de hábitats físicos para que diferentes organismos puedan realizar sus funciones ecológicas permite generar un mayor equilibrio los ecosistemas, lo cual genera el incremento de la cantidad de servicios geosistémicos. Estos servicios son los que permiten que la sociedad moderna pueda aprovechar de estos recursos de manera efectiva, promoviendo una mejora en diferentes procesos naturales, obtención de recursos naturales, conocimientos y cultura (Gray, 2011).



Tabla 1: Estudios que relacionan la influencia de elementos de la geodiversidad en el mantenimiento de la biodiversidad.

Escalas	Ubicación	Geodiversidad	Diversidad	Fuente
Escala continental	Australia	Variación topográfica	Plantas vasculares	<i>(Crisp et al., 2001)</i>
	Estados Unidos	Altitudes, suelos y edades geológicas	Aves y arboles	<i>(Read et al., 2020)</i>
Escala paisaje	Reino Unido	Hidrología, geología, suelos y los accidentes geográficos	Plantas vasculares	<i>(Bailey et al., 2017)</i>
	Australia	Sustratos geológicos	Vegetación	<i>(Keith, 2011)</i>
	Irak	Lecho rocoso y suelo. Formas del terreno y características hidrológicas	Mamíferos, aves, reptiles, anfibios y peces	<i>(Aqeel Abbas Al-Zubaidi, 2017)</i>
	Finlandia	Tamaño de arroyos	Macroinvertebrados, diatomeas y bacterias de arroyos	<i>(Kärnä et al., 2019)</i>
Escala local	Noruega-Finlandia	Tipo de flujo, el sustrato y la riqueza geomorfológica	Macroinvertebrados	<i>(Kärnä et al., 2018)</i>
	Islas Canarias	Afloramientos rocosos	Plantas vasculares	<i>(Kienle et al., 2022)</i>



2.5. Geodiversidad en los ecosistemas de ríos.

Basándose en las definiciones entregadas anteriormente es posible determinar que la geodiversidad de los ecosistemas de ríos corresponde a la variedad de características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas presentes en los sistemas fluviales.

Dentro de los ecosistemas de ríos, es importante considerar que se pueden identificar diferentes formas geomorfológicas, los cuales generan una gran variedad de paisajes fluviales que pertenecen a estos ecosistemas. Por otro lado, a medida que los ríos van descendiendo es posible evidenciar en la zona de transición el transporte de sedimentos, incluyendo la disolución, el rodamiento y la saltación, cuya combinación de estos transportes depende de la velocidad del flujo del río generando variaciones en la geomorfología del cauce, permitiendo así determinar una amplia gama de hábitats que determina la existencia de diferentes organismos.

Dentro de las diversas formas de poder evaluar la geodiversidad de un ecosistema, en la literatura se menciona la aplicación de componentes de diversidad alfa, beta y gamma. Estos componentes provienen de enfoques analíticos ampliamente reconocidos para el estudio de la diversidad biológica. En base a la definición general de geodiversidad, se consideran las geocaracterísticas como la forma más adecuada de medir la geodiversidad en los niveles de alfa, beta y gama (Tukiainen et al., 2023).

La geodiversidad alfa se define como la variabilidad de los tipos de rocas, suelos, accidentes geográficos y las características hidrológicas de un sitio. Para esto es importante determinar la escala espacial a la cual se están identificando estas geocaracterísticas debido a que a microescala solo se pueden observar unos pocos elementos de geodiversidad (variabilidad granulométrica, mineralogía). Sin embargo, a macroescala la geodiversidad alfa puede ser la suma de los diferentes tipos de rocas, suelos, características hidrológicas entre otros. La geodiversidad beta, se define como las diferencias geográficas que existe entre diferentes sitios, es decir la tasa de recambio entre diversidades alfa. Finalmente la diversidad gamma,



corresponde a la variabilidad de geocaracterísticas en todos los sitios de una región de estudio (Tukiainen et al., 2023).

2.6. Geomorfología del Río Biobío.

El río Biobío, es una de las principales cuencas hidrográficas de Chile, presenta una diversidad geomorfológica a lo largo de su curso, desde las formaciones montañosas en su cabecera hasta las planicies aluviales en su desembocadura. Esta variedad de formas y procesos geológicos ha dado lugar a una amplia gama de hábitats acuáticos y terrestres, sustentando una rica biodiversidad en la región. Sin embargo, el Biobío ha estado sujeto a diversas presiones antropogénicas, como la construcción de represas, la expansión urbana y actividades industriales, que han alterado su dinámica natural y afectado la integridad de sus ecosistemas (Habit et al., 2006; Valenzuela-Aguayo et al., 2020). Comprender la geodiversidad del río Biobío a base de su geomorfología es esencial para evaluar cómo estas presiones afectan a la diversidad biológica y los servicios ecosistémicos. Permitiendo desarrollar estrategias de conservación y gestión que promuevan la resiliencia y sostenibilidad de esta red hídrica (Fuss et al., 2024; Gray et al., 2013).

La cuenca del río Biobío tiene su origen en la zona de la Cordillera de Los Andes, la cual se caracteriza por la presencia procesos sedimentarios y la acumulación caótica de materiales glaciales, volcánicos y fluviales dispuestos al pie de la cordillera. Esta zona alta de la cuenca se caracteriza por la presencia de laderas y ríos encajonados. En su cauce, se pueden identificar depósitos que son generados principalmente por procesos de acumulación y erosión (CADE-IDEPE, 2004).

En la zona media del río, es posible evidenciar el transporte de depósitos provenientes de la Cordillera de Los Andes. A medida que el río desciende a la zona baja de la cuenca, se ubica la Cordillera de la Costa, en donde es posible identificar ríos arcillosos. (CADE-IDEPE, 2004).



Finalmente se puede identificar la desembocadura del río Biobío, la cual se encuentra sobre una planicie litoral fluvio-marina en donde predominan áreas de extensos humedales.

2.6.1. Usos del suelo y agua que entrega el Río Biobío.

En el caso del río Biobío, se evidencia una amplia gama de servicios que proporciona a la región. Dentro de los diversos usos que se le da a la cuenca es posible evidenciar el uso del suelo, destinado en primer lugar a las actividades agrícolas con la mayoría de los terrenos destinados a la agricultura intensiva y la agroindustria concentrados mayormente en los llanos de la depresión central. Dentro de los cultivos más destacados en esta cuenca se encuentran el trigo, la remolacha, la avena, la papa, la cebada y el maíz.

Es posible identificar la superficie forestal productiva caracterizada principalmente por las plantaciones de pino radiata, pino insigne y eucalipto. Y como tercer lugar, se observa una notable concentración urbana en las zonas costeras de la cuenca, siendo la ciudad de Concepción el centro más prominente. Por otro lado, es importante destacar el uso del agua que se obtiene de este río, relacionado principalmente a las actividades de riego, captación de agua potable, energía eléctrica y actividades industriales.



3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio y base de datos.

El presente estudio tiene como objetivo general evaluar la geodiversidad en la cuenca del río Biobío mediante la caracterización y agrupación de segmentos fluviales previamente caracterizados en sus variables geomorfológicas (Habit et al. 2022). Para ello, se desarrolló un enfoque metodológico basado en datos de una red hídrica que está compuesta por un total de 52 ríos, cada uno de ellos con diferentes longitudes (Km), los cuales están subdivididos en 998 segmentos fluviales de entre 1,5 a 3 km de longitud cada uno. Cada segmento está caracterizado por 16 variables geomorfológicas que se encuentran medidas en escala de cuenca, valle y canal (Tabla 2). Estas variables fueron utilizadas para el estudio de análisis de Zonas de Procesos Funcionales en zonas latitudinales y altitudinales (Habit et al. 2022).



Tabla 2: Variables geomorfológicas que caracterizan a los 998 segmentos fluviales que están medidos en escalas de cuenca, valle y canal.

Escalas	Variables	Unidad	Fuente
Cuenca	Elevación	m	12,5 m DEM CIREN
	Geología	-	Mapa geológico de Chile 1:1.000.000
	Precipitaciones medias anuales	mm	Ráster de precipitaciones WorldClim
Valle	Ancho del fondo del valle	m	Shapefile de llanura inundable
	Ancho del valle	m	Valle Shapefile
	Relación entre ancho del valle y el ancho del fondo del valle	m	Shapefiles de llanuras y valles inundables
	Pendiente derecha	-	Ráster de pendiente
	Ladera izquierda	-	Ráster de pendiente
	Pendiente del valle aguas abajo	-	Ráster de pendiente
Canal	Ancho de banda de canal	m	Shapefile de canal
	Longitud de onda del cinturón de canales	m	Shapefile de canal
	Sinuosidad del cinturón de canales	-	Shapefile de red fluvial Shapefile de valle
	Sinuosidad del río	-	Shapefile de red fluvial Shapefile de valle
	Forma del canal	-	Imágenes de satélite
	Número de canales	-	Imágenes de satélite
	Confinamiento	-	Planicie aluvial y canal Shapefiles

Fuente: Extraído a partir de las variables utilizadas para la determinación de Zonas de Procesos Funcionales. (Habit et al., 2022)

Al inicio del trabajo, para permitir la inclusión de todas las variables geomorfológicas en el análisis estadístico se efectuó una revisión de la base de datos, realizando algunas modificaciones en las variables categóricas. Estas variables, que representaban características propias de los segmentos fluviales, se les asignaron valores numéricos. En la Tabla 3 se presentan las variables relacionadas con geología y confinamiento, junto a sus categorías y valores asignados.

Adicionalmente, la Figura 1 representa cada uno de los segmentos fluviales que conforman la red hídrica de la cuenca del río Biobío.

Tabla 3: Variables geomorfológicas correspondientes a geología y confinamiento con sus respectivos valores asignados.

Variables categóricas			
Geología		Confinamiento	
Secuencias volcánicas	1	No confinado	0
Secuencias sedimentarias	2	Parcialmente confinado	0,5
Secuencias volcanosedimentarias	3	Confinado	1
Rocas intrusivas	4		

Área de estudio

Leyenda

- Red hídrica
- Cuenca del Biobío

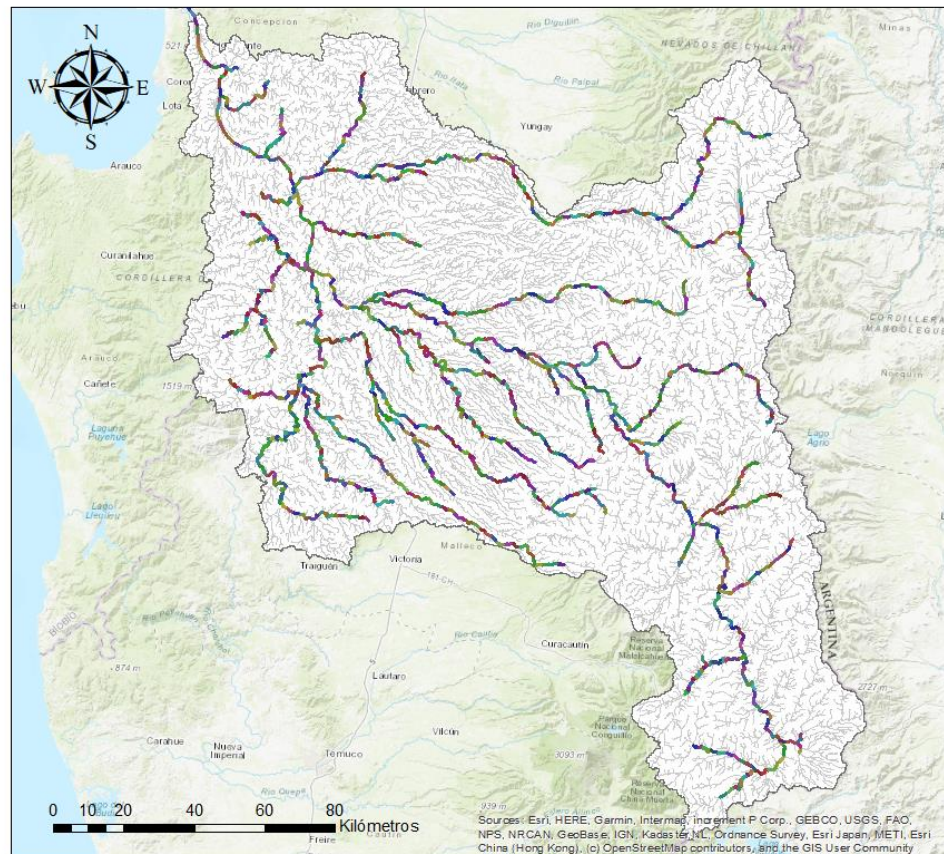
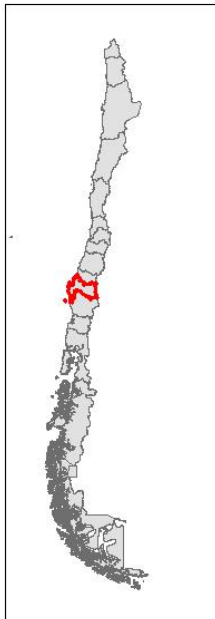


Figura 1: Representación cartográfica de los 998 segmentos fluviales distribuidos en 52 ríos de la red hídrica del Biobío.

Fuente: Elaboración a partir del software ArcGis.



Con el propósito de reducir la asimetría en la distribución de las variables y garantizar condiciones estadísticas adecuadas para los análisis posteriores, se aplicó una transformación logarítmica de los datos ($\log(x+1)$) sobre la base de datos modificada. Posteriormente, se desarrollaron diversos análisis estadísticos, estructurados en tres etapas fundamentales, utilizando el *software R* para dar cumplimiento al primer objetivo del estudio.

3.2. Determinación de grupos geomorfológicos homogéneos.

3.2.1. Etapa 1: Matriz de datos de entrada.

Con el propósito de evitar redundancias en la información y reducir el número de variables incluidas en los análisis posteriores, se analizó una matriz de datos compuesta por 998 segmentos dispuestos en filas y caracterizados por 16 variables dispuestas en columnas. Se exploraron las relaciones entre variables mediante el cálculo de coeficientes de correlación, eliminándose aquellas con valores superiores a 0,7 e inferiores a -0,7. Este procedimiento se realizó bajo el supuesto de que una alta correlación entre variables puede generar sobreestimaciones en la caracterización de los segmentos fluviales que se pretendían agrupar en la etapa siguiente.

3.2.2. Etapa 2: Agrupamiento.

Para identificar el grado de similitud entre los segmentos se calculó una matriz de distancias basada en el índice de Gower, que corresponde a una medida de similitud que permite comparar unidades de observación, para este caso cada uno de los segmentos (Victoriano, 2020).

Para comenzar, se elaboró una matriz que evaluó el porcentaje de similitud entre los segmentos, en un rango del 0 al 100%. El valor 0 indica que existe una disimilitud completa entre segmentos y a medida que aumentan los valores dentro de la matriz, incrementa el porcentaje de similitud, hasta llegar al 100%. Ello representa que los segmentos fluviales son idénticos.

Para representar la matriz de similitud gráficamente, existen diferentes métodos, uno de los cuales para este estudio fue de utilidad, es construir un dendrograma utilizando el método de



ligamiento promedio, basado en el promedio que hay entre los segmentos. Con ello se obtiene el dendrograma, el cual corresponde a una representación gráfica en forma de árbol que permite visualizar los 998 segmentos, estructurados de acuerdo con la similitud entre ellos, basado en la relación que existe entre cada uno de ellos de acuerdo con sus 16 variables.

A partir del dendrograma de 998 terminales, se identificaron aquellos segmentos similares, lo que permitió agruparlos de acuerdo con sus similitudes, obteniendo un determinado número de grupos geomorfológicos. Para esta etapa se determinó cuál es el número óptimo de conjuntos de segmentos para trabajar. En este análisis, se empleó una gráfica entre el porcentaje de similitud y el número de grupos geomorfológicos, y se ubicaron puntos de inflexión de la curva. Estos indicaban cambios significativos en la estructura de los datos y que permitían definir las agrupaciones de segmentos. Dado que la base de datos estaba compuesta por un elevado número de segmentos fluviales (998 en total), los ejes del gráfico fueron ajustados de manera precisa para tener una visualización clara de la curva. En este punto, el investigador decide el número de grupos de acuerdo a su experiencia.

3.2.3. Etapa 3: Caracterización de grupos.

Para esta tercera etapa, teniendo en cuenta la agrupación de segmentos en diferentes grupos geomorfológicos, se realizó una caracterización para cada uno de ellos según los valores de las variables registradas. Así, se sabrá que un “grupo x” está compuesto por un número determinado de segmentos, los cuales están caracterizados por ciertas variables, dependiendo de cuáles fueron las que predominaron para ese grupo geomorfológico.

Dentro de esta etapa se conoce cómo se distribuyen los valores de cada variable según los valores medios. Ello se realizó utilizando gráficos tipo “boxplot”, así como también mapas de distribución generados a partir de archivos shapefile que representaban los grupos identificados, lo que permitió conocer su ubicación dentro de la red hídrica. Esto reflejó un número determinado de grupos geomorfológicos y de los 998 segmentos individuales considerados inicialmente. En la Figura 2 se pueden identificar las etapas correspondientes al primer objetivo.

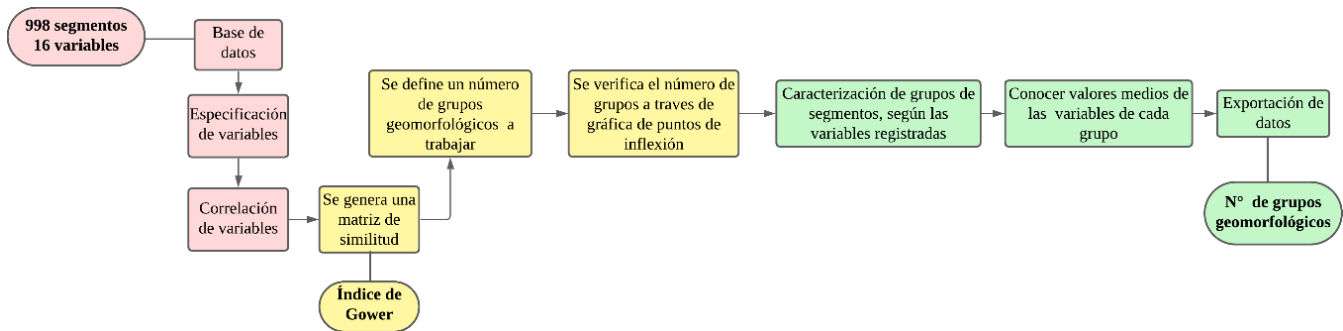


Figura 2: Diagrama de flujo que representa las diferentes actividades a realizar en las diferentes etapas. Etapa 1: Color rojo, Etapa 2: Color amarillo y Etapa 3: Color verde.

Fuente: Elaboración a partir de Lucidchart.

3.3. Análisis de composición de grupos geomorfológicos.

Una vez exportada la matriz de datos conformada por las variables geomorfológicas y los segmentos clasificados con sus grupos geomorfológicos con la ayuda de *PRIMER v.6*, se realizó un Análisis de Similitud Porcentual (SIMPER). Se realizó una transformación logarítmica y normalización, permitiendo que las diferentes variables utilizadas en el análisis estén a escalas comparables y evitando que aquellas variables con valores más altos sobrestimen el análisis, para finalmente obtener el porcentaje de contribución a la similitud de las variables geomorfológicas a cada uno de los grupos geomorfológicos identificados. Para este análisis se estableció un umbral del 70%, enfocándose así en las variables que explican la mayor parte de la similitud entre los segmentos fluviales que conforman los respectivos grupos.



De acuerdo con los mapas de distribución espacial y la visualización de los grupos en *ArcGis*, se realizó un reordenamiento de ríos para mantener mayor homogeneidad del largo de los ríos a analizar en su geodiversidad. Para ello, los tributarios de menor longitud se unieron a sus cauces principales para conformar un solo río y los ríos muy extensos, como el caso del cauce principal de la red hídrica, se dividió en tres tramos principales.

Una vez definidos los ríos, se visualizaron los diferentes grupos geomorfológicos en *Google Earth*, para observar sus características. Comparándolas con los resultados obtenidos en los diagramas de caja y complementando la descripción con aquellas variables que tenían una mayor contribución a la similitud entre los segmentos fluviales que conformaban un determinado grupo.

Es importante destacar que los diagramas de caja utilizados para observar la distribución de datos de cada una de las variables que caracterizaban los 11 grupos geomorfológicos definidos no incluyeron las variables categóricas, como Geología, Confinamiento, Cantidad de canales y Forma de canal.

Cada diagrama de caja está compuesto por una serie de elementos, los cuales deben ser considerados para su análisis:

- **Rango intercuartil:** Representó la distribución de valores, es decir, la diferencia de los datos que hay entre el cuartil 1 (Q1) y cuartil 3 (Q3), identificado por el tamaño de la caja.
- **Cuartil 1 (Q1):** Por debajo de este valor se encuentra como máximo el 25% de los datos, este se identifica por el límite inferior de la caja.
- **Cuartil 3 (Q3):** Por debajo de este valor se encuentra como máximo el 75% de los datos, este se identifica por el límite superior de la caja.
- **Línea negra:** Correspondió a la mediana, la cual coincide con el cuartil 2 (Q2) y equivale al 50% de los datos.



- **Punto negro:** Indica valor promedio o media de los datos.
- **Bigote inferior:** Corresponde a los valores que se concentran entre el valor mínimo de los datos y el Q1. Este corresponde a la línea vertical que se encuentra fuera de la caja en la parte inferior.
- **Bigote superior:** Corresponde a los valores que se concentran entre el valor máximo de los datos y el Q3. Este corresponde a la línea vertical que se encuentra fuera de la caja en la parte superior

Para la elaboración de los diagramas de caja se consideraron todos los valores pertenecientes a cada uno de los segmentos fluviales que conformaban un grupo, sin outliers.

Una vez que se tuvieron en cuenta la composición y las características principales de cada grupo, se les asignó un nombre basado en sus características y descripciones, las cuales se detallan en las secciones siguientes. Para este proceso, se utilizó el sistema de clasificación de Rosgen, en el nivel 1, el que agrupa los ríos según su morfología de canal y valle. En esta clasificación, se consideraron categorías como A, B, C, D, E, F, que describen diferentes tipos de canales fluviales. Los ríos clasificados como tipo A tienen un cauce estrecho con un alta pendiente y un patrón de flujo relativamente recto, mientras que los tipo B son canales moderadamente confinados, con una forma más ancha, pero aún con cierta pendiente. Los ríos tipo C son canales meándricos de pendiente moderada y parcialmente confinados, mientras que los tipo D presentan sistemas de múltiples canales entrelazados, asociados con alta carga sedimentaria. Los tipo E y F se caracterizan por canales más anchos y planos, con meandros muy amplios y una baja elevación (Rosgen, 1994). Esta clasificación permitió organizar y comparar los grupos geomorfológicos identificados en base a sus variables geomorfológicas.



3.4. Análisis de geodiversidad a escala local, regional y tasa de recambio.

Para el análisis de los índices de geodiversidad, se consideraron los ríos previamente reordenados de la red hídrica, así como la longitud en kilómetros en la que se representan los grupos geomorfológicos definidos previamente. Los índices de geodiversidad alfa, beta y gamma fueron calculados para cada río, proporcionando una visión de la composición y variabilidad geomorfológica espacial a escala de ríos y de red hídrica. Con el fin de observar y comparar de manera más clara estos valores, se elaboraron gráficas que permitieron ordenar los índices de geodiversidad de cada río de menor a mayor, proporcionando una representación visual de las diferencias en la geodiversidad a lo largo de la red hídrica.

Para medir la geodiversidad a escala local (río), se calculó y analizó el índice de geodiversidad alfa. Para ello se ingresó al *software R* una matriz conformada por el número de ríos, que habían sido reordenados previamente y los diferentes grupos geomorfológicos que se distribuyeron en cada uno de los ríos de la red hídrica. Para esta primera parte se hizo uso del índice de Shannon y se consideraron dos aspectos importantes: El número de grupos geomorfológicos identificados en cada río y la distribución de cada uno de estos grupos, de acuerdo con su distribución medida en kilómetros.

Para el análisis de geodiversidad a escala regional (red hídrica), medida como tasa de recambio entre ríos, se calculó la índice geodiversidad beta. Para ello, se trabajó en base a una matriz de datos conformada por los grupos geomorfológicos, la longitud de cada uno de los segmentos pertenecientes a cada grupo y los ríos en los que estos grupos se distribuían. Se utilizó una función denominada “permdisp” entregada por el *software R*, la cual consiste en realizar un análisis de dispersión multivariado basado en permutaciones. Esto con el fin de expresar en valores que indican que tan similares son los ríos de acuerdo a su composición en términos de grupos geomorfológicos y su longitud.



Para el análisis de la geodiversidad gamma, se identificó el número total de grupos geomorfológicos representados a nivel de toda la red hídrica, lo que permitió caracterizar la diversidad geomorfológica general del sistema fluvial. Sin embargo, con el objetivo de obtener una visión más detallada, se consideró obtener número de grupos geomorfológicos presentes en cada uno de los ríos analizados. Esta aproximación permitió evaluar cómo se distribuyen y representan los distintos grupos a nivel local.

3.5. Identificación de secciones más geodiversas dentro de la cuenca.

Basado en los índices de geodiversidad alfa, beta y gamma se observó la variación de cada uno de estos valores respecto a la longitud de cada uno de los ríos analizados. En paralelo, se elaboraron diagramas de caja, para los tres índices de geodiversidad y así conocer la distribución de valores para cada uno de los índices permitiendo elaborar una categorización de lo que se podía considerar geodiversidad alta, media y baja. El rango específico que se utilizó para cada categoría, para geodiversidad alta fue para aquellos valores que se encontraban por encima del cuartil 3 (Q3), para geodiversidad media aquellos valores que se concentraban entre el cuartil 1 y 3 (Q1 y Q3) y finalmente para determinar geodiversidad baja el rango que se utilizó fue para aquellos valores que se encontraban por debajo del cuartil 1 (Q1). Esta clasificación permitió elaborar una categorización de los valores de geodiversidad alfa y beta, respecto a cada río, para finalmente obtener cartografías que permitirían identificar los ríos más y menos geodiversos. Para las cartografías se puede identificar las distribuciones espaciales de los índices de geodiversidad alfa y beta dentro de la red hídrica Biobío. Los ríos de alta geodiversidad se representaron en color verde, los de geodiversidad media en color amarillo, y los de baja geodiversidad en color rojo. A partir de estos mapas se decidió tomar ciertas medidas de conservación, sobre todo en aquellas secciones que se representaban una alta geodiversidad y también posibles soluciones a considerar para aquellas secciones que no resultaban ser tan geodiversas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Conformación de grupos geomorfológicos.

A partir de la base de datos utilizada, se observó la correlación entre las variables que caracterizan los 998 segmentos fluviales. La representación visual de la matriz de correlación mostró, en tonos azules, las variables con alta correlación positiva, mientras que los tonos rojos indicaron correlaciones negativas o bajas.

Se identificaron dos casos de alta correlación (Figura 3). El primero involucró las variables ancho de valle (A_valle) y ancho del fondo del valle (A_micro), con un coeficiente de correlación de 0,75. En este caso, se conservó la variable A_valle, descartando A_micro. El segundo caso correspondió a la correlación entre pendiente máxima (P_max) y pendiente mínima (P_min), cuyo coeficiente fue 0,88. Se optó por conservar la variable P_max, dado su mayor representatividad.

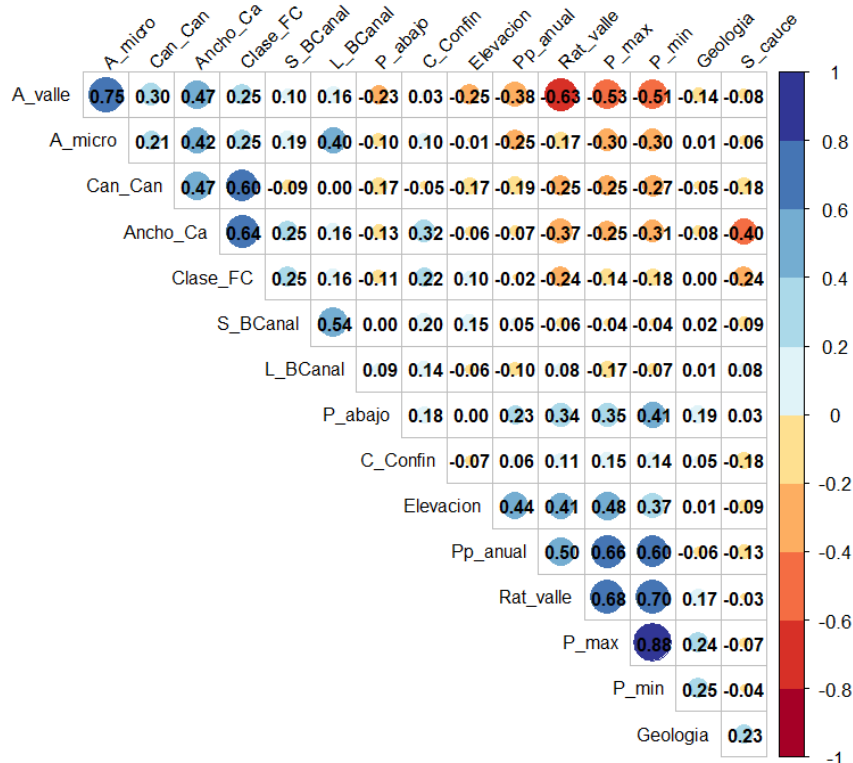


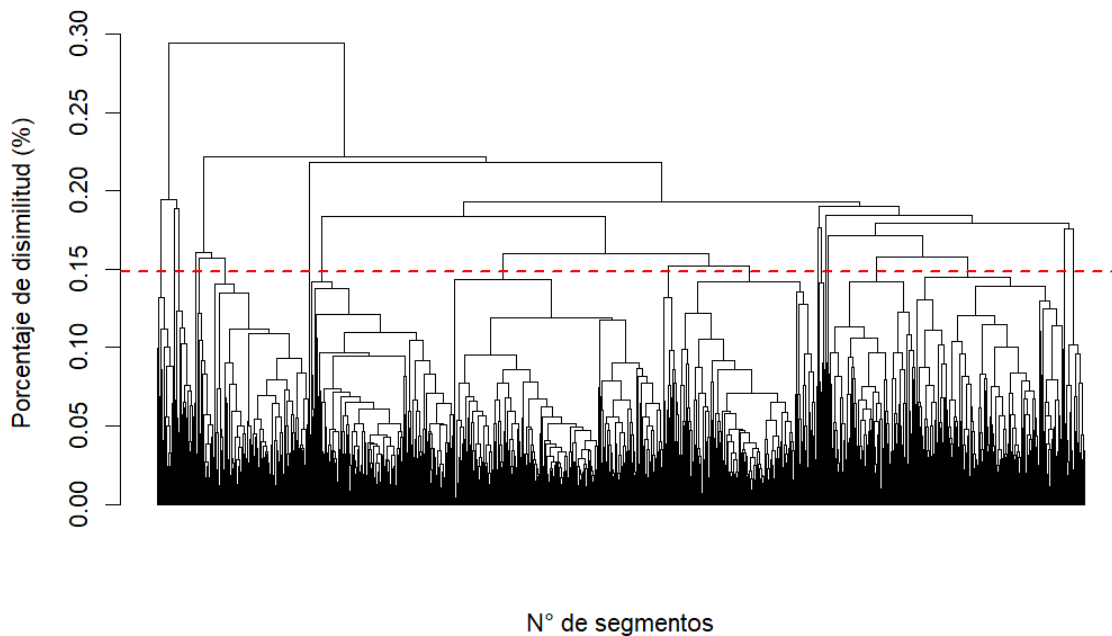
Figura 3: Heatmap de correlaciones entre las 16 variables geomorfológicas analizadas. En tonalidades azules se presentan los valores de correlación positiva y en la escala de rojo, las negativas.

Fuente: Elaboración a partir de Software R.

El dendrograma muestra segmentos fluviales en el eje x, que representa los 998 segmentos fluviales, y el eje y, que indica el porcentaje de disimilitud entre ellos. En el extremo inferior del eje y, todos los segmentos presentan 0% de disimilitud, lo que refleja similitud total entre cada uno de los segmentos que componen la base de datos. A medida que aumenta el porcentaje de disimilitud, se evidencia la formación de grupos diferenciados por sus características geomorfológicas.

Para definir el número de grupos, el dendrograma se cortó en 15% de disimilitud (Figura 4a). Este procedimiento resultó en la identificación de 19 grupos iniciales. Sin embargo, para facilitar la interpretación visual, se decidió parcelar el dendrograma en diferentes colores, permitiendo distinguir los grupos y su tamaño en función de los segmentos fluviales que los componían (Figura 4b).

a)



b)

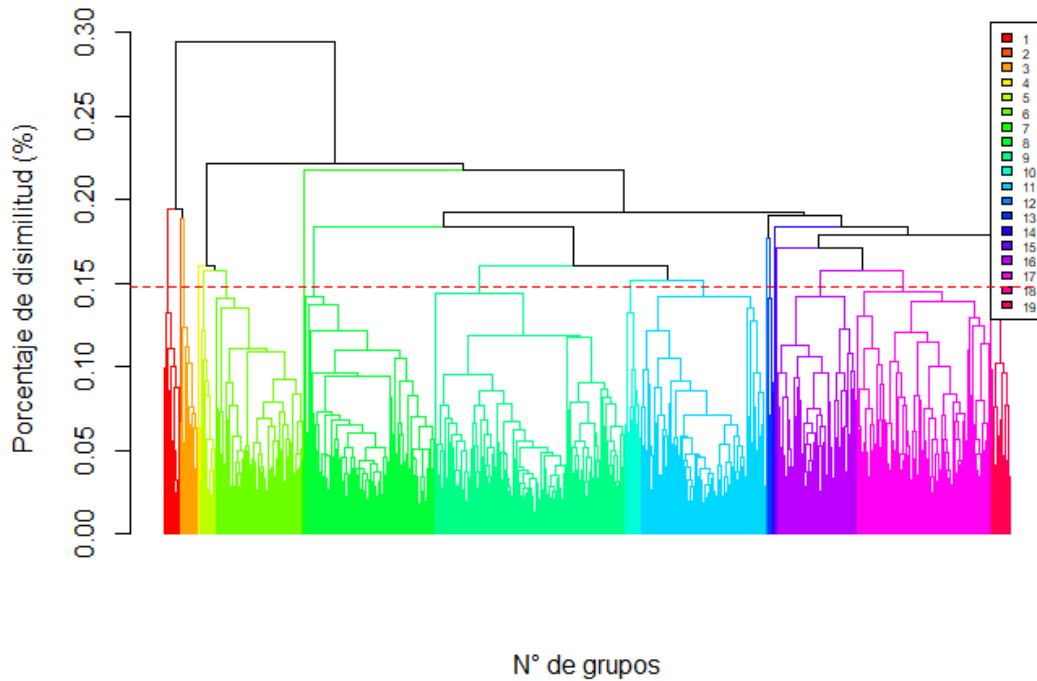


Figura 4: Dendrograma obtenido a partir del análisis de similitud de Gower para los 998 segmentos. a) Dendrograma mostrando el corte al 15% de disimilitud. b) Identificación mediante colores de los 19 grupos conformados al 15% de disimilitud.

Fuente: Elaboración a partir del software R.

El gráfico que relaciona el porcentaje de similitud (eje x) con el número de grupos (eje y) se muestra en la Figura 5. Esta inspección visual es clave para evaluar si el número inicial de grupos era adecuado para los análisis posteriores. En este caso, dada la alta similitud encontrada entre los distintos segmentos, se utilizó una escala de 75% a 100% de similitud para observar la inflexión de la curva (Figura 5). Este ajuste facilitó la identificación de valores críticos que influenciaron la selección final del número de grupos, confirmando que el corte preliminar en el dendrograma, que resultó en 19 grupos iniciales, estaba respaldado por el análisis de puntos de

inflexión. Este proceso también evidenció la importancia de realizar una exploración exhaustiva de los datos antes de proceder con los siguientes resultados y análisis posteriores.

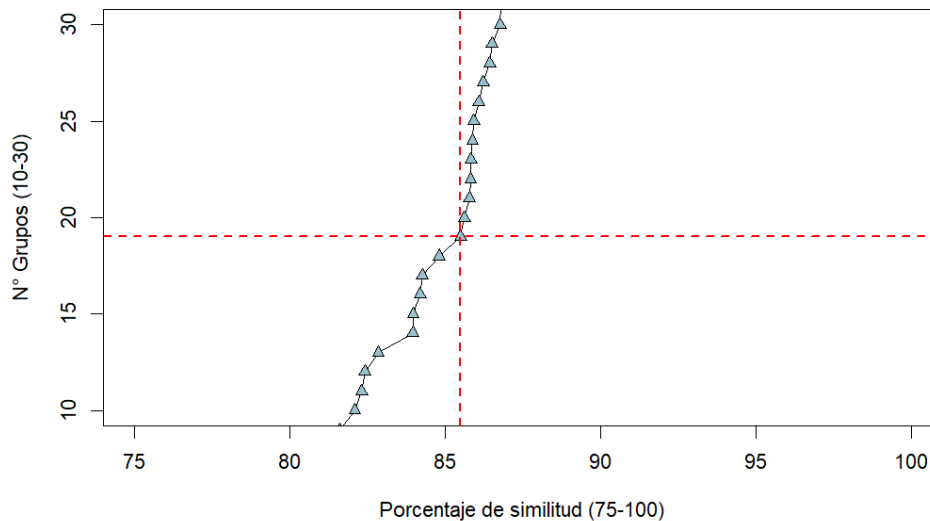


Figura 5: Curva de similitud entre los segmentos y el número de grupos en el dendrograma. Se muestra con líneas rojas punteadas el punto de inflexión seleccionado, correspondiente a 19 grupos.

Fuente: Elaboración a partir del Software R.

Tras confirmar el número de grupos (19 grupos), se identificó que algunos contenían menos del 1% del número total de segmentos fluviales, por lo que fueron reagrupados en una categoría denominada “grupo 99”. Esta nueva categoría incluyó a los grupos 2, 4, 7, 12, 13, 14, 15 y 18. Como resultado, el total de grupos se redujo de 19 a 12, de los cuales once fueron considerados definitivos y el grupo restante correspondiente al grupo 99 fue utilizado para categorizar aquellos con baja representatividad. Para este caso el grupo 99 quedó con un total de 21 segmentos fluviales. En la Tabla 4 se muestra el número de segmentos que representa cada uno de los 19 grupos identificados. con la información obtenida, se actualizó el archivo shapefile correspondiente a la representación espacial de los segmentos fluviales. En la tabla de atributos del shapefile, se añadieron dos nuevas columnas: “gr”, que representó el número inicial de



grupos definidos, y “gr99”, que agrupó los grupos definitivos (1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 19 y 99). Utilizando estas categorizaciones, se generó un mapa de distribución que representó los 11 grupos geomorfológicos definidos en la red hídrica de estudio (Tabla 5). El grupo 99 no fue incluido en los análisis posteriores debido a su baja representatividad dentro de la cuenca.

Tabla 4: Número de segmentos representados en cada uno de los grupos inicialmente identificados.

Grupos	N° de segmentos	Grupos	N° de segmentos
Grupo 1	18	Grupo 11	147
Grupo 2	1	Grupo 12	2
Grupo 3	21	Grupo 13	7
Grupo 4	2	Grupo 14	2
Grupo 5	19	Grupo 15	3
Grupo 6	102	Grupo 16	93
Grupo 7	2	Grupo 17	158
Grupo 8	154	Grupo 18	2
Grupo 9	225	Grupo 19	22
Grupo 10	18		

Fuente: Elaboración a partir de datos extraídos del software R.

Tabla 5: Número de segmentos representados para los grupos definitivos.

Grupos definitivos	N° de segmentos
Grupo 1	18
Grupo 3	21
Grupo 5	19
Grupo 6	102
Grupo 8	154
Grupo 9	225
Grupo 10	18
Grupo 11	147
Grupo 16	93
Grupo 17	158
Grupo 19	22

Fuente: Elaboración a partir de datos extraídos del software R.



4.2. Asignación de nombres a los grupos geomorfológicos identificados.

De acuerdo con las características principales de los grupos geomorfológicos obtenidos (ver sección 4.3) y la clasificación de Rosgen la cual consiste en la clasificación de ríos de acuerdo con su geomorfología y distribución espacial dentro de la red hídrica (Rosgen, 1994). En la Tabla 6 se muestran los nombres designados a cada uno de ellos.

Tabla 6: Nombres asignados para los grupos geomorfológicos definitivos a partir de sus características principales y clasificación de Rosgen.

Grupo	Clasificación de Rosgen	Nombre designado	Abreviación
Grupo 1	A	Ríos de Alta Pendiente	A-RAP
Grupo 3	B	Ríos Confinados	B-RC
Grupo 5	C	Ríos Parcialmente Confinados	C-RPC
Grupo 6	D	Ríos Multicanal	D-RM
Grupo 8	C	Ríos de Sinuosidad Moderada	C-RSM
Grupo 9	C	Ríos de Depresión Intermedia	C-RDI
Grupo 10	A	Ríos de Alta Elevación	A-RAE
Grupo 11	C	Ríos de Canal Único	C-RCU
Grupo 16	E	Ríos con Valles Amplios	E-RVA
Grupo 17	E	Ríos con Alta Longitud de Canal	E-RLC
Grupo 19	F	Ríos de Baja Elevación	F-RBE

Fuente: Elaborado a partir de grupos obtenidos por el Software R.

4.3. Caracterización de grupos geomorfológicos.

El resultado del análisis SIMPER se entrega en el Anexo I.

Entre los gráficos obtenidos, se identifican las diferencias entre las características de cada grupo geomorfológico de acuerdo con la mediana y el valor promedio de las variables (Figuras: 6 a la 16). En detalle se puede identificar que de acuerdo con el diagrama de caja de elevación (Figura 6) se aprecia que los grupos A-RAE y E-RLC presentan mayor elevación, con medianas de aproximadamente 800 m.s.n.m. Esto indica que los segmentos que conforman estos grupos se encuentran en zonas más elevadas de la cuenca. A diferencia, el grupo F-RBE se compone de segmentos situados en zonas de baja elevación, con una mediana de 109,24 m.s.n.m. y promedio igual a 183,52 m.s.n.m. Esto demuestra que este grupo geomorfológico se ubica en zonas de valles más bajos.

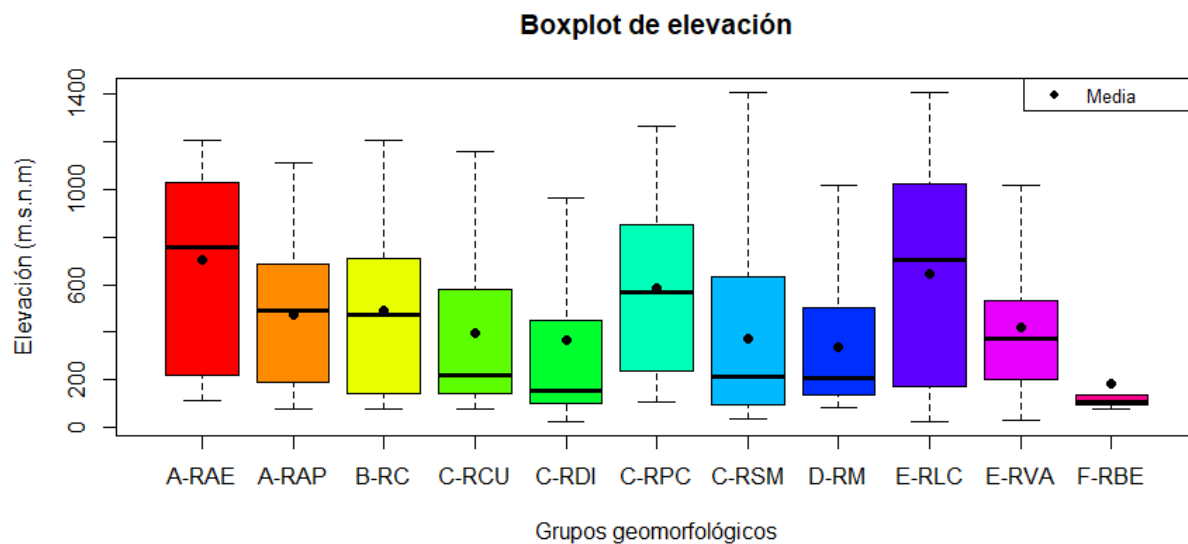


Figura 6: Diagrama de cajas sobre variable elevación para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

Por otro lado, en la Figura 7 correspondiente al diagrama de caja de precipitación anual también se presentan importantes diferencias entre los grupos geomorfológicos. Los grupos A-RAE y A-RAP tienen las precipitaciones más altas con un valor promedio cercano a 150 mm y una mediana de 122,16 mm para A-RAE y 142,39 mm para A-RAP, demostrando que estos grupos se identifican en áreas con mayor pluviometría. Por otro lado, nuevamente al igual que en el diagrama anterior, el grupo F-RBE presenta un valor promedio de precipitación más bajo de aproximadamente 100 mm, con una mediana de 106,23 mm.

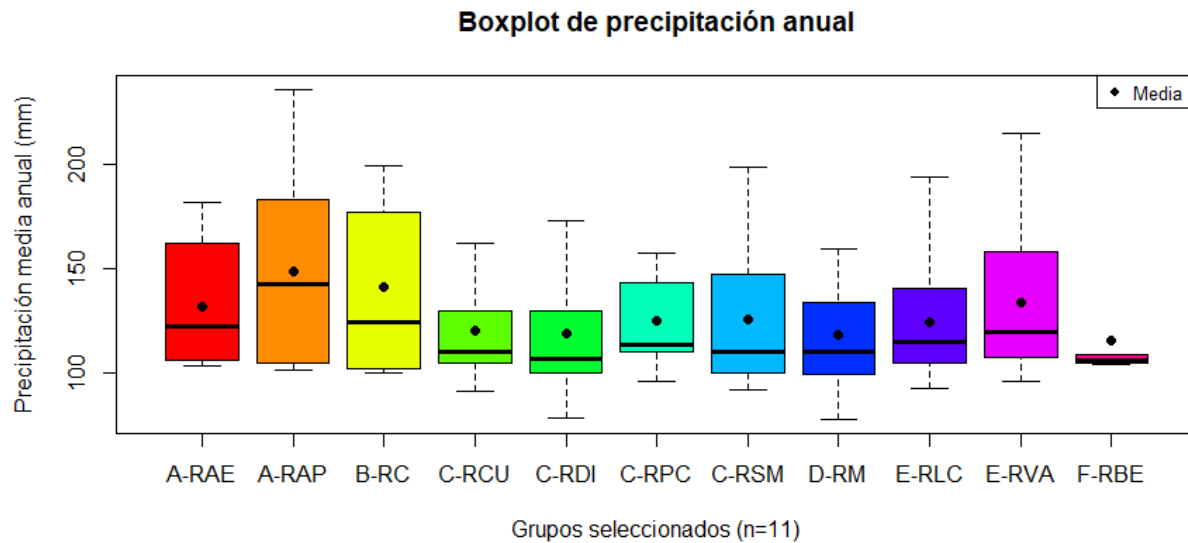


Figura 7: Diagrama de cajas sobre variable precipitación anual para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

Respecto a la Figura 8 nuevamente se identifica que los grupos geomorfológicos correspondientes A-RAE y A-RAP se destacan por tener pendientes más pronunciadas, con una media cercana a los 10° para ambos grupos, y con una mediana de $5,43^\circ$ para A-RAE y $7,39^\circ$ para A-RAP demostrando que los segmentos fluviales que conforman en su mayoría a estos grupos están en áreas dentro de la cuenca que poseen una topografía con una mayor inclinación. Por otro lado, el grupo C-RSM, está conformado por segmentos que se representan con pendientes más suaves, obteniendo una media cercana a los 5° y una mediana igual a $3,23^\circ$ indicando que estos grupos se representan en zonas de baja pendiente.

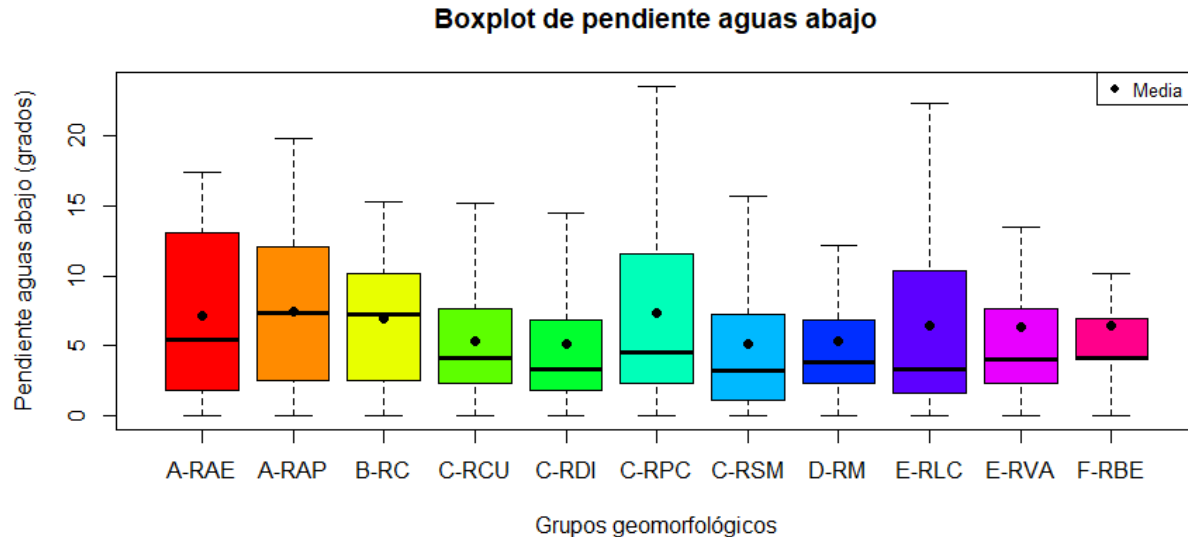


Figura 8: Diagrama de cajas sobre variable pendiente aguas abajo para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

En la Figura 9 correspondiente al diagrama de caja de la variable ancho de valle, se identifica que los grupos con mayor media son: E-RLC, C-RDI y E-RVA, con un valor promedio de aproximadamente 1200 m de longitud de ancho de valle. De acuerdo con su mediana, el grupo E-RLC presenta 501,57 m, C-RDI tiene 677,58 m y el grupo E-RVA 897,58 m lo que permitiría entender que los segmentos que conforman estos grupos se representan en zonas más amplias dentro de la cuenca. Por otro lado, los grupos con valles más estrechos, se identifican los grupos A-RAP, A-RAE y F-RBE, con valor promedio en longitud de ancho de valle cercano a los 500 m. De acuerdo con la mediana, A-RAP presenta una mediana de 370 m, A-RAE tiene un valor de 324 m y F-RBE presenta 445,35 m lo que indica que los segmentos que conforman estos grupos poseen características más estrechas y que podrían representarse en zonas de alta montaña.

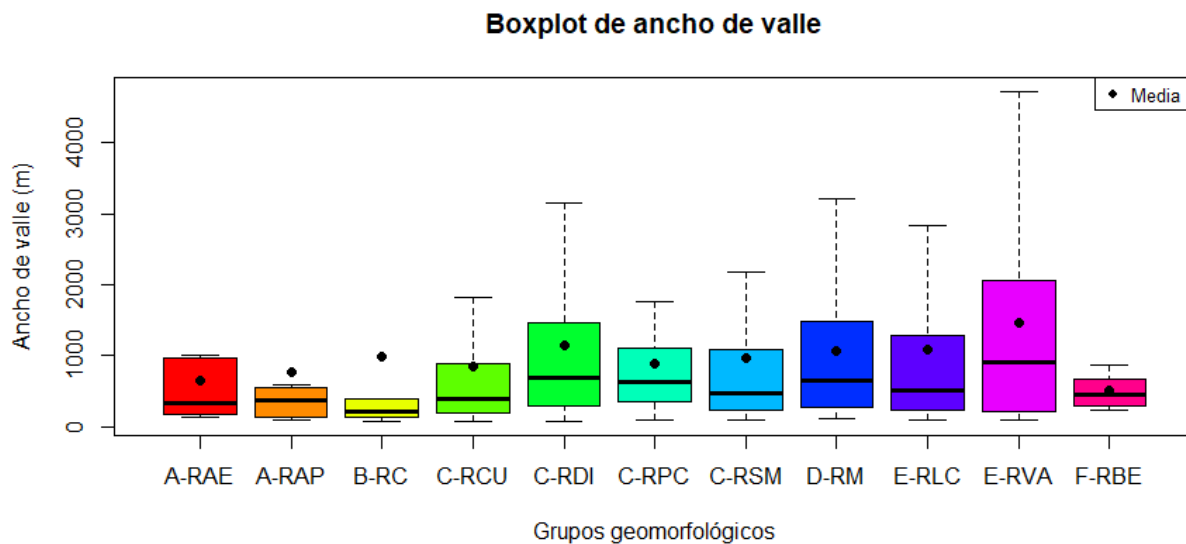


Figura 9: Diagrama de cajas sobre variable ancho de valle para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

En la Figura 10 correspondiente a la variable tasa de valle se identifica una tendencia interesante, debido a que los grupos A-RAP, A-RAE y B-RC anteriormente algunos de ellos se destacaron por ser los grupos con menor promedio de ancho de valle, sin embargo para este caso presentan una media cercana a los 10 m aproximadamente siendo los grupos con mayor media de la variable tasa de valle en comparación a los demás grupos geomorfológicos, destacando que presentan una mediana para A-RAP de 6,99 m, A-RAE con un valor de 6,73 m y B-RC con una mediana de 9,91 m. En contraste para los grupos C-RDI y C-RSM se identifica que tienen una media de aproximadamente de 7 m, con una mediana para C-RDI de 3,42 y para C-RSM igual a 4,38 lo que demuestra que tienen una tasa de valle mucho más baja.

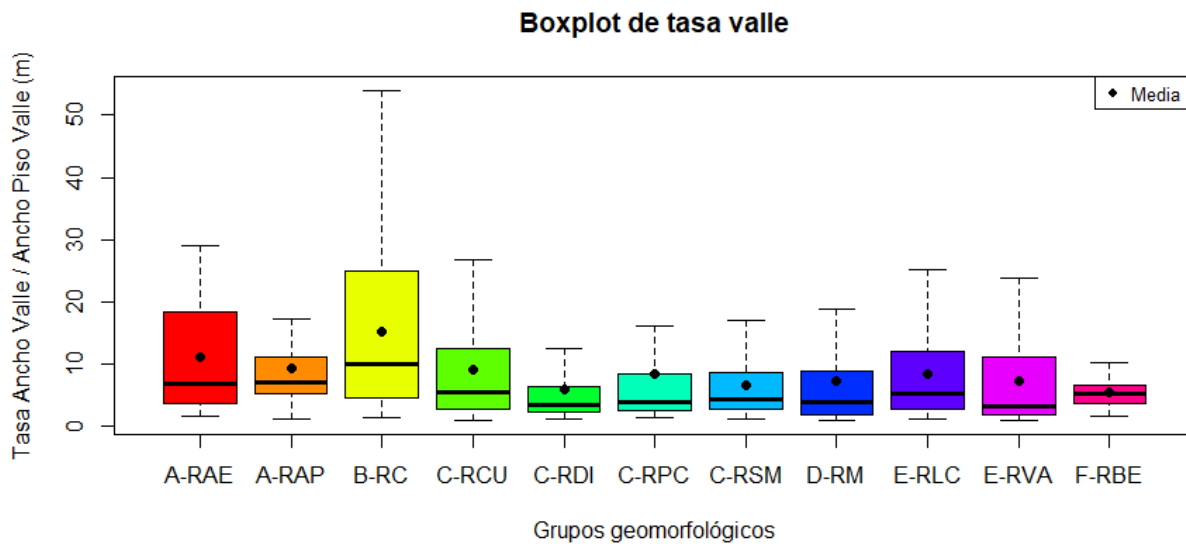


Figura 10: Diagrama de cajas sobre variable tasa de valle para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

En la Figura 11 se puede apreciar que los grupos C-RSM y E-RLC tienen valores promedio de longitud de canal más grandes, llegando a aproximadamente los 200 m y tienen una mediana para C-RSM de 31,66 m y para E-RLC un valor de 39,58 m por lo que los segmentos fluviales de estos grupos poseen canales mucho más amplios. En cambio, los grupos B-RC, C-RCU y A-RAE presentan valores de medias inferiores a los 50 m. De acuerdo con su mediana el grupo B-RC tiene un valor de 23,23 m, C-RCU tienen una mediana de 20,42 m y A-RAE tiene 34,63 m.

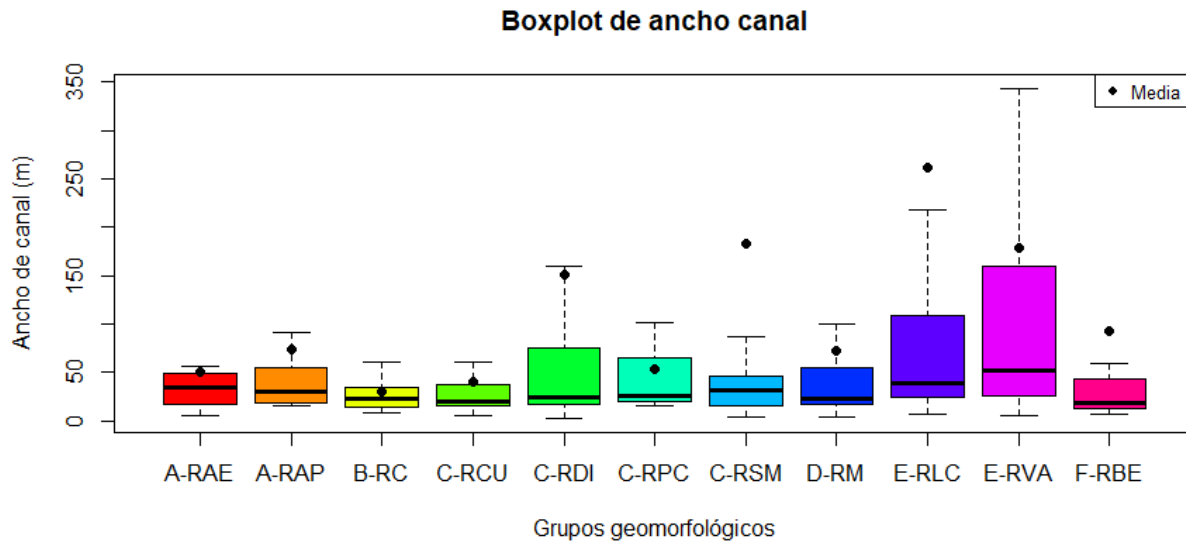


Figura 11: Diagrama de cajas sobre variable ancho de canal para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

Respecto la Figura 12 que representa diagramas de caja de acuerdo con la sinuosidad del cauce, se identifica que todas las medias obtenidas son bastante similares para cada uno de los grupos, sin embargo, si se observa con mayor detalle los grupos B-RC y E-RLC presentan una media de aproximadamente 1,2, con una mediana para B-RC de 1,15 y para E-RLC un valor igual a 1,17 lo que indica que los segmentos que conforman estos grupos representan ríos con tendencia a ser más “rectos”. Por el contrario, los grupos C-RCU y F-RBE alcanzan un valor promedio de aproximadamente 1,4. Mientras que estos grupos tienen una mediana que para el caso de C-RCU presenta un valor de 1,21 y el grupo F-RBE tiene 1,32 lo que permite deducir que los segmentos que conforman estos grupos presentan un mayor grado de curvatura.

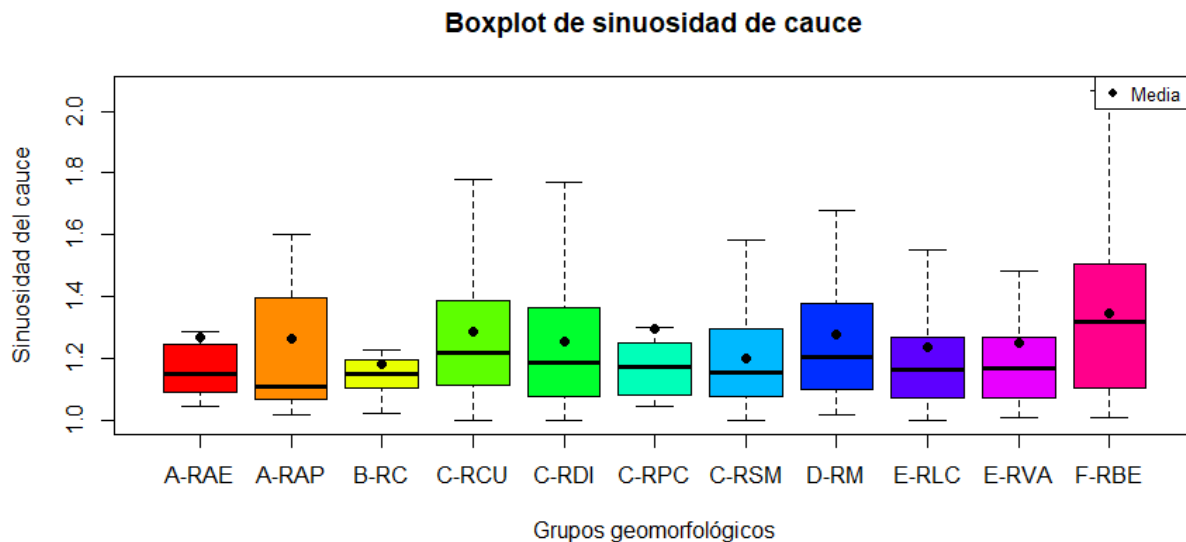


Figura 12: Diagrama de cajas sobre variable sinuosidad de cauce para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

De acuerdo con la Figura 13 correspondiente a la sinuosidad de banda de canal. En el caso de los grupos D-RM y F-RBE representan una media inferior con un valor de 2,01, con una mediana para ambos grupos igual a 2,02. Por otro lado, los grupos geomorfológicos con una media mayor de sinuosidad de banda de canal de aproximadamente 2,5 son los grupos A-RAP y E-RLC, y que también presentan una mediana para A-RAP igual a 2,03 y E-RLC 2,04, lo que indica que estos grupos se representan en ríos con canales más sinuosos.

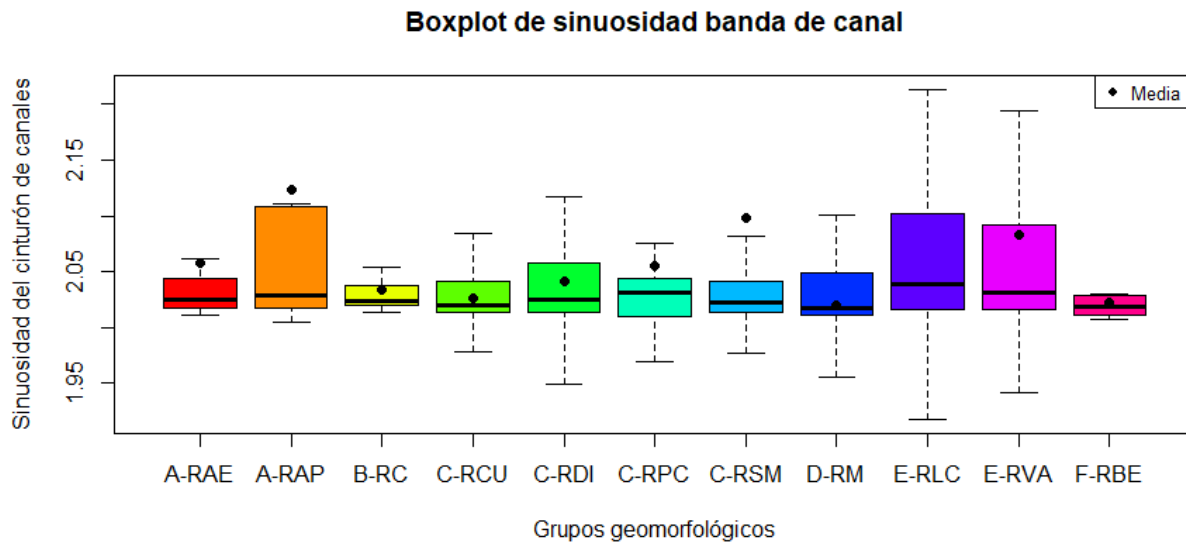


Figura 13: Diagrama de cajas sobre variable sinuosidad de banda de canal para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

La Figura 14 correspondiente a los diagramas de caja de longitud de banda de canal indica que el grupo E-RLC, es el grupo geomorfológico con un mayor valor promedio cercano a los 2800 m y que tiene una mediana igual a 2532,73 por lo que este grupo se representa en tramos más largos en comparación a los demás grupos dentro de la red hídrica. En cambio, el grupo correspondiente a F-RBE alcanza un valor promedio de 2250 m aproximadamente y tienen una mediana de 2382 m lo que representa una longitud de banda de canal de menor tamaño, reflejado por ríos que atraviesan secciones más cortas.

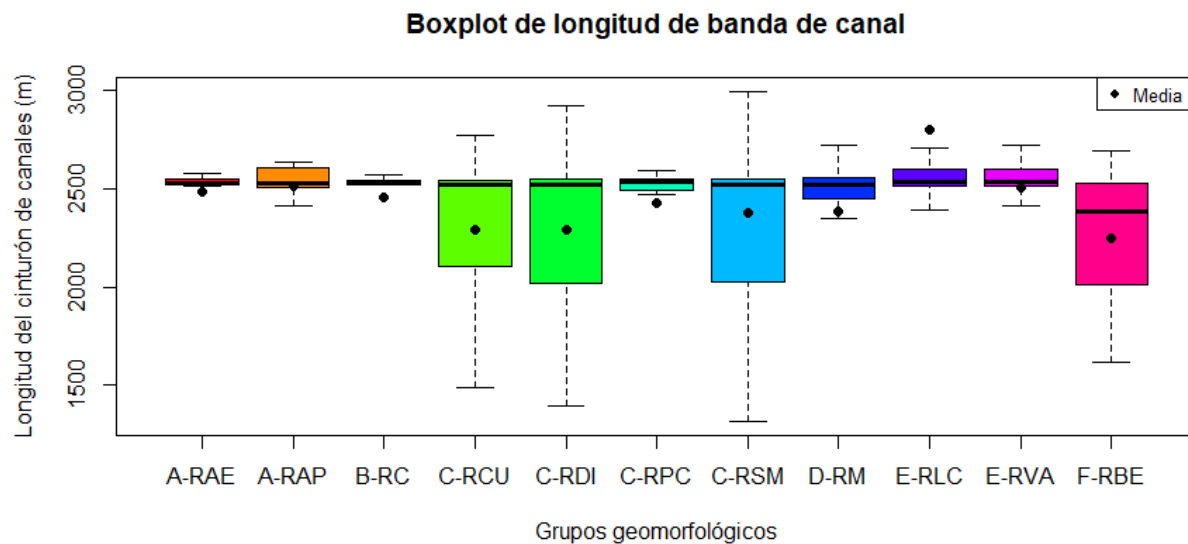


Figura 14: Diagrama de cajas sobre variable longitud de banda de canal para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

De acuerdo con la Figura 15 correspondiente a la presentación de la variable de pendiente derecha, se observa que los grupos con pendientes más pronunciadas son: C-RPC, A-RAP y B-RC de aproximadamente 15° , y tienen una mediana para el caso de C-RPC igual a $11,17^\circ$, A-RAP igual a $14,07^\circ$ y B-RC tiene una mediana igual a $16,12^\circ$. Sin embargo, también se presentan grupos una media inferior de la variable pendiente derecha, como el caso de los grupos D-RM y C-RDI alcanzando un valor promedio cercano a los 9° y que presentan una mediana para D-RM igual a $5,93$ y C-RDI con un valor igual a $7,15$ lo que indica que los ríos que representan estos grupos atraviesan zonas de transición.

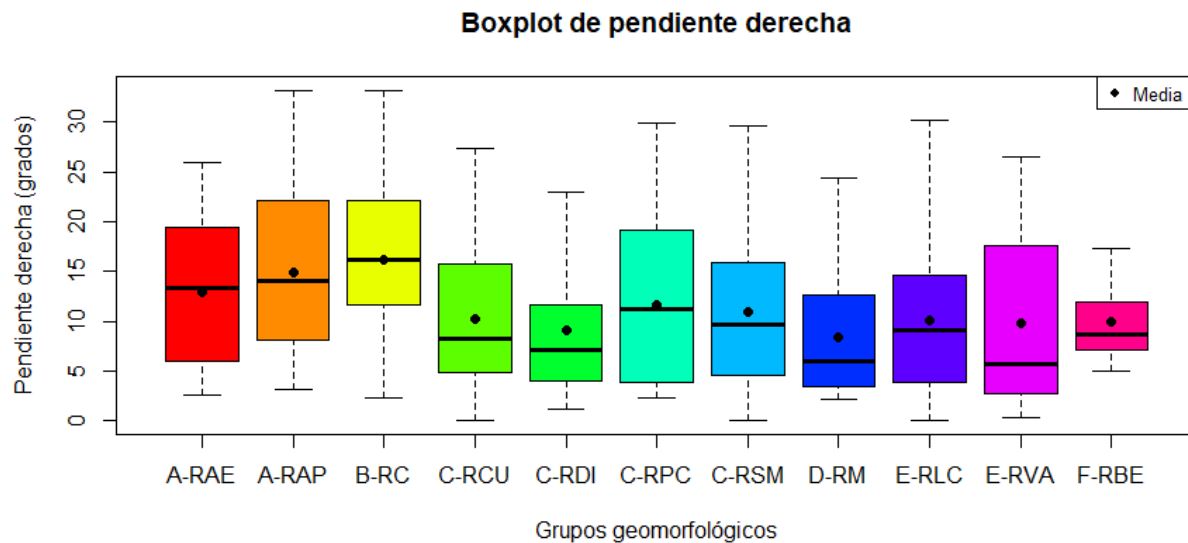


Figura 15: Diagrama de cajas sobre variable pendiente derecha para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

Con respecto a la Figura 16 correspondiente a los diagramas de pendiente izquierda se presenta que los grupos B-RC y A-RAP al igual que en la figura anterior, estos grupos representan una pendiente izquierda bastante pronunciada alcanzando una media de aproximadamente 16° y una mediana para B-RC igual a $14,33^\circ$ y para A-RAP igual a $15,40^\circ$. Por otro lado, los grupos D-RM y C-RDI nuevamente son los grupos que alcanzan un valor promedio menor en comparación a los demás grupos cercano a los 9° y tienen una mediana para el caso de D-RM igual a $6,64^\circ$ y el grupo C-RDI con una mediana igual a $7,34^\circ$ lo que indica que estos grupos se representan en zonas más amplias.

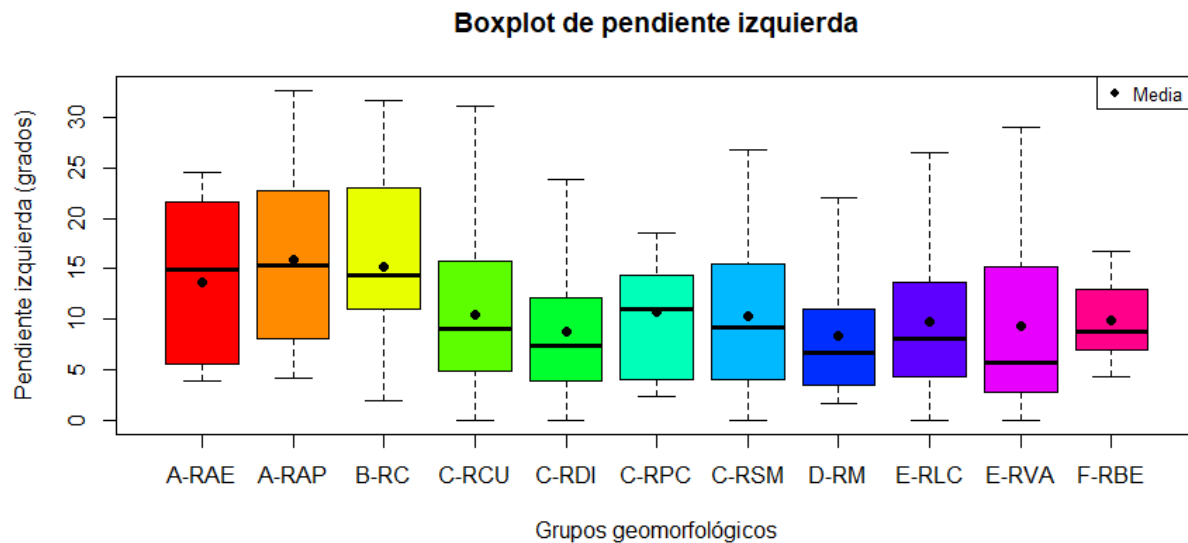


Figura 16: Diagrama de cajas sobre variable pendiente izquierda para los 11 grupos geomorfológicos. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, línea negra de la caja representa la mediana y el círculo negro corresponde a la media.

Fuente: Diagramas elaborados a partir del software R.

4.4. Distribución de los grupos geomorfológicos en la red hídrica.

La Figura 17 presenta la distribución espacial de los grupos geomorfológicos identificados a partir del análisis multivariado. Se observa una clara heterogeneidad en la distribución de los grupos dentro de la red hídrica, esto debido a que se representan en distintos sectores de la cuenca, abarcando desde las zonas altas de la cordillera hasta las áreas más bajas en la depresión intermedia y planicies litorales. Esta distribución espacial no solo da cuenta de la diversidad geomorfológica existente, sino que también permite identificar ciertas recurrencias en la distribución de algunos grupos, lo que demuestra la existencia de que existen grupos geomorfológicos que se repiten bajo condiciones similares.

Distribución espacial de grupos geomorfológicos

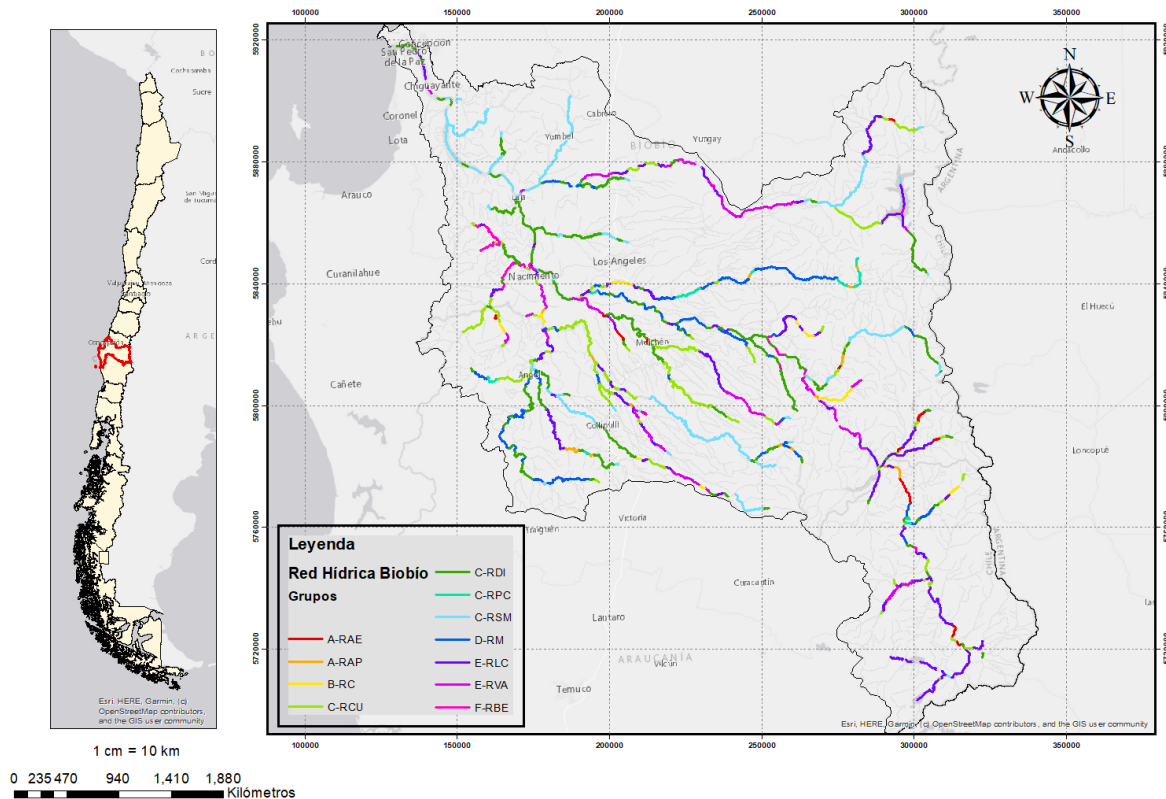


Figura 17: Cartografía correspondiente a la distribución espacial de los 11 grupos geomorfológicos en la red hídrica del Biobío.

Fuente: Elaboración partir del software ArcGis.

4.5. Caracterización global de los grupos geomorfológicos.

A continuación, se presentan las descripciones integradas de los grupos geomorfológicos identificados, considerando tanto su composición interna como los valores obtenidos a partir de los diagramas de caja. Esta información indica las principales diferencias y similitudes entre grupos, lo que refleja patrones geomorfológicos característicos que aportan a una mejor comprensión de la heterogeneidad presente en la red hídrica de la cuenca.

Ríos de Alta Pendiente (A-RAP): Grupo que se caracteriza por distribuirse en un 1,89% de los segmentos que componen la red hídrica, siendo el grupo con menor proporción. Es posible observar que tiene una distribución espacial en la Precordillera y en la depresión intermedia de la cuenca. En relación con estas características es posible observar que tienen una pendiente alta moderada (7,48) y una alta pendiente izquierda (15,89). Se puede destacar que los segmentos que conforman este grupo son influenciados por la cantidad de canales, logrando observar como promedio la formación de 1 canal en sus ríos (Figura 18).

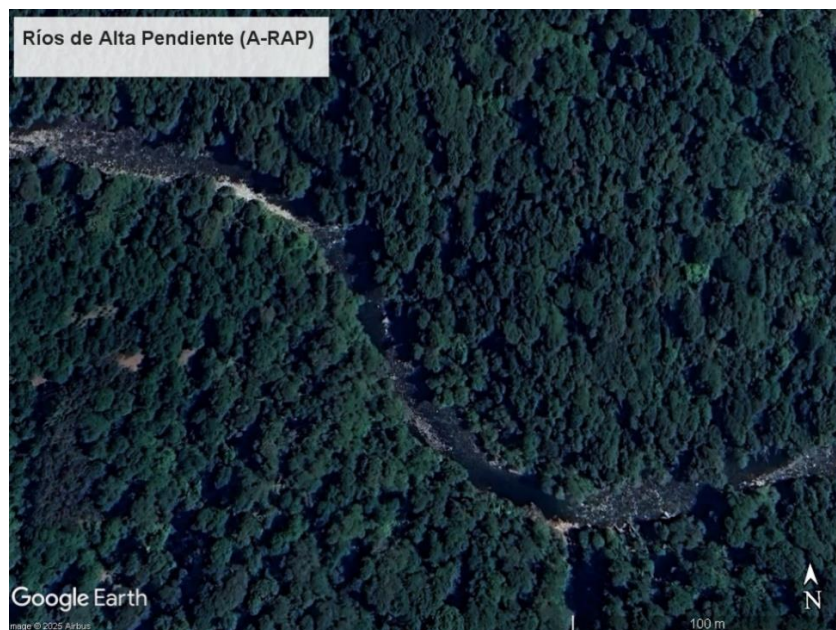


Figura 18: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico A-RAP en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos Confinados (B-RC): Grupo que se caracteriza por distribuirse en un 2,25% en la red hídrica. Tiene una distribución heterogénea, estando representados en menor proporción en la Cordillera de Los Andes y Precordillera, y en mayor proporción en la depresión intermedia. Presentan una sinuosidad moderada con un promedio de 1,18, no representa valles extensos, y sus ríos se aprecian por ser confinados. Los segmentos que componen este grupo son similares entre sí por la variable sinuosidad de banda de canal con un valor promedio (2,03) (Figura 19).



Figura 19: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico B-RC en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos Parcialmente Confinados (C-RPC): Grupo que tiene una representación del 1,99% en la red hídrica. La gran mayoría de sus segmentos se concentra en la Cordillera de Los Andes y algunas secciones de la depresión intermedia. Es posible identificar que sus ríos son parcialmente confinados. Por otro lado, sus segmentos son similares entre sí por la variable de longitud de banda de canal con un valor promedio de 2427,03 y cantidad de canales, destacando que en algunas secciones es posible identificar la formación de 2 canales (Figura 20).



Figura 20: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico C-RPC en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos Multicanal (D-RM): Este grupo geomorfológico abarca un 10,65% dentro de la red hídrica. Se representa mayoritariamente en la depresión intermedia en donde es posible observar la formación de hasta 7 canales. En comparación a otros grupos, este se caracteriza por tener una baja pendiente derecha e izquierda con valores promedios 8,31 y 8,35 respectivamente. Los segmentos fluviales que conforman este grupo en su mayoría son parcialmente confinados y se caracterizan por ser similares entre sí debido a la variable elevación con un valor promedio de 336,78 m.s.n.m. y cantidad de canales (promedio de 2 canales) (Figura 21).



Figura 21: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico D-RM en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos de Sinuosidad Moderada (C-RSM): Grupo geomorfológico que representa un porcentaje de distribución de 15,39% en la red hídrica. Es un grupo que tiene una distribución bastante heterogénea ya que se sitúa en la zona precordillerana, depresión central y en la cordillera de la costa, en esta última en la parte más baja de la cuenca es posible identificar segmentos con la formación de hasta 16 canales. Son grupos con una baja pendiente aguas abajo con un valor promedio de 5,13. Los segmentos que conforman este grupo son similares entre sí por ser parcialmente confinados y representar una sinuosidad moderada con un valor promedio de 1,20 (Figura 22).



Figura 22: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico C-RSM en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos de Depresión Intermedia (C-RDI): Grupo geomorfológico que presenta una mayor distribución dentro de la red hídrica con un porcentaje del 22,38%, concentrándose principalmente en la depresión intermedia hasta las planicies litorales. Sus ríos son parcialmente confinados y los segmentos que conforman este grupo son similares entre sí por variables como sinuosidad de banda de canal (2,04), longitud de banda de canal (2290,08 m) y razón entre ancho de valle y ancho del fondo del valle (5,84m) (Figura 23).

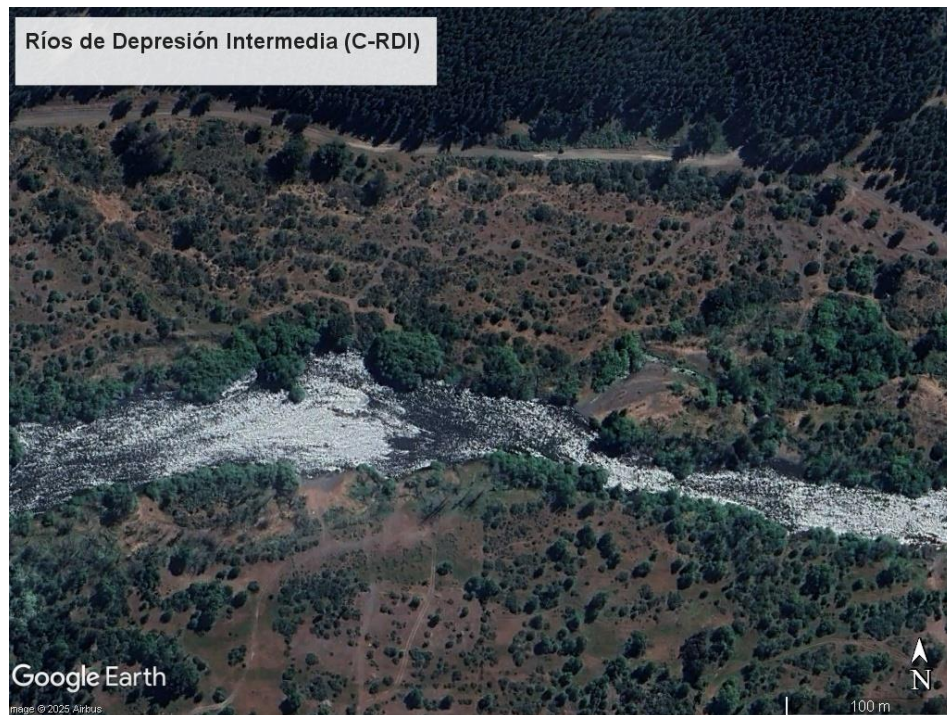


Figura 23: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico C-RDI en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos de Alta Elevación (A-RAE): Grupo geomorfológico que abarca un 1,93% dentro de la red hídrica. Se representa en la zona Andina de la cuenca por lo que es posible identificar altas elevaciones con un valor promedio de 1022,9 m.s.n.m, pero igual es posible visualizar este tipo de grupo en la depresión central. Son ríos parcialmente confinados y sus segmentos fluviales son similares entre sí debido a características como sinuosidad de banda de canal (2,06), longitud de banda de canal (2486,09 m) y ancho de canal (49,92 m) (Figura 24).



Figura 24: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico A-RAE en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos de Canal Único (C-RCU): Grupo geomorfológico que abarca un porcentaje dentro de la red hídrica del 14,74%. A nivel espacial es posible observar una distribución en la zona de la Cordillera de Los Andes y en la depresión intermedia. Este grupo se caracteriza por tener una mayor homogeneidad de sus segmentos respecto a variables de ancho de canal (40,76 m), la formación de canales únicos y ser parcialmente confinados (Figura 25).

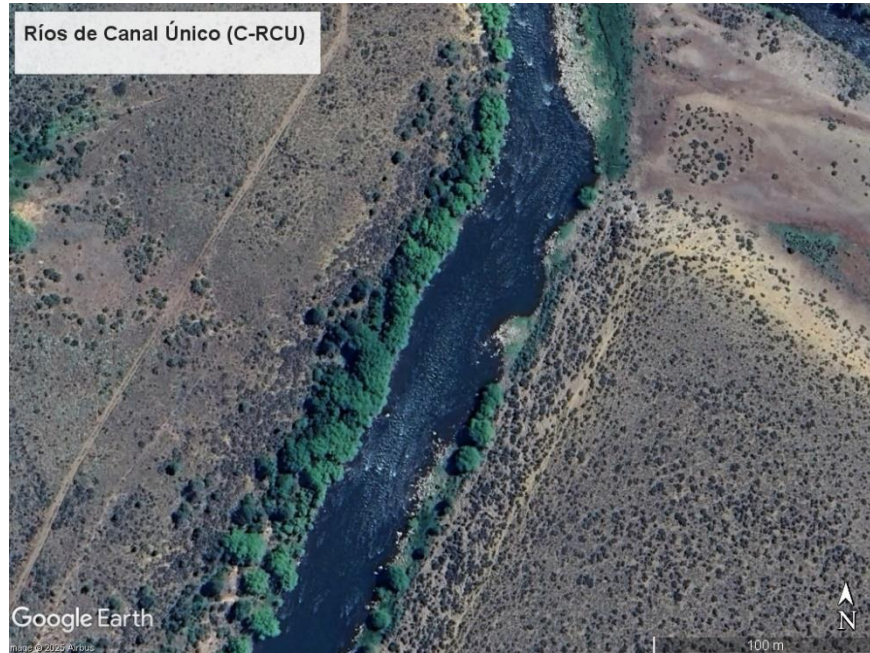


Figura 25: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico C-RCU en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos con Valles Amplios (E-RVA): Grupo geomorfológico que tiene un 9,95% de representación en la red hídrica. Si bien es un grupo que tiene una distribución espacial heterogénea, a diferencia de otros grupos los segmentos que lo componen predominan en la depresión intermedia de la cuenca. Es un grupo que se caracteriza por tener una mayor longitud de ancho de valle con un valor promedio de 1460,3 m. Sus segmentos se caracterizan por ser similares entre sí debido a variables como longitud de banda de canal (2504,90 m), sinuosidad de banda de canal (2,08) y elevación (419,39 m.s.n.m.) (Figura 26).



Figura 26: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico E-RVA en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos de Mayor Longitud de Canal (E-RLC): Este grupo abarca 16,66% de la red hídrica y tiene una distribución espacial heterogénea que comienza en la Cordillera de Los Andes y termina en las planicies litorales. Los ríos que representan este grupo geomorfológico tienen una mayor longitud de ancho de canal (262,20 m), como también sinuosidad de banda de canal (2,35) y longitud de banda de canal (2795,8 m). Este grupo está conformado por segmentos similares de acuerdo con sus características geológicas, con una variedad de tipos de rocas, destacando principalmente las secuencias sedimentarias (Figura 27).

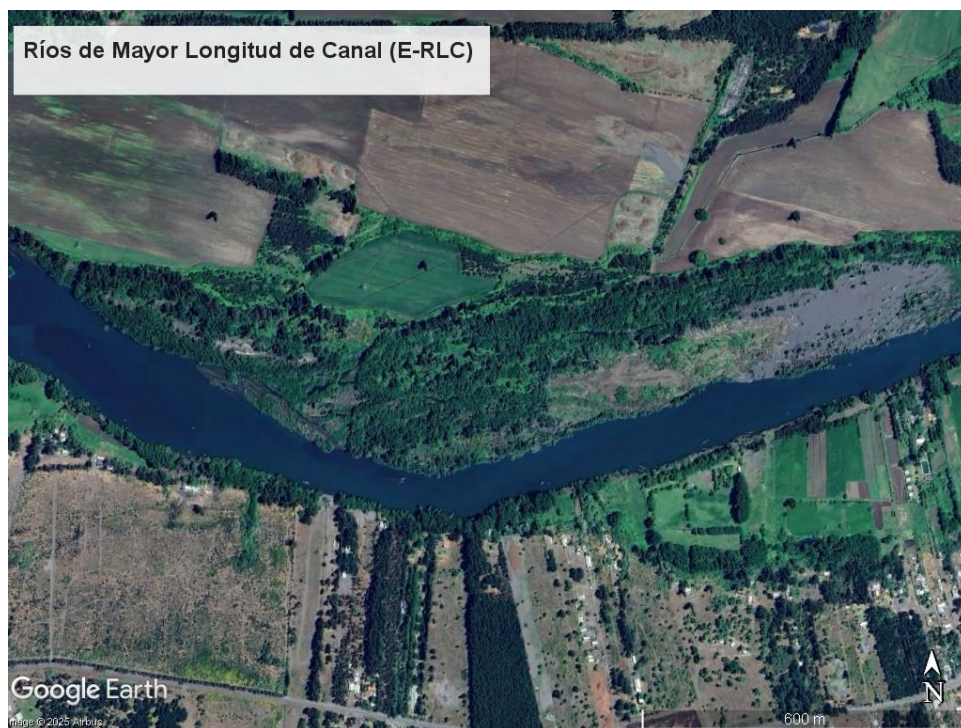


Figura 27: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico E-RLC en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.

Ríos de Baja Elevación (F-RBE): Grupo geomorfológico que se representa en un 2,17% en la red hídrica. Este grupo distribuido en menor proporción y concentrándose en la depresión intermedia. Es un grupo que se caracteriza por tener una baja elevación con un valor promedio de 183,52 m.s.n.m. y un bajo promedio en la variable de precipitación con un valor de 115,3 mm. Los segmentos que componen este grupo son similares en las características de ancho de valle y pendiente derecha, destacando que tiene una menor longitud de ancho de valle en comparación a otros grupos alcanzando un promedio de 499,4 m. Sus ríos se caracterizan por formar canales únicos y máximo 2 canales, como también representar una geología predominante en rocas intrusivas (Figura 28).



Figura 28: Captura fotográfica correspondiente a la representación del grupo geomorfológico F-RBE en la red hídrica del río Biobío.

Fuente: Elaboración a partir de Google Earth.



4.6. Geodiversidad en la red hídrica.

De acuerdo al análisis visual de la distribución de los grupos, se consideró realizar un reordenamiento de ríos, el cual se observa en la Figura 29. Se observa que el cauce principal, correspondiente al río Biobío considerado como un río extenso de 380 kilómetros aproximadamente (Valdovinos & Parra, 2006), se divide en tres secciones principales: La primera sección denominada “Biobío Alto”, considerada desde su nacimiento en el lago Galletué de la red hídrica hasta el embalse Angostura y la cual presenta una longitud de 215,13 km, luego “Biobío Medio” la cual inicia desde el embalse Angostura hasta el fin del río Queuco con una longitud de 137,73 km y finalmente “Biobío Bajo” con una longitud igual a 67,85 km la cual se compone desde el término del río Queuco hasta la desembocadura de la cuenca. Por otro lado, algunos cursos de agua que registraban escasa longitud se unieron a sus cauces principales tal como se menciona en el Anexo II, permitiendo obtener finalmente un número de 33 ríos representados en la red hídrica (Tabla 7). Esto también con el objetivo de evitar obtener valores que no fueran representativos en términos de longitud para los análisis posteriores como en el caso de los análisis de los índices de geodiversidad.

Reordenamiento de ríos de la red hídrica

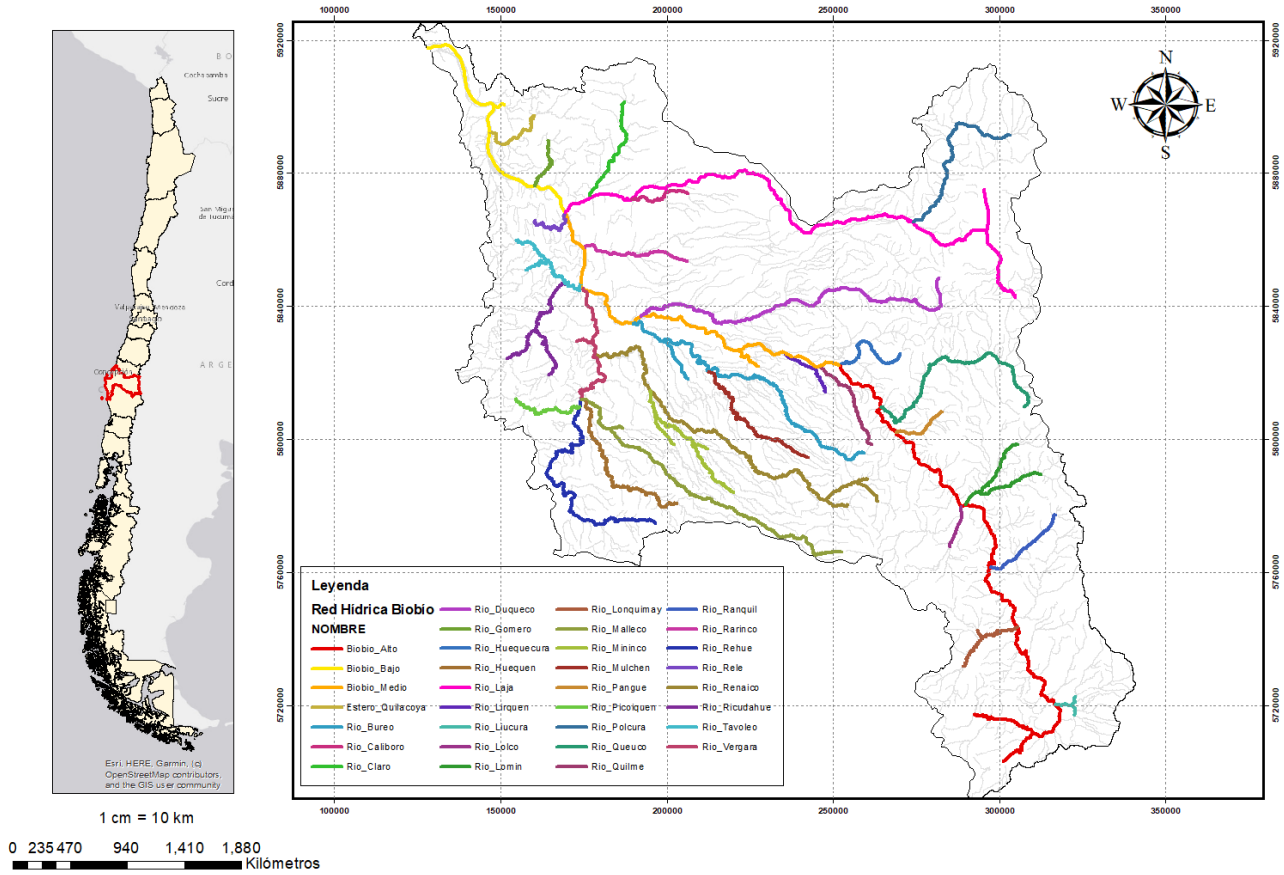


Figura 29: Cartografía correspondiente al reordenamiento de ríos presentes en la red hídrica, obteniendo un número definitivo de 33 ríos.

Fuente: Elaboración a partir del software ArcGis.



Tabla 7: Representación tabulada de los 33 ríos y su longitud (Km).

Nombre Río	Longitud (Km)	Nombre Río	Longitud (Km)
Estero Quilacoya	25,86	Río Malleco	120,61
Río Biobío Alto	215,13	Río Mininco	74,05
Río Biobío Bajo	67,85	Río Mulchén	63,02
Río Biobío Medio	137,73	Río Pangue	19,45
Río Bureo	133,17	Río Picoiquén	33,67
Río Caliboro	26,48	Río Polcura	61,68
Río Claro	38,28	Río Queuco	81,43
Río Duqueco	125,83	Río Quilme	35,34
Río Gomero	23,14	Río Ranquil	28,92
Río Huequecura	32,13	Río Rarínco	42,18
Río Huequen	71,46	Río Rehue	108,31
Río Laja	197,84	Río Rele	19,39
Río Lirquén	21,33	Río Renaico	150,96
Río Liucura	11,34	Río Ricudahue	69,65
Río Lolco	13,95	Río Tavoleo	54,27
Río Lomin	52,81	Río Vergara	55,95
Río Lonquimay	40,57		

Fuente: Elaborada a partir de información entregada por el Software R.



4.6.1. Geodiversidad alfa.

A partir de este índice de geodiversidad, es posible identificar la composición y estructura de cada uno de los ríos que conforman la red hídrica, de acuerdo con el número de grupos geomorfológicos y como se encuentran representados a lo largo de cada río. Los valores de geodiversidad alfa variaron entre 0 a 0,76 en los 33 ríos analizados. Esto destaca la variabilidad geomorfológica a través de los diferentes ríos y los segmentos que conforman cada uno de los grupos. En el anexo III, se entrega en detalle cada uno de los valores obtenidos.

En la Figura 30 se observa que el Estero Quilacoya y río Claro, presentan los valores de geodiversidad alfa (iguales a 0), ya que son representados por un único grupo geomorfológico. Esto sugiere que estos ríos están ubicados en secciones de alta uniformidad geomorfológica, lo que podría limitar la diversidad de hábitats y, por ende, la diversidad biológica asociada a estos ríos (Tukiainen et al., 2017).

Por otro lado, el río Biobío Alto mostró el valor de geodiversidad alfa de 0,76, el más alto, lo cual refleja una mayor complejidad en la composición del paisaje físico, lo que se traduce en una mayor variedad de condiciones ambientales disponibles para las especies (Gray, 2013; Hjort et al., 2015). La presencia de diferentes grupos geomorfológicos a lo largo de su curso ofrece una mayor diversidad de hábitats y características del paisaje (Crisp et al., 2022), influyendo en la riqueza de especies y en la estabilidad de los ecosistemas asociados a este río.

Los ríos con valores de geodiversidad alfa cercanos a la mediana (aproximadamente 0,50) son ríos con una distribución de grupos geomorfológicos más heterogénea debido a que presentan una variabilidad geomorfológica moderada. Entre estos ríos se destacan el río Lomin, río Polcura, río Picoiquén, río Huequecura y río Biobío Medio.

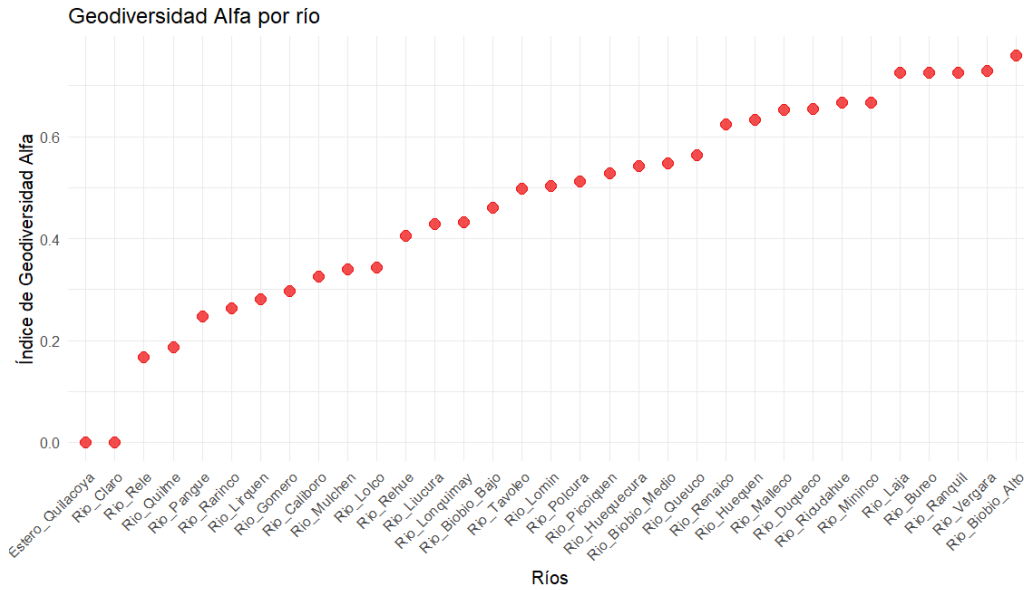


Figura 30: Representación gráfica de los valores de geodiversidad alfa obtenidos para los 33 ríos en orden ascendente.

Fuente: Elaboración a partir del Software R.

4.6.2. Geodiversidad beta.

Para el cálculo del índice de geodiversidad beta, se consideró el número de segmentos que conformaron cada uno de los grupos geomorfológicos en cada río. Esto se debe a que, en este caso, se requería contar con más de una muestra por río para calcular el análisis multivariado y evaluar las diferencias geomorfológicas a lo largo de la red hídrica.

Como se observa en la Figura 31, los valores del índice de geodiversidad beta variaron entre 0,16 y 2,15 (Anexo III), lo que refleja una considerable heterogeneidad en la composición geomorfológica de los ríos analizados. En el caso del río Claro y el Estero Quilacoya, ambos cursos de agua presentaron valores relativamente bajos de geodiversidad beta, lo que sugiere que la estructura fluvial en estos ríos es relativamente homogénea, dado que ambos solo representan el grupo C-RSM. Sin embargo, al observar con mayor detalle, se aprecia que el Estero Quilacoya, con una longitud total de 25,86 km, presenta un valor de geodiversidad beta de 0,23, ligeramente superior al del río Claro, que tiene una longitud de 38,38 km y un valor de geodiversidad beta de 0,16. Esta diferencia está relacionada con la proporción en la que cada

grupo está representado en cada río. En contraste, ríos como el río Bureo y el río Huequén, que alcanzan los valores más altos de geodiversidad beta, muestran una mayor variabilidad en la distribución de sus grupos geomorfológicos. Esto sugiere que estos ríos representan grupos geomorfológicos que están conformados segmentos con diversas longitudes, lo que permite inferir que, a lo largo de su recorrido, representa una mayor variedad en cuanto a sus características físicas y geomorfológicas. La variación espacial de estas características dentro de un mismo río constituye un indicador clave para entender los gradientes ecológicos y la diversidad de hábitats que se pueden encontrar en diferentes tramos (Gray, 2004; Zarnetske et al., 2019).

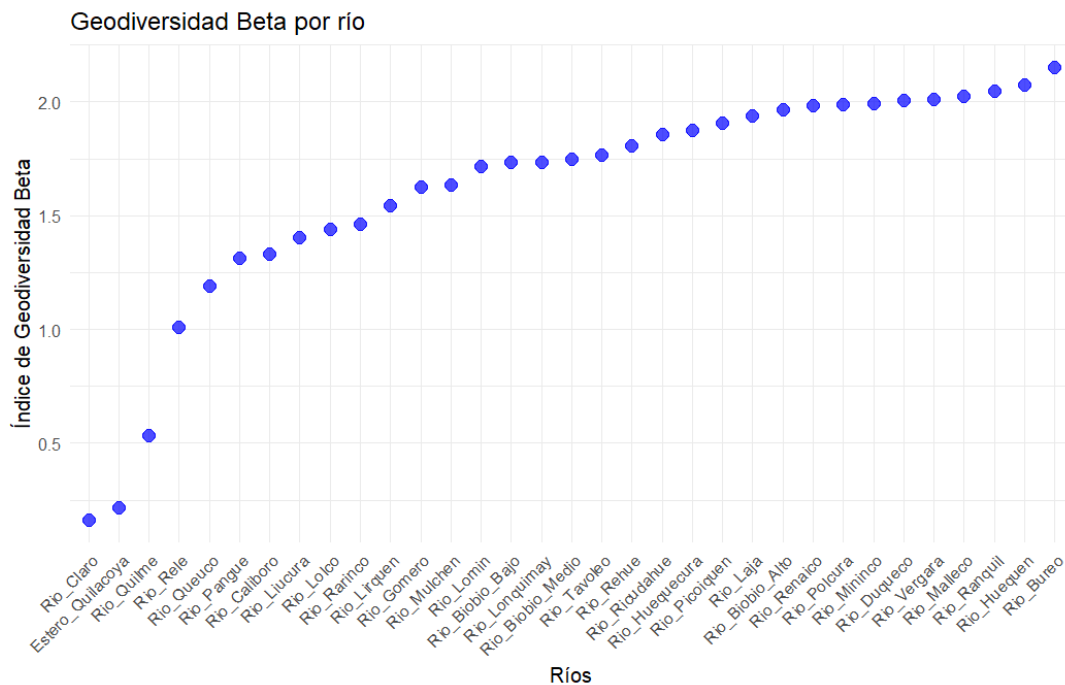


Figura 31: Representación gráfica de los valores de geodiversidad beta obtenidos para los 33 ríos en orden ascendente.

Fuente: Elaboración a partir del Software R.



4.6.3. Geodiversidad gamma.

Para el análisis del índice de geodiversidad gamma, se contabilizó el número total de grupos geomorfológicos presentes en la red hídrica, que correspondió a 11 y se representaron en diferentes proporciones en los ríos analizados. Sin embargo, se elaboró una gráfica que muestra un el valor de geodiversidad gamma para cada río, el cual se define según el número de grupos geomorfológicos presentes en cada uno de ellos (Anexo III). Este enfoque demuestra, al igual que con los demás índices, la variación en el número de grupos geomorfológicos, desde el río que representa solo un único grupo hasta el río que incluye el máximo número de grupos geomorfológicos.

En la Figura 32 se observa que los valores de geodiversidad gamma a nivel general varían considerablemente, pero a la vez igual se forman patrones de ríos que comparten el mismo número de grupos. Los valores de este índice mostraron un rango que va desde 1 hasta 10. La variación observada en los valores de geodiversidad gamma a nivel de río refleja diferencias importantes en la composición geomorfológica total de cada curso de agua. Esta medida, basada únicamente en la riqueza de grupos geomorfológicos presentes, permite identificar ríos con mayor capacidad de representar diversidad física a lo largo de su recorrido, lo cual es clave para la planificación de conservación. En este sentido, los ríos que albergan un mayor número de grupos geomorfológicos, como el río Biobío Alto y el Bureo, podrían ser considerados estratégicos para la protección de la geodiversidad fluvial. Por el contrario, aquellos con valores gamma bajos reflejan homogeneidad estructural y, potencialmente, menor resiliencia frente a cambios ambientales tal como se ha mencionado en los índices anteriores. La utilidad de este enfoque se ha demostrado también en estudios internacionales, donde la riqueza geomorfológica ha sido asociada a una mayor capacidad para sostener diversidad biológica a escala regional (Tukiainen et al., 2019).

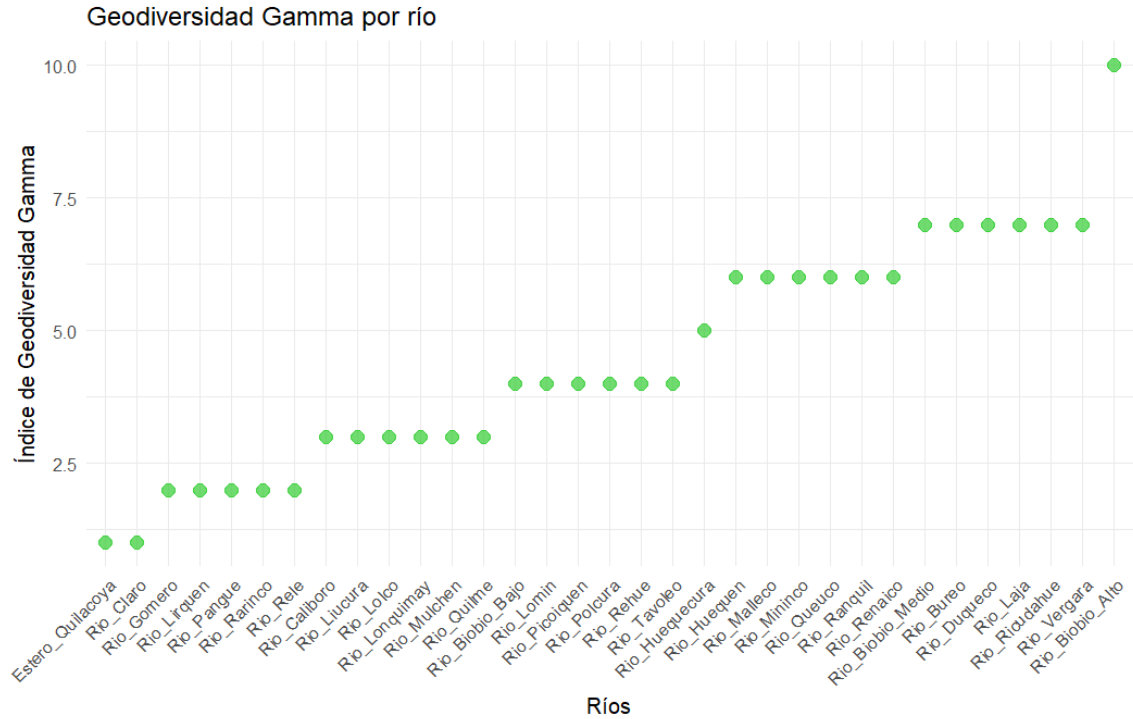


Figura 32: Representación gráfica de los valores de geodiversidad gamma obtenidos para los 33 ríos en orden ascendente.

Fuente: Elaboración a partir del Software R.

4.7. Relación entre los Índices de Geodiversidad y la longitud de los ríos.

En los tres gráficos que se presentan a continuación (Figuras: 33 a 35), se observa una clara tendencia de relación entre la longitud de los ríos y los índices de geodiversidad: alfa, beta y gamma. En todos los casos, la longitud de los ríos se muestra como un factor determinante en los valores de estos índices. La longitud es una variable clave que permite a los ríos albergar una mayor cantidad de grupos geomorfológicos, lo que se refleja directamente en el incremento de la geodiversidad observada en los ríos más largos.

En la Figura 33 correspondiente al índice de geodiversidad alfa, se puede ver que a medida que la longitud de los ríos aumenta, también lo hace el índice de geodiversidad. Esto indica que los ríos más largos tienden a tener una mayor capacidad para representar una diversidad de grupos geomorfológicos. En detalle se puede apreciar que el valor de R^2 indica que aproximadamente



el 36,9% de la variabilidad en los valores de geodiversidad alfa es explicada por la longitud de los ríos, por otro lado, el valor de p-value ($p= 0,0001$) indica una relación estadísticamente significativa, esto debido a que los valores de geodiversidad alfa de los ríos con mayor longitud demuestran una clara correlación con el número de grupos geomorfológicos representados en esos ríos. Para este caso es importante destacar que estos grupos geomorfológicos están compuestos por segmentos fluviales que varían en longitud, entre 1,5 y 3 km. Esto genera variabilidad en las características de los segmentos de un mismo grupo, ya que contribuye a una heterogeneidad dentro de cada río. Sin embargo, es fundamental resaltar que los valores de longitud de los segmentos no fueron determinados directamente en esta investigación, ya que los ríos fueron segmentados a partir de un modelo de elevación digital (DEM) y caracterizados a partir de un método semiautomatizado (Williams et al., 2013), lo que permite deducir que existe una cierta artificialidad en los resultados, ya que la variabilidad a nivel de río se ve directamente influenciada por las diferentes longitudes que componen a cada uno de los segmentos que conforman un grupo, más que por las variables geomorfológicas que caracterizan a cada uno de estos representados a lo largo de los ríos.

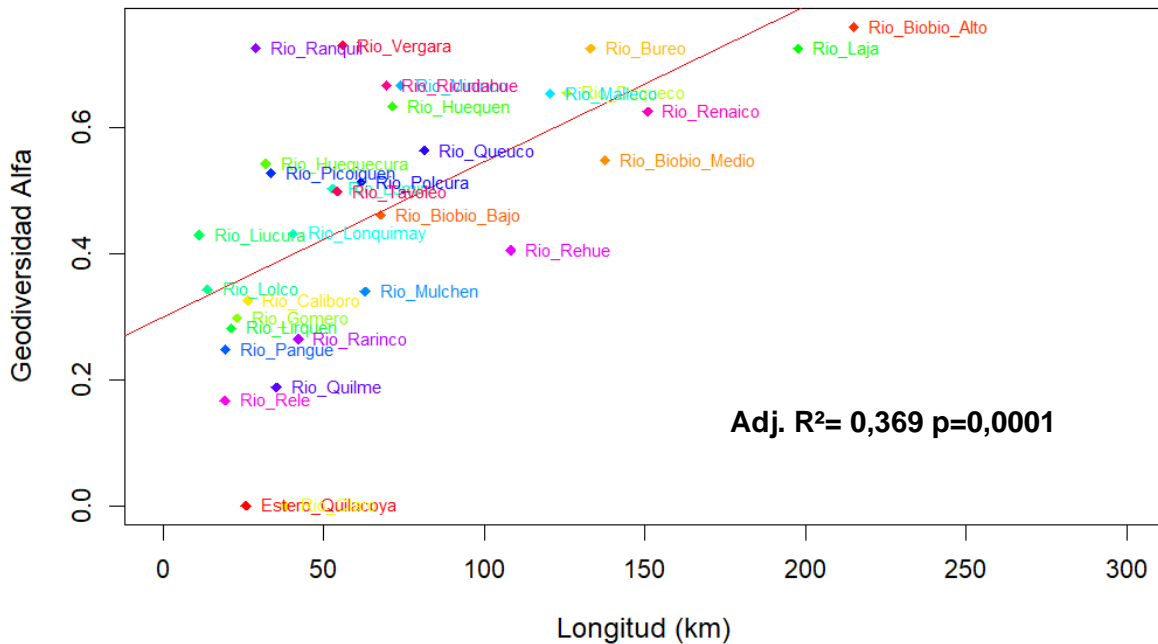


Figura 33: Representación gráfica de los valores de geodiversidad alfa y la longitud de cada uno de los ríos estudiados.

Fuente: Elaboración a partir del Software R.

Respecto a la Figura 34 correspondiente al gráfico del índice de geodiversidad beta, la tendencia es similar. Los ríos con mayor longitud presentan también valores más altos de geodiversidad beta, lo que indica que estos ríos tienen una mayor variabilidad entre sus grupos geomorfológicos. Nuevamente ocurre que los ríos que son más largos pueden albergar una mayor cantidad de grupos geomorfológicos, desencadenando que exista una tasa de recambio alta entre cada uno de los ríos que son estudiados. De igual forma es importante destacar que en el caso de la geodiversidad beta, el valor de R^2 es más bajo (0,183), lo que significa que solo el 18,3% de la variabilidad en los valores de geodiversidad beta es explicada por la longitud de los ríos, pero también es posible identificar el valor de p-value ($p = 0,007$) sigue siendo

significativo, ya que es inferior a 0,05, lo que implica que existe una relación estadísticamente significativa entre la longitud de los ríos y la geodiversidad beta.

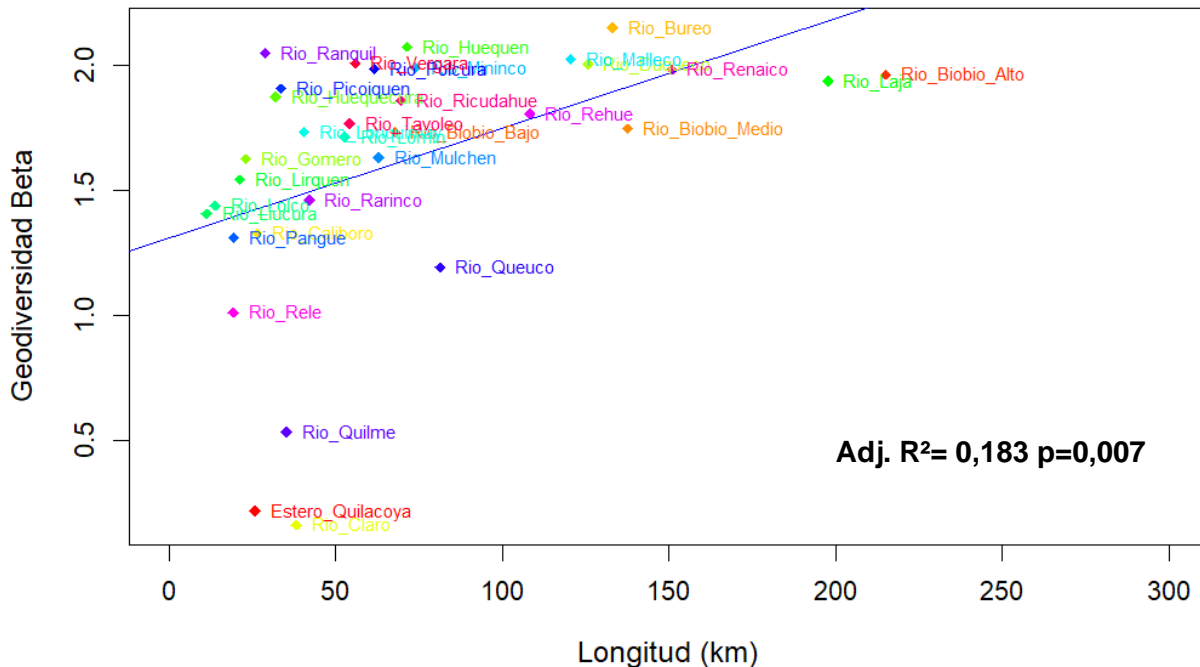


Figura 34: Representación gráfica de los valores de geodiversidad beta y la longitud de cada uno de los ríos estudiados.

Fuente: Elaboración a partir del Software R.

En la Figura 35 correspondiente a el gráfico de geodiversidad gamma, se confirma que los ríos más largos tienden a tener valores más altos en este índice. Este comportamiento refuerza la idea de la capacidad que tiene un río de mayor longitud para albergar diferentes grupos geomorfológicos desencadenando que exista una mayor geodiversidad y por ende un panorama geomorfológico más complejo, debido a que se puede deducir que incrementa el número de hábitats disponibles para las especies de agua dulce que habitan en estos ríos. Para este caso, se observa una fuerte relación entre la longitud de los ríos y la geodiversidad, con un valor de $R^2 = 0,600$, lo que explica el 60% de la variabilidad y posee un p-value ($p = 0,001$) que es extremadamente bajo, lo que es significativo y demuestra el impacto que genera la longitud sobre los ríos.

Para el caso de los tres índices de geodiversidad alfa, beta y gamma, se obtiene que los ríos más largos tienden a presentar altos valores. Esto sugiere que la longitud es un factor importante para explicar la variedad geomorfológica presente en los ríos ya que, a mayor recorrido, mayor es la probabilidad de que el río atraviese distintas formas del relieve y condiciones físicas. Esta diversidad de características a lo largo de un curso de agua puede traducirse en más espacios o ambientes distintos, lo que favorece el desarrollo de distintos tipos de hábitats. Un patrón similar fue observado en un análisis de cómo los grandes ríos de la cuenca del Plata, al recorrer largas distancias desde zonas tropicales hasta regiones templadas, permiten ampliar la distribución de especies y sostener una mayor diversidad, gracias a la variedad de paisajes que cruzan a lo largo de su trayecto (Arzamendia et al., 2015).

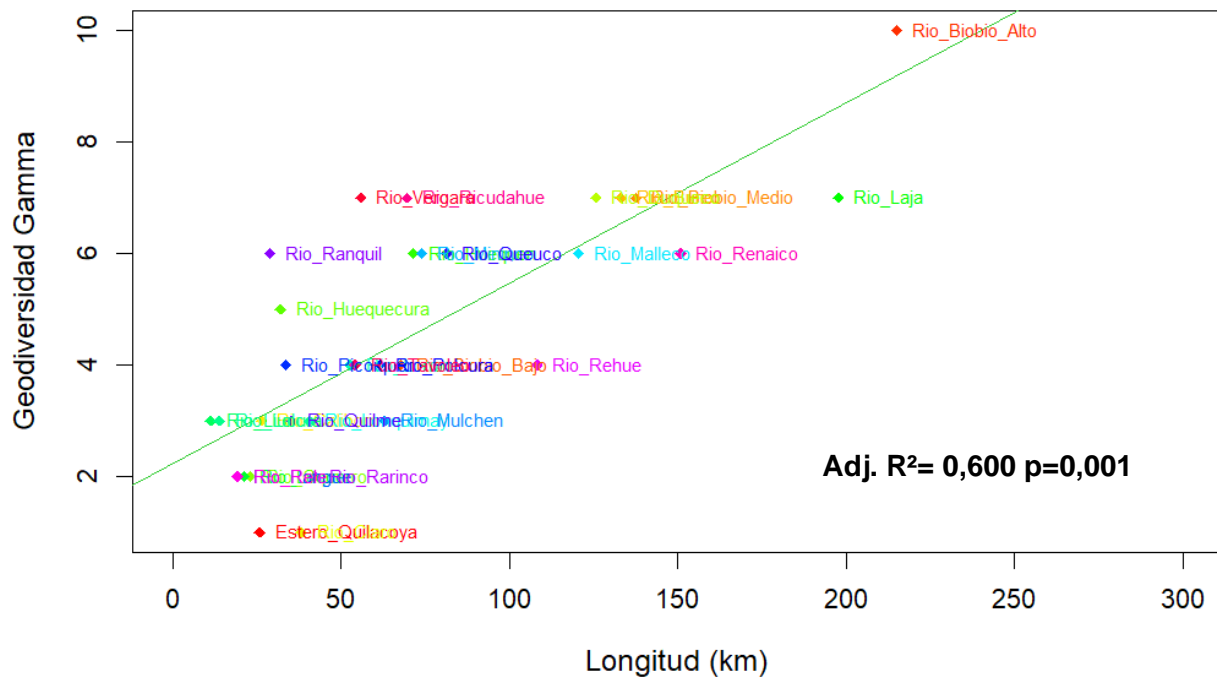


Figura 35: Representación gráfica de los valores de geodiversidad gamma y la longitud de cada uno de los ríos estudiados.

Fuente: Elaboración a partir del Software R.



4.8. Distribución de los valores de índice de geodiversidad alfa, beta y gamma.

En la Figura 36, se presentan tres diagramas de caja que muestran la distribución de los valores correspondientes a los índices de geodiversidad alfa, beta y gamma a lo largo de los ríos analizados. Se entrega una Tabla resumen en Anexo IV.

Para el índice de geodiversidad alfa, los valores varían entre 0 y 0,75. El primer cuartil se define en 0,33, lo que indica que el 25% de los ríos tienen un valor de geodiversidad alfa inferior a este valor. La mediana es 0,50, lo que sugiere que el 50% de los ríos tienen valores por debajo de este punto y el tercer cuartil se encuentra en 0,65, lo que significa que el 75% de los ríos tienen valores inferiores a este punto, lo que indica una geodiversidad relativamente alta en la mayoría de los ríos.

En el caso del índice de geodiversidad beta, los valores varían de 0,16 a 2,15. El primer cuartil se encuentra en 1,44, lo que indica que el 25% de los ríos tienen una geodiversidad beta inferior a este valor. La mediana es 1,75, lo que refleja que el 50% de los ríos tienen valores por debajo de este punto, y el tercer cuartil se encuentra en 1,99, lo que significa que el 75% de los ríos tienen una geodiversidad beta inferior a este valor. Esta distribución muestra que, en general, existe una alta tasa de recambio entre los ríos producto de la composición y representatividad de los grupos geomorfológicos en cada río.

En el caso del índice de geodiversidad gamma, los valores van de 1 a 10, mostrando una mayor dispersión que en los otros dos índices presentados con anterioridad, esto debido a que se identifica el número exacto de grupos geomorfológicos por río. El primer cuartil se encuentra en 3, lo que indica que el 25% de los ríos presentan una geodiversidad gamma inferior a este valor. La mediana es 4, lo que sugiere que el 50% de los ríos tienen una geodiversidad gamma inferior a este valor y el tercer cuartil se encuentra en 6, lo que significa que el 75% de los ríos tienen una geodiversidad gamma inferior a este valor. Esta distribución sugiere que los ríos con valores más altos de geodiversidad gamma son aquellos que representan una mayor cantidad de grupos

geomorfológicos y, por lo tanto, presentan una geodiversidad más compleja lo que podría generar una mayor diversidad de hábitats y, por ende, una mayor capacidad para soportar diferentes especies de agua dulce.

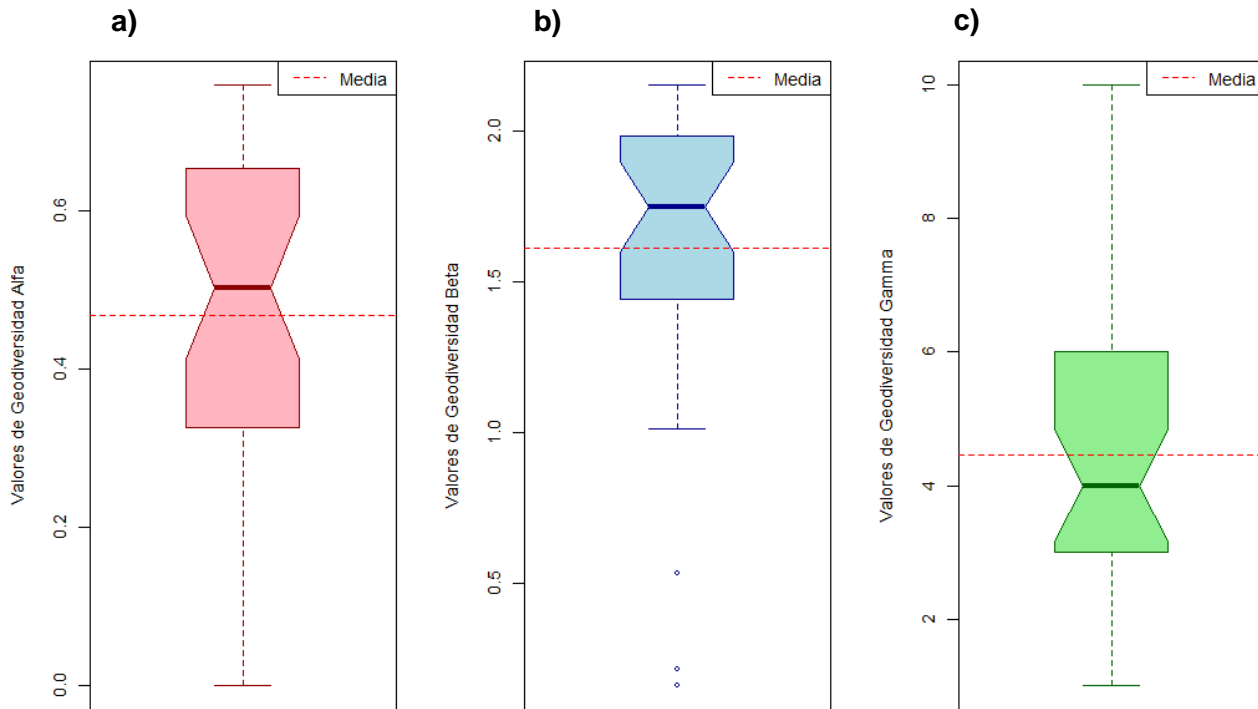


Figura 36: Diagramas de cajas sobre la distribución de los valores de índices de geodiversidad. a) Distribución de geodiversidad alfa. b) Distribución de geodiversidad beta. c) Distribución de geodiversidad gamma. El extremo inferior del bigote representa el valor mínimo y el extremo superior el valor máximo, cada caja tiene su respectiva línea de un color determinado representando la mediana y la línea punteada corresponde a la media.

Fuente: Elaboración a partir del Software R.



4.9. Categorización de ríos de acuerdo con índices de geodiversidad alfa y beta.

A partir de la distribución de los valores de los índices de geodiversidad y la definición de sus cuartiles, se generó una categorización de alfa y beta y de acuerdo con sus cuartiles, en la Figura 37 se representa una categorización para la geodiversidad dentro de la red hídrica. Para geodiversidad alfa y beta, los ríos son clasificados en tres categorías: alta, media y baja. Aquellos ríos con valores superiores a 0,65 son clasificados como alta geodiversidad alfa, los ríos con valores entre 0,33 y 0,65 son clasificados como media y los ríos con valores inferiores a 0,33 son clasificados como baja geodiversidad alfa. En cuanto a geodiversidad beta, los ríos con valores superiores a 1,98 son clasificados como alta geodiversidad beta, los ríos con valores entre 1,44 y 1,98 son clasificados como media, y aquellos ríos con valores inferiores a 1,44 son clasificados como baja geodiversidad beta.

De acuerdo con la categorización de geodiversidad alfa, los ríos con alta geodiversidad que se destacan son los siguientes: río Biobío Alto, Río Vergara, río Ranquil, río Bureo y río Laja, debido que al tener valores superiores a 0,65, presentan una mayor heterogeneidad geomorfológica a lo largo de su curso, al existir una mayor heterogeneidad implica que la presencia de diversos grupos geomorfológicos sea un factor determinante en la configuración de la biodiversidad, ya que proporciona una variedad de condiciones físicas que favorecen la coexistencia de diferentes especies (Tukiainen et al., 2017).

Por otro lado, los ríos con geodiversidad alfa media, aquellos con valores entre 0,33 y 0,65, incluyen ríos como: río Mulchén, río Lolco, río Rehue, río Liucura, río Lonquimay, entre otros. Estos ríos muestran una diversidad geomorfológica moderada, lo que sugiere que, aunque tienen variabilidad de acuerdo con sus grupos geomorfológicos, la diversidad no es tan alta como en los ríos de geodiversidad alfa alta.

Finalmente, los ríos con baja geodiversidad alfa, aquellos con valores menores a 0,33, incluyen a: Estero Quilacoya, río Claro, río Quilme, río Pangue, entre otros. Estos ríos presentan una



menor diversidad geomorfológica, con un valor por debajo del primer cuartil, lo que indica una estructura fluvial relativamente homogénea a lo largo de su recorrido.

Respecto a la categorización de geodiversidad beta, los ríos con alta geodiversidad beta (valores superiores a 1,98) incluyen a: río Duqueco, río Vergara, río Malleco, río Ranquil, río Huequen, río Bureo, entre otros. Estos ríos presentan una alta variabilidad entre ellos de acuerdo con la distribución longitudinal de sus grupos geomorfológicos.

Por otro lado, los ríos con geodiversidad beta media (valores entre 1,44 y 1,98) incluyen a: río Biobío Bajo, río Biobío Medio y río Biobío Alto. También existen otros cursos de agua, como por ejemplo: río Tavoleo, río Huequecura y río Laja. Lo que permite inferir que todos estos ríos muestran una variabilidad moderada entre sus grupos geomorfológicos.

Dentro de los ríos con baja geodiversidad beta (valores inferiores a 1,44) se identifican: Estero Quilacoya, río Rele, río Queuco, entre otros. Estos ríos se caracterizan por representar una diversidad geomorfológica más limitada.

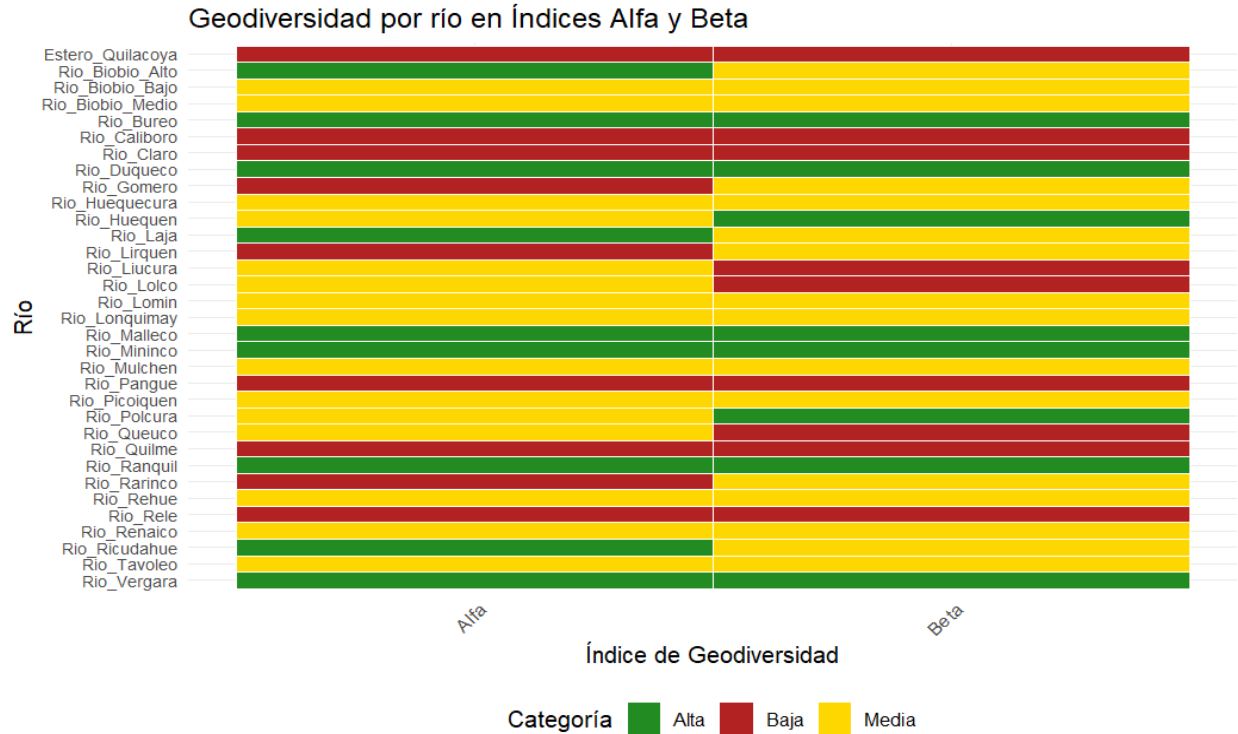


Figura 37: Categorización de geodiversidad alfa y beta, para los 33 ríos de la red hídrica. En color verde se representan los ríos con alta geodiversidad, en color amarillo los ríos con geodiversidad media y en color rojo los ríos con baja geodiversidad.

Fuente: Elaboración a partir del software R.

4.10. Distribución espacial de los ríos de acuerdo con su categorización de geodiversidad alta, media y baja.

En el mapa de geodiversidad alfa (Figura 38), se identifican los ríos con geodiversidad alta (representados en verde), los cuales se concentran principalmente en sectores de alta montaña y en parte de la depresión intermedia. Estos ríos se caracterizan por contener múltiples grupos geomorfológicos a lo largo de su recorrido, lo que refleja una alta heterogeneidad del paisaje físico. La diversidad en la estructura geomorfológica influye directamente en la cantidad y calidad de hábitats disponibles, favoreciendo la presencia de una mayor diversidad biológica (Parks & Mulligan, 2010). Los ríos que atraviesan zonas con relieves complejos tienen mayor potencial ecológico, ya que el entorno físico actúa como soporte para múltiples funciones ecosistémicas, incluyendo la retención de nutrientes, el refugio para especies y la regulación hídrica (Encalada, 2010).

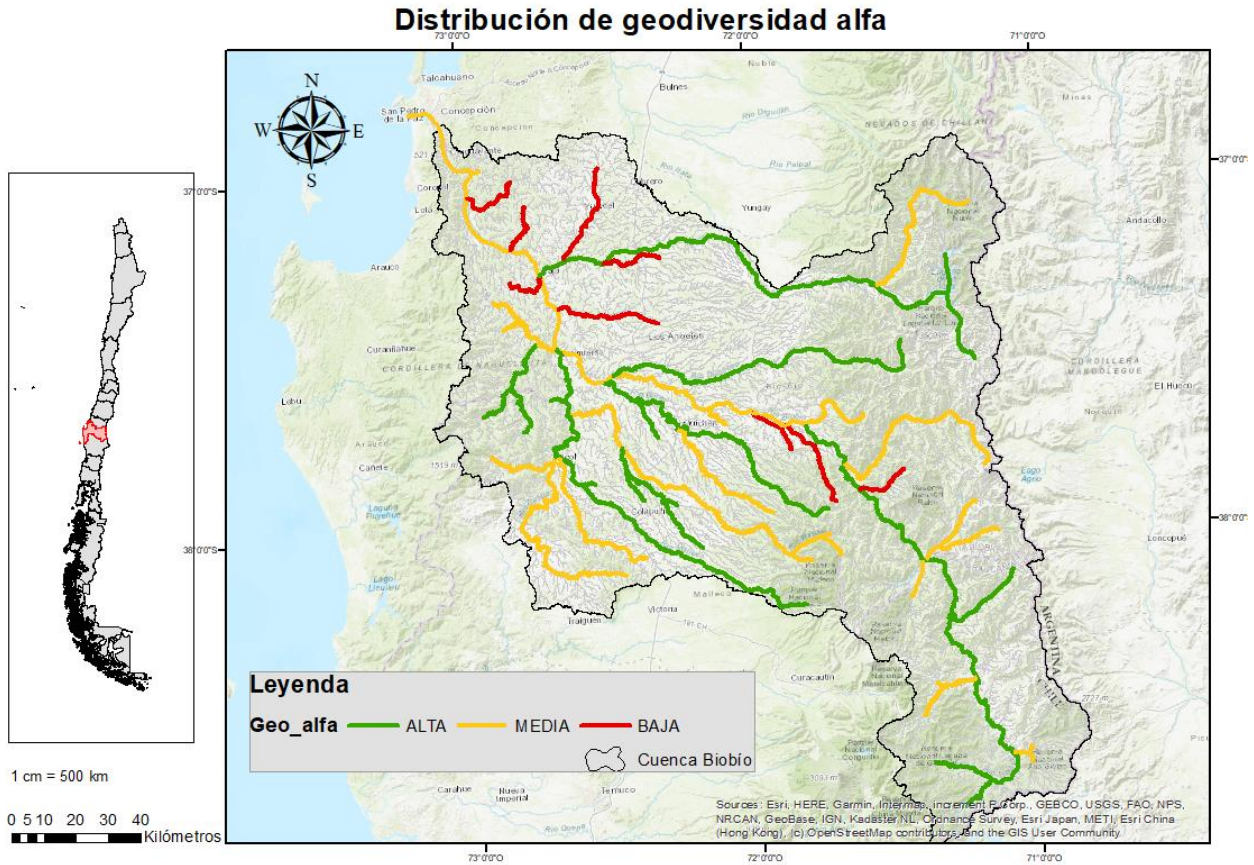


Figura 38: Cartografía correspondiente a la distribución espacial de la geodiversidad alfa, de acuerdo con las categorías alta, media y baja para los 33 ríos de la red hídrica.

Fuente: Elaboración a partir del software ArcGis.

En el mapa de geodiversidad beta (Figura 39), el patrón es similar. Los ríos con alta geodiversidad beta (también en verde) se centran en la zona de la depresión intermedia de la cuenca y se caracterizan por tener una mayor tasa de recambio, en comparación a otros cursos de agua. Esta variabilidad es esencial porque crea diferentes tipos de hábitats que pueden favorecer la presencia de diversas especies. Lo que permite inferir que, en términos ecológicos, una alta geodiversidad beta significa que estos ríos tienen una mayor capacidad para sustentar diferentes comunidades biológicas debido a la diversidad de condiciones geomorfológicas que ofrecen (Tukiainen et al., 2022).

A partir de la observación en detalle de estos mapas, es claro que los ríos con alta geodiversidad, tanto alfa como beta, deben ser priorizados para la conservación y gestión ecológica, ya que



estos ríos no solo son importantes para la conservación de la geodiversidad, sino que también tienen un gran potencial de albergar una mayor diversidad de especies, lo que les otorga un valor ecológico excepcional (Boothroyd & McHenry, 2019).

La geodiversidad alfa y beta revelan que los ríos con una alta geodiversidad para ambos casos presentan una mayor capacidad para mantener funciones ecológicas esenciales y, por lo tanto, deben ser considerados prioritarios para la conservación. La integración de criterios de geodiversidad en la toma de decisiones ambientales permite identificar secciones que ofrecen no solo refugio para especies biológicas, sino también resiliencia frente a futuras alteraciones del entorno. Esta perspectiva es especialmente útil en contextos de cambio climático, donde conservar sistemas físicamente diversos puede facilitar la adaptación de la biodiversidad a nuevas condiciones ambientales (Anderson et al., 2015).

Por otro lado, los ríos con geodiversidad media o baja (coloreados en amarillo y rojo, respectivamente) también requieren atención desde el punto de vista de la gestión ambiental. Su baja diversidad geomorfológica podría estar vinculada a causas naturales, como una configuración morfológica más homogénea, o a factores antrópicos, como la fragmentación, encauzamiento o modificación artificial de sus tramos (Valenzuela-Aguayo et al., 2020). En estos casos, se recomienda aplicar enfoques de restauración geomorfológica que recuperen la conectividad estructural del paisaje fluvial (Fullerton et al., 2010; Miller et al., 2010). Al restaurar la complejidad física de un río no solo mejora su estructura geomorfológica, sino que también facilita la recuperación de procesos ecológicos fundamentales, como el transporte de nutrientes, la creación de hábitats diversos y el restablecimiento de condiciones ambientales adecuadas para las especies más sensibles (Tukiainen & Bailey, 2023).

Este estudio proporciona una base sólida para comprender y conservar los procesos naturales que moldean los ecosistemas fluviales. Su aplicación es clave para mantener la integridad de estos sistemas y fortalecer su capacidad de adaptación ante desafíos ambientales futuros, como

el cambio climático y la degradación del paisaje. La integración de la geodiversidad en las estrategias de conservación y manejo sostenible de los ecosistemas fluviales es esencial para garantizar su resiliencia y funcionalidad a largo plazo (Chakraborty & Gray, 2020; de Paula Silva et al., 2021). La variabilidad geomorfológica de la cuenca del río Biobío no solo sustenta una rica biodiversidad, sino que también influye directamente en los servicios ecosistémicos que estos ríos proporcionan. Al reconocer y valorar la geodiversidad, se establecen propuestas de bases para desarrollar políticas y acciones de restauración que promuevan la sostenibilidad ambiental en Chile, asegurando la protección tanto de los paisajes físicos como de los procesos ecológicos asociados (Carcavilla et al., 2008; Comer et al., 2015).

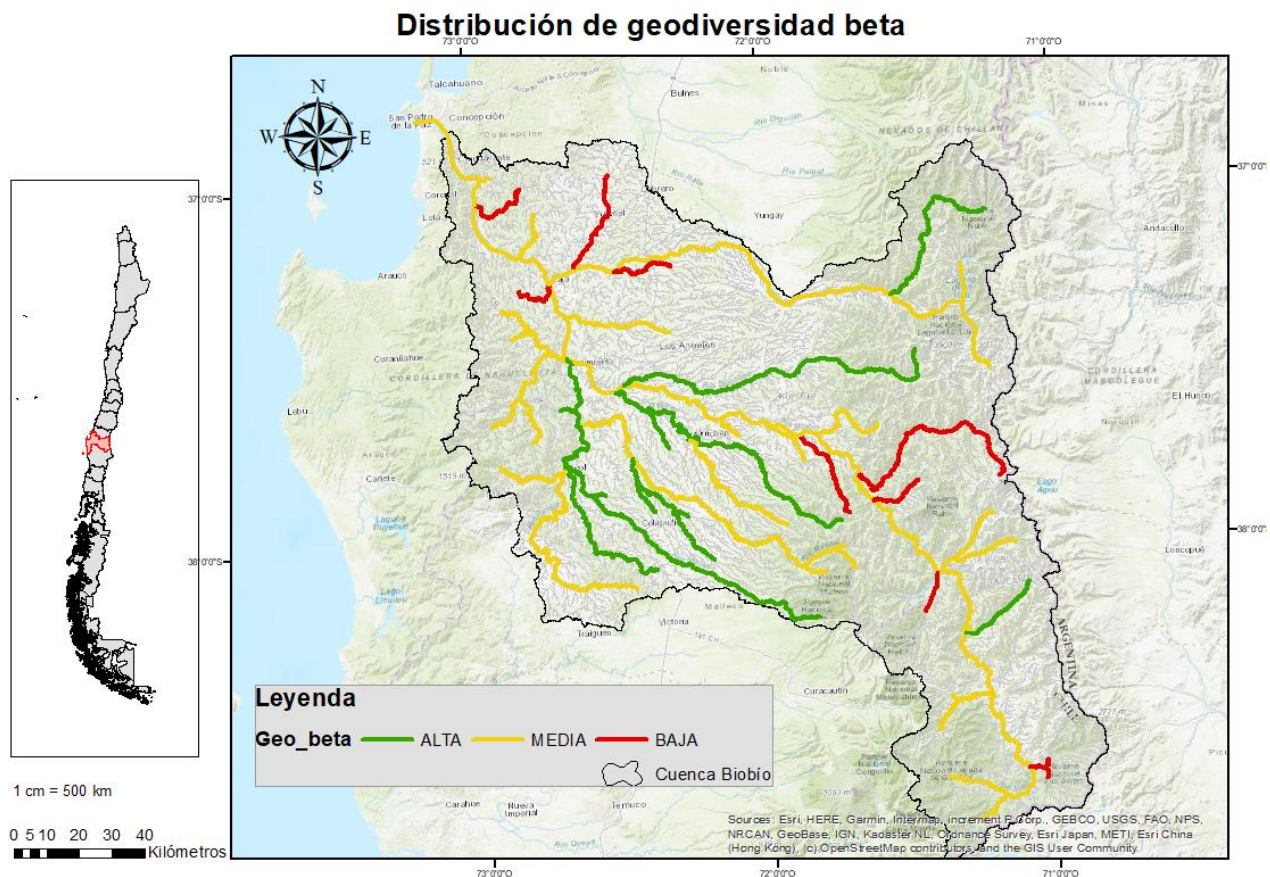


Figura 39: Cartografía correspondiente a la distribución espacial de la geodiversidad beta, de acuerdo con las categorías alta, media y baja para los 33 ríos de la red hídrica.

Fuente: Elaboración a partir del software ArcGis.



5. CONCLUSIÓN

La evaluación de la geodiversidad en la cuenca del río Biobío permitió identificar patrones espaciales y niveles de diversidad geomorfológica en los principales ríos de la red hídrica. Los resultados evidenciaron que la geodiversidad alfa, beta y gamma son herramientas efectivas para evaluar la heterogeneidad ambiental y comprender la complejidad de los paisajes fluviales.

Los ríos con alta geodiversidad, como el río Biobío Alto, el río Bureo y el río Duqueco, demostraron una mayor capacidad para sostener diversos hábitats, lo que resalta su relevancia ecológica y su potencial para la conservación. La presencia de múltiples grupos geomorfológicos en estos ríos indica una mayor oferta de nichos ecológicos y una mayor resiliencia frente a cambios ambientales. Por el contrario, los ríos con baja geodiversidad, como el Estero Quilacoya y el río Claro, reflejan una menor heterogeneidad geomorfológica, lo que podría limitar la diversidad biológica.

La distribución espacial de la geodiversidad mostró una clara tendencia de mayor diversidad en zonas de alta montaña y en la depresión intermedia. Esto subraya la influencia del relieve y los procesos geomorfológicos en la configuración del paisaje fluvial. Asimismo, la relación positiva entre la longitud de los ríos y sus niveles de geodiversidad sugiere que los sistemas fluviales más extensos poseen una mayor capacidad para sostener una diversidad de formas y procesos geomorfológicos.

En términos de gestión ambiental, este estudio destaca la importancia de incorporar la geodiversidad en la planificación territorial y las estrategias de conservación. Priorizar los ríos con alta geodiversidad no solo contribuye a la preservación de la diversidad geomorfológica, sino que también fortalece la resiliencia de los ecosistemas acuáticos. Además, los ríos con geodiversidad media y baja pueden beneficiarse de medidas de restauración ecológica que promuevan la recuperación de procesos geomorfológicos y la conectividad de hábitats.



Finalmente, se puede concluir que la integración de la geodiversidad en la toma de decisiones ambientales es fundamental para garantizar la conservación de los ecosistemas fluviales y la sostenibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Biobío.



6. REFERENCIAS

- Alsbach, C. M. E., Seijmonsbergen, A. C., & Hoorn, C. (2024). Geodiversity in the Amazon drainage basin. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 382(2269). <https://doi:10.1098/rsta.2023.0065>
- Anderson, M. G., Comer, P. J., Beier, P., Lawler, J. J., Schloss, C. A., Buttrick, S., . . . Faith, D. P. (2015). Case studies of conservation plans that incorporate geodiversity. *Conservation Biology*, 29(3), 680-691. <https://doi:10.1111/cobi.12503>
- Aqeel Abbas Al-Zubaidi, M. K. M. y. M. J. R. (2017). The importance of geodiversity on the animal diversity in Huwaiza Marsh and the adjacent areas, southeastern Iraq. . *Bulletin of the Iraq Natural History Museum*, 14.
- Arthington, A. H., Naiman, R. J., McClain, M. E., & Nilsson, C. (2010). Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities. *Freshwater Biology*, 55(1), 1-16. <https://doi:10.1111/j.1365-2427.2009.02340.x>
- Arzamendia, V., Giraudo, A. R., & Bellini, G. P. (2015). Biogeographical relationships of the large rivers of the Plata Basin based on snake assemblages. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, 86(3), 674-684. <https://doi:10.1016/j.rmb.2015.06.006>
- Bailey, J. J., Boyd, D. S., Hjort, J., Lavers, C. P., & Field, R. (2017). Modelling native and alien vascular plant species richness: At which scales is geodiversity most relevant? *Global Ecology and Biogeography*, 26(7), 763-776. <https://doi.org/10.1111/geb.12574>
- Baptist, M. (2001). Review on Biogeomorphology in Rivers: Processes and Scales.
- Boothroyd, A., & McHenry, M. T. (2019). Old Processes, New Movements: The Inclusion of Geodiversity in Biological and Ecological Discourse. *Diversity-Basel*, 11(11). <https://doi:10.3390/d11110216>
- Brierley, G., Fryirs, K., Outhet, D., & 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. [https://doi:10.1016/s0143-6228\(01\)00016-9](https://doi:10.1016/s0143-6228(01)00016-9)
- CADE-IDEPE. (2004). Diagnóstico y Clasificación de cursos y cuerpos de agua según Objetivos de Calidad (Ministerio del Medio Ambiente, Issue).
- Chakraborty, A., & Gray, M. (2020). A call for mainstreaming geodiversity in nature conservation research and praxis. *Journal for Nature Conservation*, 56, 125862. <https://doi.org/10.1016/j.inc.2020.125862>
- Church, M. (2007). 1 Multiple scales in rivers. In H. Habersack, H. Piégay, & M. Rinaldi (Eds.), *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 11, pp. 3-28): Elsevier.
- Crisp, J. R., Ellison, J. C., Fischer, A., & Tan, J. S. (2022). Geodiversity inclusiveness in biodiversity assessment. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 0(0), 03091333221122292. <https://doi:10.1177/03091333221122292>
- Crisp, M. D., Laffan, S., Linder, H. P., & Monro, A. (2001). Endemism in the Australian flora. *Journal of Biogeography*, 28(2), 183-198. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00524.x>



- Dauwalter, D. C., Splinter, D. K., Fisher, W. L., & Marston, R. A. (2008). Biogeography, ecoregions, and geomorphology affect fish species composition in streams of eastern Oklahoma, USA. *Environmental Biology of Fishes*, 82(3), 237-249. <https://doi:10.1007/s10641-007-9277-7>
- de Paula, F. R., Leal, C. G., Leitao, R. P., Ferraz, S. F. D., Pompeu, P. S., Zuanon, J. A. S., & Hughes, R. M. (2022). The role of secondary riparian forests for conserving fish assemblages in eastern Amazon streams. *Hydrobiologia*, 849(20), 4529-4546. <https://doi:10.1007/s10750-020-04507-4>
- de Paula Silva, J., Alves, G. B., Ross, J. L. S., de Oliveira, F. S., do Nascimento, M. A. L., Felini, M. G., Pereira, D. Í. (2021). The Geodiversity of Brazil: Quantification, Distribution, and Implications for Conservation Areas. *Geoheritage*, 13(3), 75. <https://doi:10.1007/s12371-021-00598-0>
- Delong, M. D., & Thoms, M. C. (2016). An ecosystem framework for river science and management (Publication Number 978-1-118-64352-5; 978-1-119-99434-3).
- Encalada, A. (2010). Funciones ecosistémicas y diversidad de los ríos: Reflexiones sobre el concepto de caudal ecológico y su aplicación en el Ecuador. *Polémika*, 2(5). Retrieved from <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/polemika/article/view/370>
- Fullerton, A. H., Burnett, K. M., Steel, E. A., Flitcroft, R. L., Pess, G. R., Feist, B. E., . . . Sanderson, B. L. (2010). Hydrological connectivity for riverine fish: measurement challenges and research opportunities. *Freshwater Biology*, 55(11), 2215-2237. <https://doi:10.1111/j.1365-2427.2010.02448.x>
- Fuss, T., Bistarelli, L. T., Walther, F., Vitecek, S., Talluto, L., & Singer, G. (2024). Geodiversity of a European river network controls algal biodiversity and function. *Communications Earth & Environment*, 5(1). <https://doi:10.1038/s43247-024-01478-5>
- Guo, Q. C., Zheng, Z., Huang, L. M., & Deng, A. J. (2020). Regularity of sediment transport and sedimentation during floods in the lower Yellow River, China. *International Journal of Sediment Research*, 35(1), 97-104. <https://doi:10.1016/j.ijsrc.2019.08.001>
- Gurí, R., Benejam, L., Ordeix, M., & Arranz, I. (2024). Assessing water diversion impacts on the fish community size structure in headwater stream stretches. *Hydrobiologia*, 851(14), 3413-3431. <https://doi:10.1007/s10750-024-05507-4>
- Gray, M. (2004). *Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature*.
- Gray, M. (2011). Other nature: geodiversity and geosystem services. *Environmental Conservation*, 38(3), 271-274. <https://doi.org/10.1017/s0376892911000117>
- Gray, M., Gordon, J. E., & Brown, E. J. (2013). Geodiversity and the ecosystem approach: the contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. *Proceedings of the Geologists Association*, 124(4), 659-673. doi:10.1016/j.pgeola.2013.01.003
- Gray, M. (2021). Geodiversity: a significant, multi-faceted and evolving, geoscientific paradigm rather than a redundant term. *Proceedings of the Geologists' Association*, 132(5), 605-619. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2021.09.001>
- Habit, E., Belk, M. C., Tuckfield, R. C., & Parra, O. (2006). Response of the fish community to human-induced changes in the Biobio River in Chile. *Freshwater Biology*, 51(1), 1-11. <https://doi:10.1111/j.1365-2427.2005.01461.x>



- Habit, E., Zurita, A., Díaz, G., Manosalva, A., Arriagada, P., Link, O., & Górski, K. (2022). Latitudinal and Altitudinal Gradients of Riverine Landscapes in Andean Rivers. *Water*, 14(17), Article 2614. <https://doi.org/10.3390/w14172614>
- Hjort, J., Gordon, J. E., Gray, M., & Hunter, M. L. (2015). Why geodiversity matters in valuing nature's stage. *Conservation Biology*, 29(3), 630-639. <https://doi:10.1111/cobi.12510>
- Hooke, J. M. (2022). Morphodynamics of a meandering channel over decadal timescales in response to hydrological variations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(8), 1902-1920. <https://doi:10.1002/esp.5354>
- Kärnä, O.-M., Heino, J., Grönroos, M., & Hjort, J. (2018). The added value of geodiversity indices in explaining variation of stream macroinvertebrate diversity. *Ecological Indicators*, 94, 420-429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.034>
- Kärnä, O.-M., Heino, J., Laamanen, T., Jyrkänkallio-Mikkola, J., Pajunen, V., Soininen, J., Tolonen, K. T., Tukiainen, H., & Hjort, J. (2019). Does catchment geodiversity foster stream biodiversity? *Landscape Ecology*, 34(10), 2469-2485. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00901z>
- Keith, D. A. (2011). Relationships Between Geodiversity and Vegetation in Southeastern Australia. *Proceedings of the Linnean Society of New South Wales*, 132, 5-26.
- Kienle, D., Walentowitz, A., Sungur, L., Chiarucci, A., Irl, S. D. H., Jentsch, A., Vetaas, O. R., Field, R., & Beierkuhnlein, C. (2022). Geodiversity and biodiversity on a volcanic island: the role of scattered phonolites for plant diversity and performance. *Biogeosciences*, 19(6), 1691-1703. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1691-2022>
- Lytle, D. A., & Poff, N. L. (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(2), 94-100. <https://doi:10.1016/j.tree.2003.10.002>
- Miller, S. W., Budy, P., & Schmidt, J. C. (2010). Quantifying Macroinvertebrate Responses to In-Stream Habitat Restoration: Applications of Meta-Analysis to River Restoration. *Restoration Ecology*, 18(1), 8-19. <https://doi:10.1111/j.1526-100X.2009.00605.x>
- Parks, K. E., & Mulligan, M. (2010). On the relationship between a resource-based measure of geodiversity and broad scale biodiversity patterns. *Biodiversity and Conservation*, 19(9), 2751-2766. <https://doi:10.1007/s10531-010-9876-z>
- Postel, S. (2002). Rivers of Life: the challenge of restoring health to freshwater ecosystems. *Water science and Technology*, 45(11), 3-8. <https://doi:10.2166/wst.2002.0373>
- Quintero-Marín, J. E., Rendón-Rivera, A., & Brilha, J. (2023). A Study on Geodiversity and Geoconservation's Impact on the Management of Natural Resources in the Alto Ricaurte Region, Boyaca, Colombia. *Geoheritage*, 15(4). <https://doi:10.1007/s12371-023-00890-1>
- Read, Q. D., Zarnetske, P. L., Record, S., Dahlin, K. M., Costanza, J. K., Finley, A. O., Gaddis, K. D., Grady, J. M., Hobi, M. L., Latimer, A. M., Malone, S. L., Ollinger, S. V., Pau, S., & Wilson, A. M. (2020). Beyond counts and averages: Relating geodiversity to dimensions of biodiversity. *Global Ecology and Biogeography*, 29(4), 696-710. <https://doi.org/10.1111/geb.13061>
- Reed, P. M., Brooks, R. P., Davis, K. J., DeWalle, D. R., Dressler, K. A., Duffy, C. J., . . . Yarnal, B. (2006). Bridging river basin scales and processes to assess human-climate impacts and the



terrestrial hydrologic system. *Water Resources Research*, 42(7).
<https://doi:10.1029/2005wr004153>

Reich, P., Lake, P. S., Thomson, J. R., Daniel, T., Johnson, M., Metzeling, L., . . . Hale, R. (2023). Aquatic invertebrate responses to riparian restoration and flow extremes in three degraded intermittent streams: An eight-year field experiment. *Freshwater Biology*, 68(2), 325-339.
<https://doi:10.1111/fwb.14028>

Rosgen, D. L. (1994). A CLASSIFICATION OF NATURAL RIVERS. *Catena*, 22(3), 169-199.
[https://doi:10.1016/0341-8162\(94\)90001-9](https://doi:10.1016/0341-8162(94)90001-9)

Serlet, A. J., López Moreira Mazacotte, G. A., Zolezzi, G., Wharton, G., Hölker, F., Gurnell, A. M., Zarfl, C. (2020). SMART Research: Toward Interdisciplinary River Science in Europe. *Frontiers in Environmental Science*, 8. <https://doi:10.3389/fenvs.2020.00063>

Sholtes, J. S., Yochum, S. E., Scott, J. A., & Bledsoe, B. P. (2018). Longitudinal variability of geomorphic response to floods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(15), 3099-3113.
<https://doi:10.1002/esp.4472>

Silva, J. D., Rodrigues, C., & Pereira, D. I. (2015). Mapping and Analysis of Geodiversity Indices in the Xingu River Basin, Amazonia, Brazil. *Geoheritage*, 7(4), 337-350.
<https://doi:10.1007/s12371-014-0134-8>

Thoms, M. C., Gilvear, D. J., Greenwood, M. T., & Wood, P. J. (2016). An introduction to river science: research and applications (Publication Number 978-1-118-64352-5; 978-1-119-99434-3)

Thoms, M. C., Southwell, M., & McGinness, H. M. (2005). Floodplain-river ecosystems: Fragmentation and water resources development. *Geomorphology*, 71(1-2), 126-138.
<https://doi:10.1016/j.geomorph.2004.10.011>

Thorndycraft, V. R., Benito, G., & Gregory, K. J. (2008). Fluvial geomorphology: A perspective on current status and methods. *Geomorphology*, 98(1-2), 2-12.
<https://doi:10.1016/j.geomorph.2007.02.023>

Thorp, J. H., Thoms, M. C., & Delong, M. D. (2008). The Riverine Ecosystem Synthesis Toward Conceptual Cohesiveness in River Science Preface. In *Riverine Ecosystem Synthesis: Towards Conceptual Cohesiveness in River Science* (pp. XI-XIV).

Tukiainen, H., Alahuhta, J., Field, R., Ala-Hulkko, T., Lampinen, R., & Hjort, J. (2017). Spatial relationship between biodiversity and geodiversity across a gradient of land-use intensity in high-latitude landscapes. *Landscape Ecology*, 32(5), 1049-1063. <https://doi:10.1007/s10980-017-0508-9>

Tukiainen, H., Kiuttu, M., Kalliola, R., Alahuhta, J., & Hjort, J. (2019). Landforms contribute to plant biodiversity at alpha, beta and gamma levels. *Journal of Biogeography*, 46(8), 1699-1710.
<https://doi:10.1111/jbi.13569>

Tukiainen, H., & Bailey, J. J. (2023). Enhancing global nature conservation by integrating geodiversity in policy and practice. *Conservation Biology*, 37(3), e14024.
<https://doi.org/10.1111/cobi.14024>

Tukiainen, H., Maliniemi, T., Alahuhta, J., Hjort, J., Lindholm, M., Salminen, H., Snåre, H., Toivanen, M., Vilmi, A., & Heino, J. (2023). Quantifying alpha, beta and gamma geodiversity.



Progress in Physical Geography-Earth and Environment, 47(1), 140-151.
<https://doi.org/10.1177/03091333221114714>

Tukiainen, H., Toivanen, M., & Maliniemi, T. (2023). Geodiversity and Biodiversity. In Visages of Geodiversity and Geoheritage (pp. 0). Geological Society of London.
<https://doi.org/10.1144/SP530-2022-107>

Valdovinos, C., & Parra, O. (2006). La Cuenca del Río Biobío. Historia Natural de un Ecosistema de uso Múltiple. Publicaciones Centro EULA, 1–25. Retrieved from <http://www.eula.cl/images/stories/documentos/3.pdf>

Valenzuela-Aguayo, F., McCracken, G. R., Manosalva, A., Habit, E., & Ruzzante, D. E. (2020). Human-induced habitat fragmentation effects on connectivity, diversity, and population persistence of an endemic fish, *Percilia irwini*, in the Biobio River basin (Chile). *Evolutionary Applications*, 13(4), 794-807. <https://doi:10.1111/eva.12901>

Victoriano, R. (2020). CÓDIGO R PARA LA DETERMINACIÓN DE ZONAS DE PROCESOS FUNCIONALES Desarrollado para Proyecto FONDECYT 1190647.

Williams, B. S., D'Amico, E., Kastens, J. H., Thorp, J. H., Flotemersch, J. E., & Thoms, M. C. (2013). Automated riverine landscape characterization: GIS-based tools for watershed-scale research, assessment, and management. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(9), 7485-7499.

Zarnetske, P. L., Read, Q. D., Record, S., Gaddis, K. D., Pau, S., Hobi, M. L., . . . Finley, A. O. (2019). Towards connecting biodiversity and geodiversity across scales with satellite remote sensing. *Global Ecology and Biogeography*, 28(5), 548-556. <https://doi:10.1111/geb.12887>



7. ANEXOS

Anexo I: Análisis de Similitud Porcentual (SIMPER) realizados para cada uno de los grupos geomorfológicos definidos y para integrar a las descripciones de cada uno de ellos.

De acuerdo con la composición de las características de los grupos geomorfológicos, a partir del Análisis de Similitud Porcentual (SIMPER) se identificó el porcentaje promedio de contribución a la distancia entre los segmentos que conformaban cada uno de los grupos geomorfológicos, es decir, mientras menor fuera este porcentaje esto indicaba que existía una mayor homogeneidad entre los segmentos que conformaban cada grupo. En este mismo análisis también se identificaron las principales variables que contribuían a esta similitud entre los segmentos fluviales.

A continuación, se presentan los once grupos en orden desde el que presentó un menor promedio de distancia entre sus segmentos a mayor promedio y las tres variables geomorfológicas con menor contribución a la distancia, es decir, aquellas que explican una mayor homogeneidad entre los segmentos que componen el grupo geomorfológico.

- Los Ríos de Baja Elevación (F-RBE) presentaron una distancia promedio del 6,7% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: sinuosidad de banda de canal (0,95%), ancho de valle (2,79%) y pendiente derecha (3,07%).
- Los Ríos de Canal Único (C-RCU) presentaron una distancia promedio del 11,9% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: sinuosidad de banda de canal (0,24%), ancho de canal (2,97%) y cantidad de canales (3,89%).
- Los Ríos Multicanal (D-RM) presentaron una distancia promedio del 12,0% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: sinuosidad de banda de canal (1,20%), elevación (4,76%) y cantidad de canales (5,40%).



- Los Ríos Parcialmente Confinados (C-RPC) una distancia promedio del 12,3% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: sinuosidad de banda de canal (0,55%), longitud de banda de canal (2,54%) y cantidad de canales (2,64%).
- Los Ríos Confinados (B-RC) presentaron una distancia promedio del 12,4% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: sinuosidad de banda de canal (0,09%), longitud de banda de canal (0,93%) y cantidad de canales (1,40%).
- Los Ríos de Depresión Intermedia (C-RDI) presentaron una distancia promedio del 13,2% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: sinuosidad de banda de canal (0,91%), longitud de banda de canal (4,66%) y razón de ancho de valle y ancho del fondo del valle (5,92%).
- Ríos de Alta Elevación (A-RAE) presentaron una distancia promedio del 13,5% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: sinuosidad de banda de canal (0,39%), longitud de banda de canal (2,09%) y ancho de canal (4,06%).
- Ríos de Alta Pendiente (A-RAP) presentaron una distancia promedio 14,1% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: sinuosidad de banda de canal (2,17%), cantidad de canales (3,35%) y longitud de banda de canal (3,74%).
- Ríos con Valles Amplios (E-RVA) presentaron una distancia promedio 15,4% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: longitud de banda de canal (2,09%), sinuosidad de banda de canal (4,11%) y elevación (4,49%).
- Ríos de Sinuosidad Moderada (C-RSM) presentaron una distancia promedio 15,7% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: confinamiento (2,22%), sinuosidad del cauce (3,34%) y razón de ancho de valle y ancho del fondo del valle (4,71%).



- Ríos con Mayor Longitud de Canal (E-RLC) presentaron una distancia promedio 19,9% entre sus segmentos y las variables que contribuyeron a este valor fueron: geología (3,90 %), precipitación anual (4,05%) y sinuosidad del cauce (4,94%).

Tabla Anexo II: Cursos de agua que tuvieron que unirse a sus cauces principales y recibir el nombre de estos mismos debido a que tenían una menor longitud dentro de la red hídrica.

Nombre de ríos	Cursos de agua
Liucura	Río Liucura; Río Tralihue
Lonquimay	Río Lonquimay; Río Naranjo
Lomin	Río Lomin; Río Chaquilvin
Queuco	Río Queuco; Estero Saltillo Los Mellizos
Laja	Río Laja; Laguna Laja
Bureo	Río Bureo; Estero Chumulco
Renaico	Río Renaico; Río Diablo, Río Amargos
Mininco	Río Mininco; Río Callin, Estero Chancahue
Malleco	Río Malleco; Estero Lolenco
Vergara	Río Vergara; Estero NA-54
Ricudahue	Río Ricudahue; Río Coihue o de las Animas, Estero Pinohueco
Tavoleo	Río Tavoleo; Río Culenco, Estero Collileo
Biobío Alto	Río Biobío; Río Rucanuco
Biobío Medio	Río Biobío; Estero Pile
Biobío Bajo	Río Biobío; Estero Hualqui



Tabla Anexo III: Correspondiente a los valores obtenidos de índices de geodiversidad alfa, beta y gamma para los 33 ríos.

Ríos	Alfa	Beta	Gamma
Estero Quilacoya	0,00	0,22	1
Río Biobío Alto	0,76	1,96	10
Río Biobío Bajo	0,46	1,73	4
Río Biobío Medio	0,55	1,75	7
Río Bureo	0,73	2,15	7
Río Caliboro	0,33	1,33	3
Río Claro	0,00	0,16	1
Río Duqueco	0,65	2,01	7
Río Gomero	0,30	1,63	2
Río Huequecura	0,54	1,87	5
Río Huequen	0,63	2,08	6
Río Laja	0,73	1,94	7
Río Lirquen	0,28	1,54	2
Río Liucura	0,43	1,41	3
Río Lolco	0,34	1,44	3
Río Lomin	0,50	1,71	4
Río Lonquimay	0,43	1,73	3
Río Malleco	0,65	2,03	6
Río Mininco	0,67	1,99	6
Río Mulchén	0,34	1,63	3
Río Pangue	0,25	1,31	2
Río Picoiquen	0,53	1,91	4
Río Polcura	0,51	1,99	4



Río Queuco	0,56	1,19	6
Río Quilme	0,19	0,53	3
Río Ranquil	0,73	2,05	6
Río Rarínco	0,26	1,46	2
Río Rehue	0,41	1,81	4
Río Rele	0,17	1,01	2
Río Renaico	0,62	1,98	6
Río Ricudahue	0,67	1,86	7
Río Tavoleo	0,50	1,77	4
Río Vergara	0,73	2,01	7

Tabla Anexo IV: Distribución de datos en forma resumida para los índices de geodiversidad alfa, beta y gamma. Estos valores permitieron definir las categorías de geodiversidad alta, media y baja para los índices de geodiversidad alfa y beta en la red hídrica.

Resumen	Índices de geodiversidad		
	Alfa	Beta	Gamma
Mínimo	0	0,1609	1
Primer Cuartil	0,3257	1,4393	3
Mediana	0,5027	1,7468	4
Promedio	0,4678	1,6117	4,455
Tercer Cuartil	0,6534	1,9834	6
Máximo	0,7586	2,1508	10