



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



SIMULACIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS DEL CENTRO-SUR DE CHILE

POR

Vicente Ricardo Saenger Derache

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título de Ingeniero Civil

Profesora Guía
Alejandra Stehr Gesche

Profesional Supervisor
Maricarmen Guerra París

Octubre, 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Vicente Ricardo Saenger Derache

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

RESUMEN

La información fluviométrica es fundamental para la gestión de recursos hídricos y para el diseño de obras de infraestructura, sin embargo, la mayor parte de las cuencas en Chile y en el mundo no cuentan con esta información. El objetivo principal de este trabajo es simular caudales medios diarios en cuencas del centro sur de Chile, específicamente en cuatro cuencas en monitoreo situadas en la zona andina de la región de la Araucanía.

Se recopiló información hidrometeorológica y fisiográfica de cuencas con registros y de las cuencas en monitoreo. En base a esto, se desarrollaron modelos empíricos, utilizando métodos de escala y regresión, basando las simulaciones en la información hidrológica de una cuenca donante. Los modelos se validaron con datos de las cuencas con registro y datos de las cuencas en monitoreo. Los resultados de los modelos con mejor bondad ajuste de la validación en cuencas con registro indican un ajuste bueno en dos cuencas y satisfactorio en otra cuenca. Para la validación en las cuencas en monitoreo, los modelos con mejor bondad de ajuste indican un ajuste bueno en una cuenca y satisfactorio en las otras tres cuencas. El modelo de transposición de caudales produce buenos resultados, pero en general, los modelos de regresión tienen un mejor ajuste. Los caudales altos se suelen subestimar, y es donde se producen las mayores discordancias. Con el modelo de mejor ajuste se generaron caudales medios diarios en las cuencas en monitoreo para el periodo 2011-2012.

DEDICATORIA

A mi familia, pareja, amigos y a todos los que me ayudaron.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), por el financiamiento otorgado para los trabajos en terreno mediante el Proyecto Anillo ACT210060 FIRING.

También agradezco la labor de don René Iribarren Catalán, Nicole Vyhmeister Vargas y Pablo Villegas Salgado, quienes formaron parte del equipo de trabajo en terreno y me brindaron su ayuda a lo largo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a mi profesora guía Alejandra Stehr Gesche por su ayuda, buena disposición y confianza durante esta etapa, así como a mi profesora comisión Maricarmen Guerra Paris por su buena disposición y consejos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Pregunta de investigación.....	3
1.4. Metodología.....	3
1.5. Organización de la memoria.....	3
2. PREDICCIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS SIN REGISTRO	4
2.1. Introducción.....	4
2.2. Generalidades	4
2.3. Regionalización	5
2.4. Ejemplos de métodos	8
2.4.1. Métodos de escala.....	8
2.4.2. Métodos de regresión.....	9
2.5. Desafíos.....	11
2.6. Conclusión.....	12
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1. Introducción.....	13
3.2. Cuencas en monitoreo.....	13
3.3. Fuentes de información.....	16
3.3.1. Información hidrometeorológica	16
3.3.2. Información fisiográfica.....	22
3.3.3. Derechos de aprovechamientos de agua	25

3.4.	Métodos de regionalización.....	26
3.5.	Calibración	29
3.6.	Validación.....	30
3.7.	Simulación series de caudales	34
3.8.	Conclusión.....	35
4.	RESULTADOS	36
4.1.	Introducción.....	36
4.2.	Características hidrometereológicas	36
4.2.1.	Series de caudal cuencas con registros	36
4.2.2.	Series de precipitación	37
4.2.3.	Series de temperatura.....	38
4.2.4.	Series de caudal cuencas en monitoreo.....	39
4.3.	Características fisiográficas.....	40
4.3.1.	Parámetros relieve	40
4.3.2.	Parámetros morfométricos	42
4.3.3.	Uso de suelo	43
4.4.	Derechos de aprovechamientos de agua	44
4.5.	Calibración	46
4.6.	Validación 1: cuencas con registro	47
4.7.	Validación 2: cuencas en monitoreo	49
4.8.	Series de caudales	52
4.9.	Conclusión.....	53
5.	CONCLUSIONES	55
	REFERENCIAS	57
	ANEXOS.....	59

ANEXO 4.1	59
ANEXO 4.2	61
ANEXO 4.3	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Localización puntos de aforo	14
Tabla 3.2 Estaciones fluviométricas sector área de estudio	17
Tabla 3.3 Datos disponible sensores de presión	20
Tabla 3.4 Parámetros morfométricos calculados.	24
Tabla 3.5 Métodos de regionalización	27
Tabla 3.6 Pares de cuencas calibración	29
Tabla 3.7 Pares de cuencas utilizados para la validación 1	32
Tabla 3.8 Pares de cuencas y estación pluviométrica validación 2	33
Tabla 4.1 Precipitación media anual cuencas en análisis	38
Tabla 4.2 Características relieve cuencas en análisis	41
Tabla 4.3 Parámetros morfométricos cuencas en análisis	42
Tabla 4.4 Uso de suelo cuencas en análisis, en porcentaje.....	44
Tabla 4.5 Modelos calibrados	46
Tabla 4.6 Medidas de bondad de ajuste calibración	47
Tabla 4.7 Medidas de bondad de ajuste validación 1.....	48
Tabla 4.8 Medidas de bondad de ajuste validación 2.....	49
Tabla 4.9 Modelo asignado simulación de caudales cuencas en monitoreo	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Métodos regionalización	7
Figura 3.1 Localización cuencas en monitoreo	14
Figura 3.2 Localización estaciones meteorológica y fluviométrica sector área de estudio	17
Figura 3.3 Disponibilidad datos de caudal medio diario estaciones sector área de estudio, en porcentaje	18
Figura 3.4 Grilla CR2MET	19
Figura 3.5 Caudal aforado en lugares de aforo.....	20
Figura 3.6 Aforo de caudal Puente Honduras (a), y sensor de presión en China Muerta (b).....	21
Figura 3.7 Curvas de descarga puntos de aforo.....	22
Figura 3.8 Modelo de elevación digital Región de la Araucanía.....	23
Figura 3.9 Uso de suelo Región de la Araucanía.....	25
Figura 3.10 Derechos de aprovechamientos de agua Región de la Araucanía.....	26
Figura 3.11 Esquema calibración y validación métodos de regionalización	27
Figura 3.12 Localización cuencas objetivo/donante calibración.....	30
Figura 3.13 Localización cuencas objetivo/donante validación 1	33
Figura 3.14 Localización cuencas objetivo/donante validación 2	34
Figura 4.1 Caudal específico medio diario cuencas con registro	36
Figura 4.2 Precipitación media diaria cuencas en análisis	37
Figura 4.3 Temperatura media diaria cuencas en análisis	39
Figura 4.4 Caudal medio diario cuencas en monitoreo.....	40
Figura 4.5 Relieve cuencas en monitoreo	41
Figura 4.6 Uso de suelo cuencas en monitoreo	43
Figura 4.7 Derechos de agua cuencas en monitoreo.....	45
Figura 4.8 Caudal observado y simulado por modelo con mejor ajuste cuencas en monitoreo ...	51
Figura 4.9 Caudales medios diarios simulados cuencas en monitoreo	53

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La información fluviométrica es un factor clave para la gestión de recursos hídricos y para el diseño de obras de infraestructura como embalses, puentes y sistemas de drenaje. Sin embargo, la mayoría de las cuencas en el mundo no cuentan con información fluviométrica o tienen muy pocos datos (Yang *et al.* 2019).

En Chile, las estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) están desigualmente distribuidas (Medina *et al.* 2020), centrándose en el valle central y a lo largo de la costa en las principales cuencas del país. Existen muchas cuencas que cuentan con escasa o nula información fluviométrica. Las cuencas sin registro suelen estar en zonas montañosas, remotas y/o de difícil acceso, como la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes.

Para el diseño de obras hidráulicas de pequeña y mediana envergadura en cuencas naturales del país con nula o escasa información fluviométrica, la DGA desarrolló el "Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica". En este manual se presentan métodos para calcular caudales máximos y mínimos, pero no se proporciona un método para calcular caudales medios diarios.

A pesar de los grandes avances metodológicos en la predicción de caudales en cuencas sin registro en las últimas dos décadas, se considera un problema sin resolver en hidrología (Blöschl *et al.* 2019, citado en Arsenault *et al.* 2022).

El Proyecto Anillo FiRING tiene como objetivo principal investigar los impactos de los incendios forestales en la funcionalidad del suelo de los bosques nativos y las plantaciones forestales exóticas, incluyendo las pérdidas de nutrientes, la erosión del suelo, el ciclo del agua y la alteración

biológica, entre otros. En el marco de este proyecto, actualmente se están monitoreando cuatro cuencas con escasos registros de caudal en la zona andina del centro sur de Chile. Esta investigación busca desarrollar modelos para simular los caudales medios diarios en cuencas andinas del centro sur de Chile.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Simular series de caudales medios diarios en cuencas andinas sin información fluviométrica histórica, en base a información hidrometeorológica y fisiográfica de cuencas similares, en el centro sur de Chile.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la hidrología, meteorología, relieve, morfometría y uso de suelo de cuatro cuencas que están siendo actualmente monitoreadas y en cuencas similares con registros históricos de caudales.
- Formular modelos empíricos para estimar caudales medios diarios.
- Generar series de caudales medios diarios en las cuencas en monitoreo a partir de los modelos formulados.

1.3. Pregunta de investigación

¿Es posible simular caudales medios diarios en cuencas andinas del centro sur de Chile mediante modelos empíricos?

1.4. Metodología

Se recopiló información hidrometeorológica, fisiográfica y de derechos de agua en las cuencas en monitoreo y en cuencas similares con registros. Se formularon modelos con métodos de escala y de regresión, los modelos se calibraron con datos de cuencas con registros y se validaron con datos de cuencas con registro y datos de las cuencas en monitoreo. Se simularon los caudales para cada cuenca en monitoreo según el modelo con mejor bondad de ajuste.

1.5. Organización de la memoria

Este documento consta de cinco capítulos: Introducción, Revisión Bibliográfica, Materiales y Métodos, Resultados y Conclusiones. En el Capítulo 1 se presenta la motivación, los objetivos, la pregunta de investigación, la metodología y la organización de la memoria. En el Capítulo 2 se realiza una revisión de los métodos y desafíos de la predicción de caudales en cuencas sin registro. El Capítulo 3 describe el área de estudio, las fuentes de información y el procedimiento de elaboración de los modelos de predicción de caudal. En el Capítulo 4 se muestran las características hidrometeorológicas y fisiográficas de las cuencas en análisis, así como los modelos de predicción de caudal, su validación y los caudales simulados en las cuencas en monitoreo. En el Capítulo 5 se muestran las conclusiones de este estudio.

2. PREDICCIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS SIN REGISTRO

2.1. Introducción

En el presente capítulo se llevó a cabo una revisión de los antecedentes relativos a la predicción de caudales en cuencas sin registro, revisando generalidades, métodos, casos de estudio, desafíos y perspectivas del tema en cuestión.

2.2. Generalidades

La información fluviométrica es fundamental en la gestión de los recursos hídricos y para el diseño de obras civiles. A pesar de esto, la mayoría de las cuencas en el mundo no cuentan con información fluviométrica o tienen muy pocos datos (Yang *et al.* 2019), lo que hace que la predicción de caudales en cuencas sin registro sea uno de los principales problemas de la ingeniería hidrológica.

La *International Association of Hydrological Science* (Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas; AASHTO según sus iniciales en inglés) lanzó en el año 2003 la iniciativa *Predictions in Ungauged Basins* (Predicción en cuencas sin registro; PUB según sus iniciales en inglés) (Sivapalan, 2003). El objetivo de esta iniciativa era lograr avances importantes en la capacidad predictiva en cuencas sin registro. Existen numerosos estudios sobre el tema anteriores a esta iniciativa, pero la mayoría de los estudios y avances metodológicos se produjeron posteriormente a su lanzamiento (Blöschl *et al.* 2013; Hrachowitz *et al.* 2013, citado en de Lavenne, 2022). Sin embargo, la capacidad de simular caudales en cuencas sin registro se sigue considerando un problema sin resolver en hidrología (Blöschl *et al.* 2019, citado en Arsenault *et al.* 2022).

La predicción de caudales en cuencas sin registro y con registros escasos es un campo de investigación clave en hidrología y los métodos de regionalización son los más utilizados para resolver estos problemas (Guo *et al.* 2021).

2.3. Regionalización

Razavi y Coulibaly (2013) definen la regionalización como el proceso de transferencia de información hidrológica de cuencas con registros a cuencas sin o con escasos registros para estimar el caudal. Generalmente, un modelo simplificado de regionalización puede ser descrito por la siguiente ecuación (Wagener y Wheeler, 2006):

$$\hat{\theta}_L = H_R(\theta_R | \Phi) + v_R \quad (2.1)$$

donde $\hat{\theta}_L$ es un parámetro estimado para la cuenca sin registro, H_R es una función que relaciona características meteorológicas y fisiográficas de la cuenca Φ , θ_R es un conjunto de parámetros del modelo regional y v_R es el término error.

Razavi y Coulibaly (2013) proponen un procedimiento de regionalización en cinco pasos, que se resume a continuación:

1. Recolectar atributos meteorológicos y fisiográficos de las cuencas
2. Determinar variable hidrológica de interés
3. Desarrollar relación entre caudal y atributos de la cuenca
4. Evaluar la bondad de ajuste del modelo
5. Incluir incertidumbre

En el primer paso, los atributos de las cuencas que se utilizan varían entre estudios. Kokkonen *et al.* (2003) proponen que los atributos que se utilizan deben caracterizar los factores que controlan la respuesta hidrológica de una cuenca, y que preferentemente procedan de fuentes de datos existentes y fácilmente disponibles. Mwakalila (2003) seleccionó los atributos con el objetivo de que la muestra de cuencas de su estudio fuese representativa de la población estadística de las cuencas de la región, tanto en el espacio geográfico como en el de los parámetros. Usualmente, los atributos más utilizados son el área, la elevación, la pendiente de la cuenca o de la red de drenaje, la precipitación media anual y la precipitación y temperatura diaria (Razavi y Coulibaly, 2013).

En el segundo paso se determina la variable hidrológica de interés, que depende del objetivo del estudio, algunos ejemplos son: caudal medio diario, caudales máximos y mínimos anuales, caudal máximo instantáneo, entre otros.

Es en el tercer paso en el cual se selecciona el tipo del método de regionalización para predecir caudales. Los métodos de regionalización pueden clasificarse en dos grupos, los modelos hidrológicamente dependientes, y los modelos hidrológicamente independientes.

La Figura 2.1 muestra los principales métodos para cada grupo de modelos (Razavi y Coulibaly, 2013). Se observan seis métodos para los modelos hidrológicamente dependientes: media aritmética, proximidad espacial, proximidad física, relación de escala, regresión y similitud hidrológica. Para los modelos hidrológicamente independientes, se muestran tres métodos: regresión, modelo de series de tiempo y relación de escala.

- **Modelos hidrológicamente dependientes**

El enfoque más comúnmente utilizado en la predicción de caudales es mediante modelos físicamente basados, hidrológicamente dependientes. Se formulan en base a ecuaciones

físicas de los procesos involucrados en el ciclo hidrológico, como la evaporación, infiltración, y escorrentía.

- **Modelos hidrológicamente independientes**

Este enfoque es utilizado en menor medida que los modelos hidrológicamente dependientes. Se trata de modelos empíricos, basados en el análisis de datos, en los que en base a observaciones se establece una relación matemática entre una o múltiples variables causantes del caudal. En este modelo no se describen procesos físicos. Sus principales ventajas son que requieren menos datos y la simplicidad de su estructura.

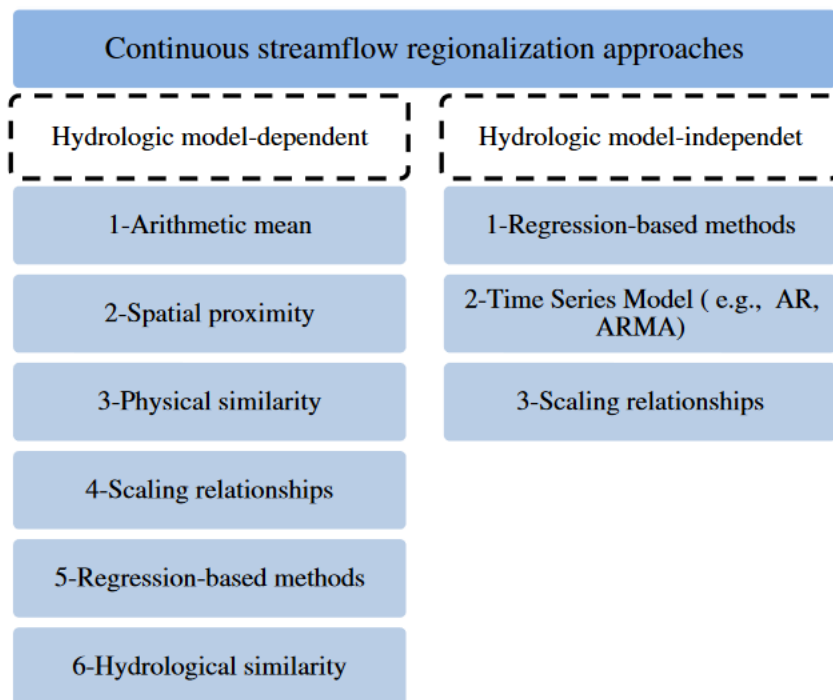


Figura 2.1 Métodos regionalización

En el paso cuatro, antes de aplicar el modelo a cuencas sin registro, se aplica en cuencas con registro para evaluar su calidad. Dentro de las medidas de bondad de ajuste más utilizadas están la eficiencia

de Nash-Sutcliffe (NSE), el error cuadrático medio (RMSE) y el *percent* BIAS (PBIAS) (Razavi y Coulibaly, 2013).

En el paso cinco se incorpora la incertidumbre en el modelo, que puede ser necesario debido a que la incertidumbre es intrínseca en un modelo y también por la incertidumbre en la selección de atributos, en el procedimiento de regionalización, la estructura del modelo y sus parámetros (Razavi y Coulibaly, 2013).

2.4. Ejemplos de métodos

A continuación, se muestran tres métodos empíricos, hidrológicamente independientes, que destacan por su fácil aplicación y que pueden predecir correctamente caudales con pocos datos.

2.4.1. Métodos de escala

El método más común y antiguo para estimar caudales medios diarios en una cuenca sin registro es el de transposición (Archfield y Vogel, 2010), en el que el caudal medio diario en una cuenca sin registro se estima multiplicando el caudal medio diario de una cuenca con registro por la razón entre el área de la cuenca sin registro con el área de la cuenca con registro. La ecuación (2.2) describe este método:

$$Q_1 = Q_2 \frac{A_1}{A_2} \quad (2.2)$$

donde Q_1 es el caudal medio diario en la cuenca sin registro, Q_2 es el caudal medio diario de la cuenca con registro, A_1 es el área de la cuenca sin registro y A_2 el área de la cuenca con registro.

Este método también se utiliza para el cálculo de otras variables hidrológicas, como el caudal medio mensual o anual. Es simple de aplicar y requiere pocos datos. La elección de la cuenca con registro se determina generalmente por la distancia geográfica a la cuenca sin registro o se selecciona una cuenca con registro que pudiese tener un comportamiento hidrológico similar al de la cuenca sin registro (Archfield and Vogel, 2010; citado en Gianfagna *et al.* 2015).

El estudio de Gianfagna *et al.* (2015) demostró que la ecuación (2.2) predice de manera razonable el caudal medio diario para las Montañas de Catskill en la región de Nueva York. También se demuestra que el método se puede aplicar en cuencas del orden de los 10 km² y menos, con relaciones de área de hasta 0,02.

2.4.2. Métodos de regresión

Regresión lineal múltiple

El método de regresión lineal múltiple es muy utilizado en la predicción de caudales (Chiang *et al.* 2002). A continuación, la ecuación (2.3) muestra una regresión lineal múltiple:

$$Q = k + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_p x_p \quad (2.3)$$

donde Q es el caudal medio diario, k, α_1 , α_2 , ..., α_p , son coeficientes de la regresión y x_1 , x_2 , ..., x_p son variables predictoras.

Regresión lineal logarítmica múltiple

Otro método de regresión que se utiliza en la predicción de caudales es el de regresión logarítmica múltiple, este consiste en una regresión lineal múltiple con sus variables dependientes e

independientes transformadas logarítmicamente, esto se usa para reducir el peso de los valores extremos en las variables (Zhang *et al.* 2018). El método se muestra en la siguiente ecuación:

$$\log Q = k + \alpha_1 \log x_1 + \alpha_2 \log x_2 + \dots + \alpha_p \log x_p \quad (2.4)$$

donde Q es el caudal medio diario, k, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$, son coeficientes de la regresión y x_1, x_2, \dots, x_p son variables predictoras.

Regresión lineal y regresión logarítmica

Las ecuaciones (2.3) y (2.4) suelen ser reducidas a las ecuaciones (2.5) y (2.6), respectivamente:

$$Q = k + \alpha_1 x_1 \quad (2.5)$$

$$\log Q = k + \alpha_1 \log x_1 \quad (2.6)$$

Las ecuaciones (2.5) y (2.6) corresponden a una regresión lineal, y regresión logarítmica respectivamente.

Harvey *et al.* (2012) evaluaron 15 métodos para rellenar datos de caudales medios diarios en ríos del Reino Unido. Dentro de los métodos que utilizan, están: regresión lineal, regresión lineal logarítmica, regresión lineal múltiple, regresión lineal múltiple logarítmica y transposición. Aplican estos métodos a 26 cuencas, para los métodos de regresión lineal, regresión lineal logarítmica y transposición utilizan una cuenca donante de información, para los métodos de regresión lineal múltiple y regresión lineal múltiple logarítmica se ocupan dos cuencas donantes de información. Las cuencas donantes se seleccionaron en función de la ubicación, el índice de flujo base y la similitud de régimen hidrológico. Dentro de los resultados, en general los métodos de regresión múltiple, entre otros, producían los mejores resultados, por el contrario, el método de

transposición fue el que peores resultados obtuvo. También se encontró que la elección de la cuenca donante tiene una influencia importante en el rendimiento del método y que los métodos que utilizaban información de dos cuencas donantes producían mejores resultados.

2.5. Desafíos

A pesar de los avances, se siguen produciendo simulaciones con resultados insatisfactorios y con baja precisión en la predicción de caudales en cuencas sin registro. El campo de investigación sigue siendo muy activo, incorporando continuamente nuevos métodos (Guo *et al.* 2021).

El principal desafío existente de predicción de caudales en cuencas sin registros es que la precisión de las simulaciones depende en gran medida de la estructura del modelo, por lo que el modelo se debe elegir o adaptar según las condiciones de cada cuenca. La selección de parámetros, la incertidumbre de los métodos por el cambio de condiciones, como aplicar atributos, entre otros, siguen siendo problemas que deben resolverse. Encontrar enfoques multi-modelo efectivos y estructuras de modelo adaptables a grandes escalas que permitan obtener buenos resultados es el mayor desafío (Guo *et al.* 2021).

Actualmente, debido al rápido desarrollo de la tecnología computacional, ciertos modelos hidrológicamente independientes han aumentado su popularidad, como los métodos de redes neuronales artificiales (ANN, según sus iniciales en inglés), sistemas de inferencia difusa basado en redes neuronales adaptativas (ANFIS, según sus iniciales en inglés), *extreme learning machine* (ELM), *support vector machine* (SVM) y regresión de procesos gaussianos (GPR, según sus iniciales en inglés). En comparación con los métodos tradicionales, los métodos de inteligencia artificial son capaces de abordar de manera más eficiente y precisa procesos dinámicos no lineales (Niu y Feng, 2021).

2.6. Conclusión

Se revisó de forma general la predicción de caudales en cuencas sin registro, luego se presentó el método de regionalización, su procedimiento y la clasificación de sus métodos. Se expusieron métodos hidrológicamente independientes, y se mencionaron casos de aplicación de estos métodos. Finalmente se mencionaron los desafíos del campo de investigación y algunos de los actuales métodos en desarrollo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Introducción

En la primera parte de este capítulo se presentan las cuencas en monitoreo, luego se detallan las fuentes de información utilizadas y se caracteriza el área de estudio. En la segunda parte del capítulo se describen los métodos utilizados en la elaboración de modelos de predicción de caudal. Todos los procedimientos de manejo de datos y representación gráfica de datos fueron realizados con el *software* RStudio versión 2023.06.0, y para el análisis de información geográfica se utilizó el *software* QGIS versión 3.22.7.

3.2. Cuencas en monitoreo

Desde inicio del 2023 se monitorean cuatro puntos localizados en la zona andina de la región de la Araucanía, los cuales conforman cuatro cuencas a las cuales se les denomina, China Muerta, Puente El Tigre, Puente Codinhue y Puente Honduras. Se seleccionaron dos cuencas en las que predomina el bosque nativo (China Muerta y Puente Honduras) y otras dos en las que predominan las plantaciones exóticas (Puente El Tigre y Puente Codinhue). Las cuencas China Muerta y Puente Codinhue han sido afectadas por incendios forestales en el pasado, una con predominio de bosque nativo y la otra con predominio de plantaciones forestales.

Las cuencas en monitoreo están localizadas en la precordillera y cordillera de los Andes, región de la Araucanía, centro sur de Chile, comprendidas entre los paralelos 38°44' y 38°51' de latitud sur, y entre los meridianos 71°23' y 72°15' longitud oeste (Figura 3.1). La Tabla 3.1 muestra la elevación y localización de los puntos de aforo, así como el área de drenaje hasta los puntos de aforo.

Tabla 3.1 Localización puntos de aforo

Punto de aforo	Elevación (m.s.n.m.)	Latitud	Longitud	Área (km ²)
China Muerta	982	38° 49' 34"	71° 25' 35"	20.0
Puente El Tigre	749	38° 44' 37"	72° 14' 34"	14.6
Puente Codinhue	231	38° 45' 38"	72° 04' 44"	107.7
Puente Honduras	409	38° 44' 48"	71° 55' 05"	31.3

La Figura 3.1 muestra la localización de las cuatro cuencas en monitoreo y sus respectivos puntos de aforo. Las localidades de Vilcún, San Patricio y Cherquenco se encuentran cercanas a las cuencas Puente El Tigre, Puente Codinhue y Puente Honduras, mientras que Melipeuco es la localidad más cercana a la cuenca China Muerta.

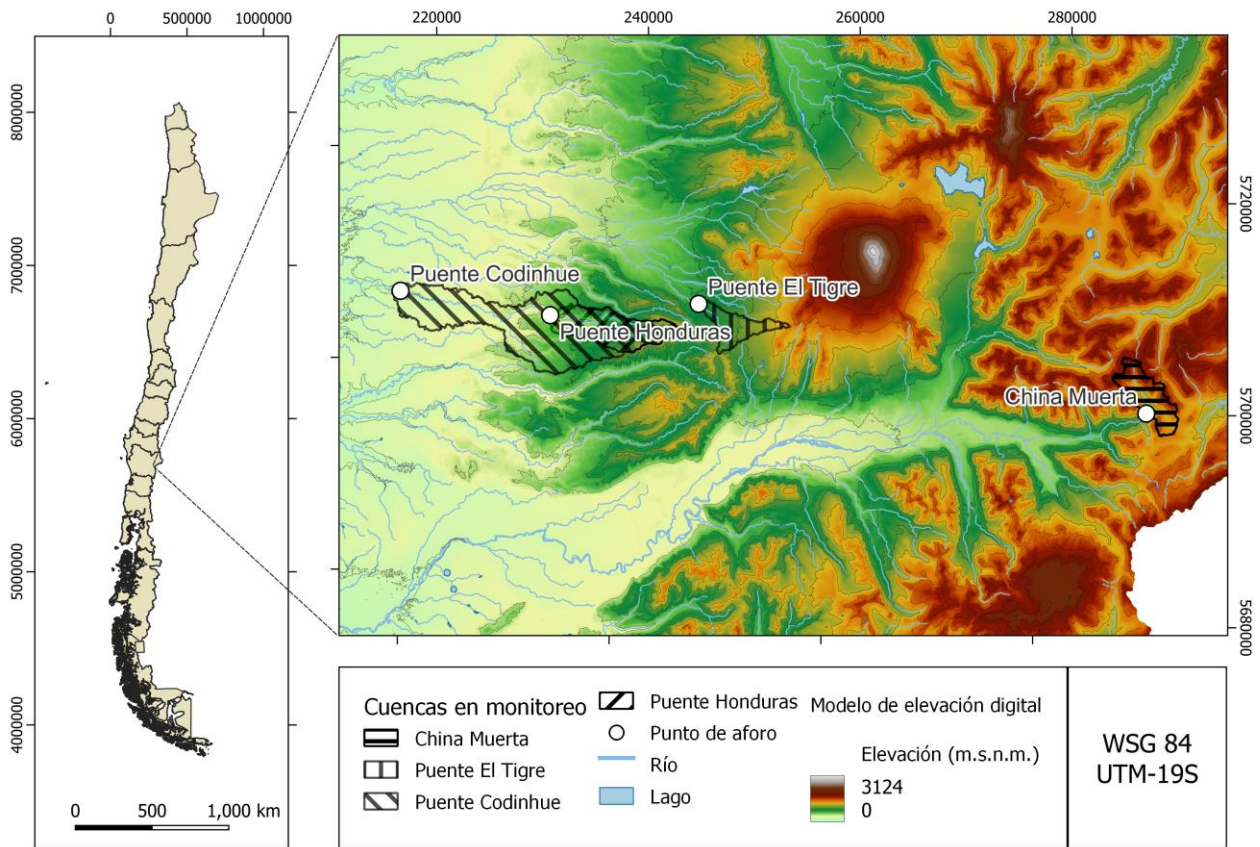


Figura 3.1 Localización cuencas en monitoreo

China Muerta

La cuenca China Muerta se encuentra dentro de la subcuenca Río Allipén, específicamente en la subsubcuenca Río Zahuelhue y Río Guallerupe. Se encuentra en la cordillera de los Andes, extendiéndose entre los paralelos 38°45' y 38°51' de latitud sur, y entre los meridianos 71°22' y 71°30' longitud oeste. Tiene una superficie de 20 km² y sus elevaciones varían entre 982 y 1988 m.s.n.m. Su cauce principal tiene una longitud de 5.9 km. Su precipitación media anual es de 2305 mm, y su temperatura media diaria oscila entre 13 y 1 °C.

Puente El Tigre

La cuenca Puente El Tigre se encuentra dentro de la subcuenca Río Quepe, específicamente en la subsubcuenca Río Quepe Bajo Calbuco. Se encuentra en la precordillera de los Andes, extendiéndose entre los paralelos 38°44' y 38°58' de latitud sur, y entre los meridianos 71°48' y 71°56' longitud oeste. Tiene una superficie de 14.6 km² y sus elevaciones varían entre 749 y 1449 m.s.n.m. Su cauce principal es el Estero El Tigre y tiene una longitud de 10.2 km. Su precipitación media anual es de 2567 mm, y su temperatura media diaria oscila entre 14 y 3 °C.

Puente Codinhue

La cuenca Puente Codinhue se encuentra dentro de la subcuenca Río Quepe, específicamente en la subsubcuenca Río Quepe entre Estero Hunaco hasta antes Río Huichahue. Se encuentra en la precordillera de los Andes, extendiéndose entre los paralelos 38°44' y 38°50' de latitud sur, y entre los meridianos 71°56' y 72°15' longitud oeste. Tiene una superficie de 107.7 km², y sus elevaciones varían entre 231 y 1261 m.s.n.m. Su cauce principal es el Río Codihue y tiene una longitud de 32.9 km. Su precipitación media anual es de 2096 mm, y su temperatura media diaria oscila entre 15 y 5 °C.

Puente Honduras

La cuenca Puente Honduras se encuentran dentro de la subcuenca Río Quepe, específicamente en la subsubcuenca Río Quepe entre Estero Hunaco hasta antes Río Huichahue. Se encuentra en la precordillera de los Andes, extendiéndose entre los paralelos 38°44' y 38°48' de latitud sur, y entre los meridianos 71°56' y 72°06' longitud oeste. Tiene una superficie de 31.3 km², y sus elevaciones varían entre 409 y 1261 m.s.n.m. Su cauce principal es el Río Codihue y tiene una longitud de 14.3 km. Su precipitación media anual es de 2381 mm, y su temperatura media diaria oscila entre 14 y 5 °C.

3.3. Fuentes de información

3.3.1. Información hidrometeorológica

Series de caudal cuencas con registros

Se consideraron datos de caudal reportados por la DGA, la Figura 3.2 muestra la localización de las estaciones meteorológicas y fluviométricas operadas por la DGA en el sector área de estudio.

La Tabla 3.2 muestra la elevación, latitud y longitud de las estaciones fluviométricas del sector área de estudio. La Figura 3.3 muestra el porcentaje de datos de caudal medio diario disponibles por año entre los años 1979 y 2020 para las estaciones de la Tabla 3.2.

También se utilizaron datos de caudal y precipitación del producto DGA Sistema Hidrométrico en Línea, que cuenta con estaciones que transmiten datos en línea a través del sistema satelital o de GPRS. Estos datos son provisorios, y están sujetos a modificaciones.

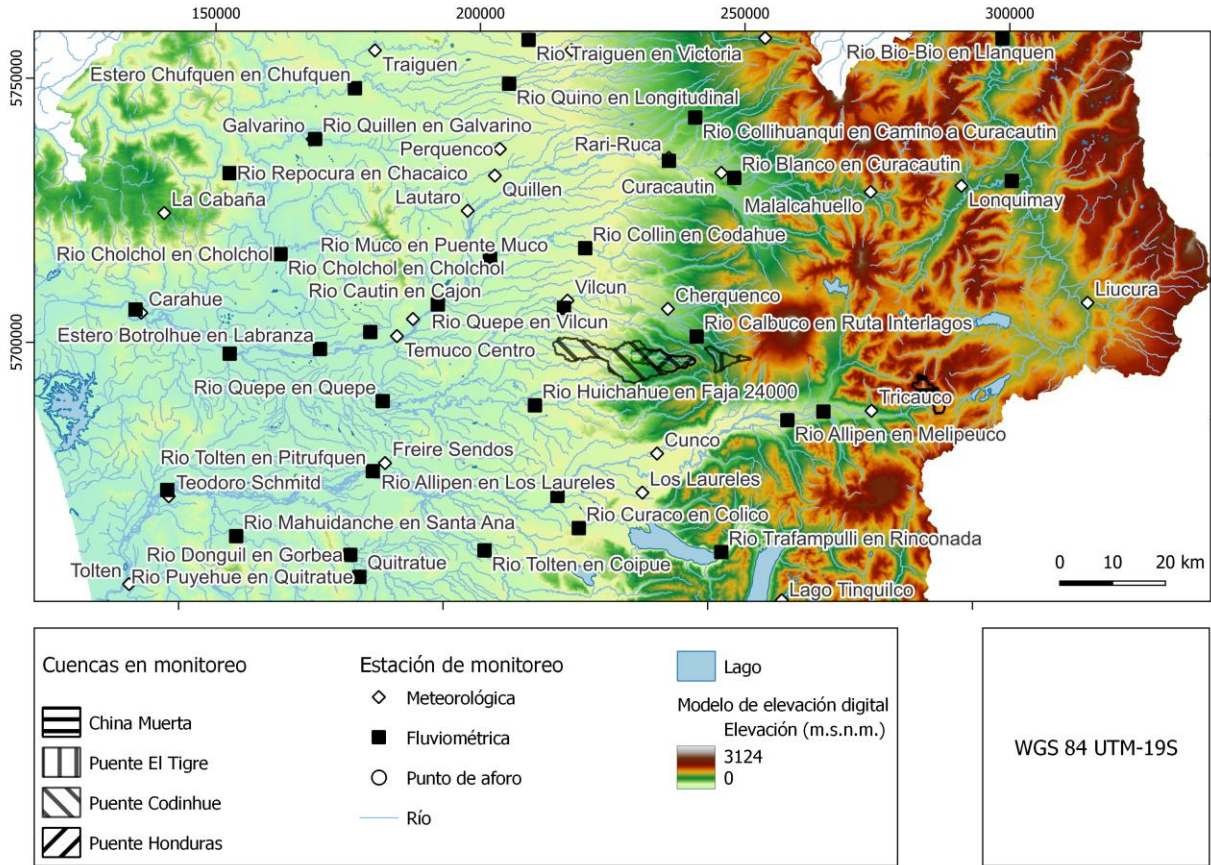


Figura 3.2 Localización estaciones meteorológica y fluviométrica sector área de estudio

Tabla 3.2 Estaciones fluviométricas sector área de estudio

Estación	Abreviación	Elevación (m.s.n.m.)	Latitud	Longitud
Río Allipén En Los Laureles	RALL	190	39° 00' 26"	72° 13' 48"
Río Allipén En Melipeuco	RAEM	450	38° 51' 55"	71° 44' 01"
Río Blanco En Curacautín	RBEC	405	38° 27' 18"	71° 52' 03"
Río Calbuco En Ruta Interlagos	RCERI	640	38° 43' 40"	71° 56' 15"
Río Cautín En Cajón	RCEC	130	38° 41' 12"	72° 30' 10"
Río Cautín En Rari-Ruca	RCER	425	38° 25' 48"	72° 00' 37"
Río Collihuanqui En Camino A Curacautín	RCECAC	590	38° 21' 06"	71° 57' 16"
Río Collín En Codahue	RCEC	250	38° 35' 00"	72° 11' 09"
Río Huichahue En Faja 24000	RHEF2	150	38° 51' 14"	72° 17' 05"
Río Lonquimay Antes Junta Río Bio Bio	RLAJRBB	940	38° 26' 34"	71° 15' 58"

Río Muco En Puente Muco	RMEPM	250	38° 36' 22"	72° 23' 31"
Río Quepe En Quepe	RQEQ	80	38° 51' 15"	72° 37' 01"
Río Quepe En Vilcún	RQEV	292	38° 41' 11"	72° 13' 41"
Río Quino En Longitudinal	RQEL	450	38° 18' 25"	72° 21' 41"
Río Triful En Camino Internacional	RTECI	520	38° 50' 21"	71° 39' 22"

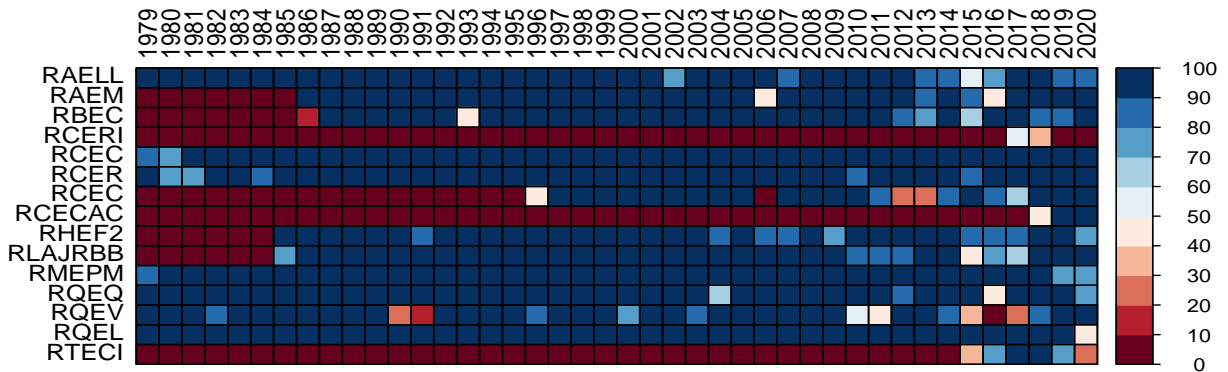


Figura 3.3 Disponibilidad datos de caudal medio diario estaciones sector área de estudio, en porcentaje

Series de precipitación y temperatura del producto satelital CR2Met

El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)² desarrolló el conjunto de datos CR2MET, que contiene información meteorológica (precipitación, temperaturas medias y extremas) en una grilla rectangular de 0.05° latitud-longitud (aproximadamente 5km) para el territorio de Chile continental en el periodo 1979-2020. Las versiones utilizadas en este estudio corresponden a:

- Producto de precipitación diaria versión 2.0.
- Producto de temperatura máxima, media y mínima diaria versión 2.0.

En la Figura 3.4 se muestra la grilla creada para la obtención de datos de precipitación y temperatura de los productos del CR2MET.

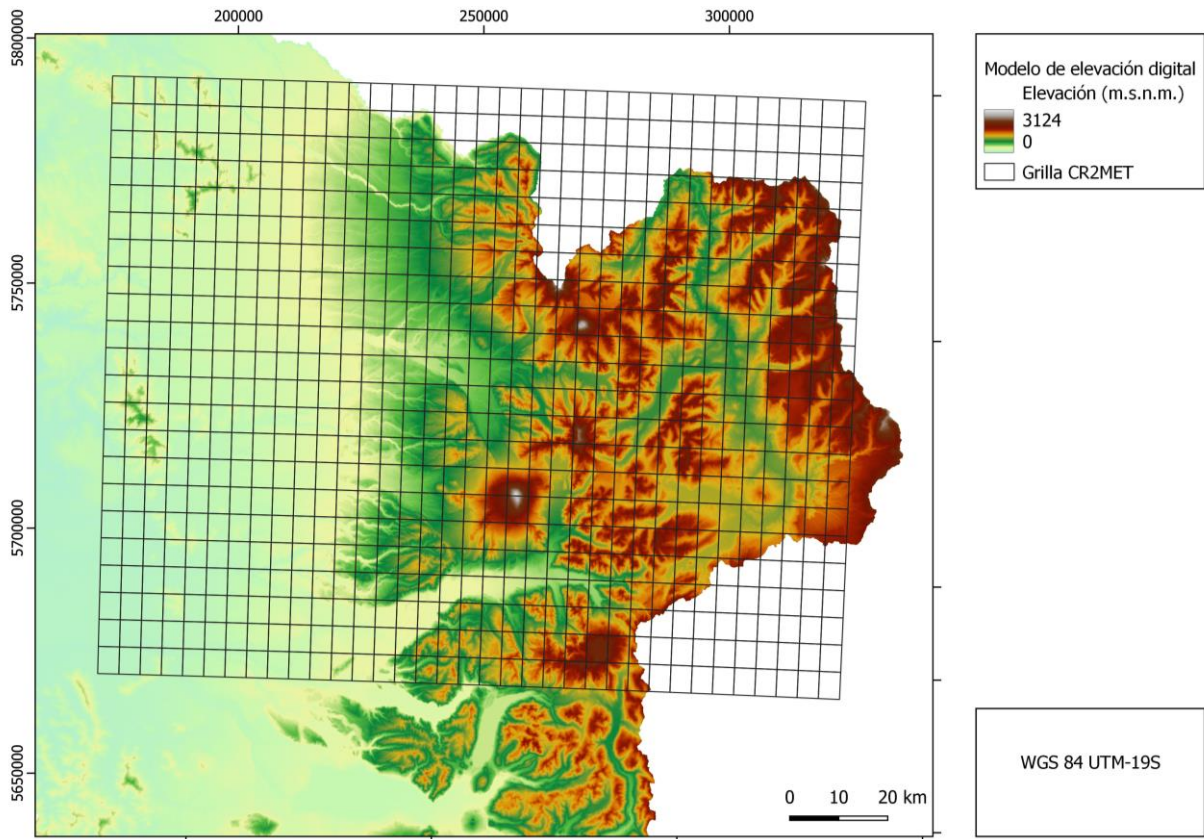


Figura 3.4 Grilla CR2MET

Para calcular la precipitación media anual y las series de precipitación diarias, temperatura media, máxima y mínima diaria, se utilizaron los productos del CR2MET, y se calculó el promedio ponderado en el área de la cuenca, con el fin de obtener valores representativos de toda la cuenca.

Series de caudal y temperatura en cuencas en monitoreo

Desde inicios del año 2023 las cuencas China Muerta, Puente El Tigre, Puente Codinhue y Puente Honduras se encuentran en monitoreo. Se han efectuado entre cinco y seis aforos de caudales en los puntos de aforo en las cuencas mencionadas. La Figura 3.5 muestra los caudales aforados y sus respectivas fechas.

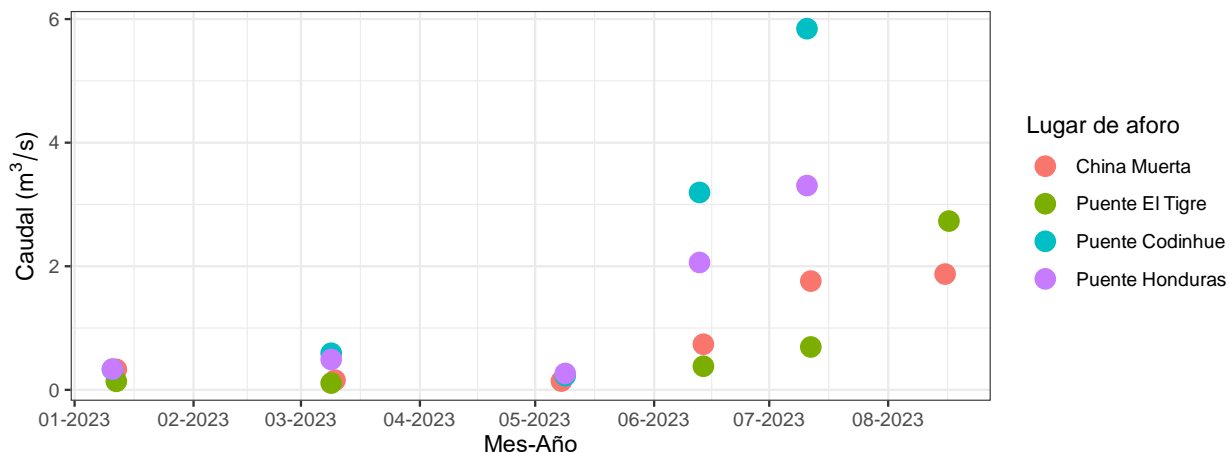


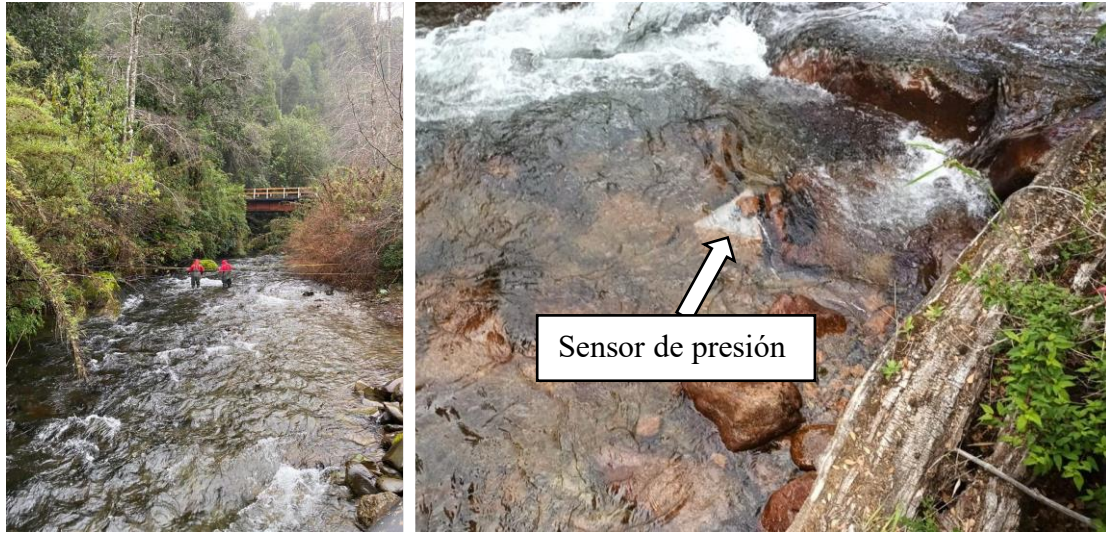
Figura 3.5 Caudal aforado en lugares de aforo

Paralelamente, se está midiendo la altura del agua mediante sensores de presión HOB0. En cada cuenca se cuenta con un sensor que registra presión atmosférica y otro en el lecho del cauce bajo el agua, registrando datos de presión y temperatura cada 15 minutos. La Tabla 3.3 muestra el inicio y fin del registro, así como la cantidad de datos disponibles de los sensores de presión en cada punto de aforo.

Tabla 3.3 Datos disponible sensores de presión

Punto de aforo	Inicio registro	Fin registro	Datos disponibles
China Muerta	12-01-2023	16-08-2023	216 días
Puente El Tigre	12-01-2023	17-08-2023	217 días
Puente Codinhue	11-01-2023	11-07-2023	181 días
Puente Honduras	11-01-2023	11-07-2023	181 días

La Figura 3.6 muestra una imagen del desarrollo del aforo de caudal en el punto Puente Honduras el día 11-07-2023 (a), también se muestra el sensor de presión para medir altura del agua (b).



(a)

(b)

Figura 3.6 Aforo de caudal Puente Honduras (a), y sensor de presión en China Muerta (b)

Los datos de caudal y altura de agua permitieron construir la curva de descarga en cada punto de aforo. La Figura 3.7 muestra la curva de descarga para cada punto de aforo.

Como se ve en la Figura 3.7, para todos los casos el ajuste de la curva tiene un R^2 superior a 0.9. Las curvas de los puntos de aforo China Muerta, Puente Codinhue y Puente Honduras son del tipo potencial. Al punto de aforo Puente El Tigre se le ajustó una curva exponencial.

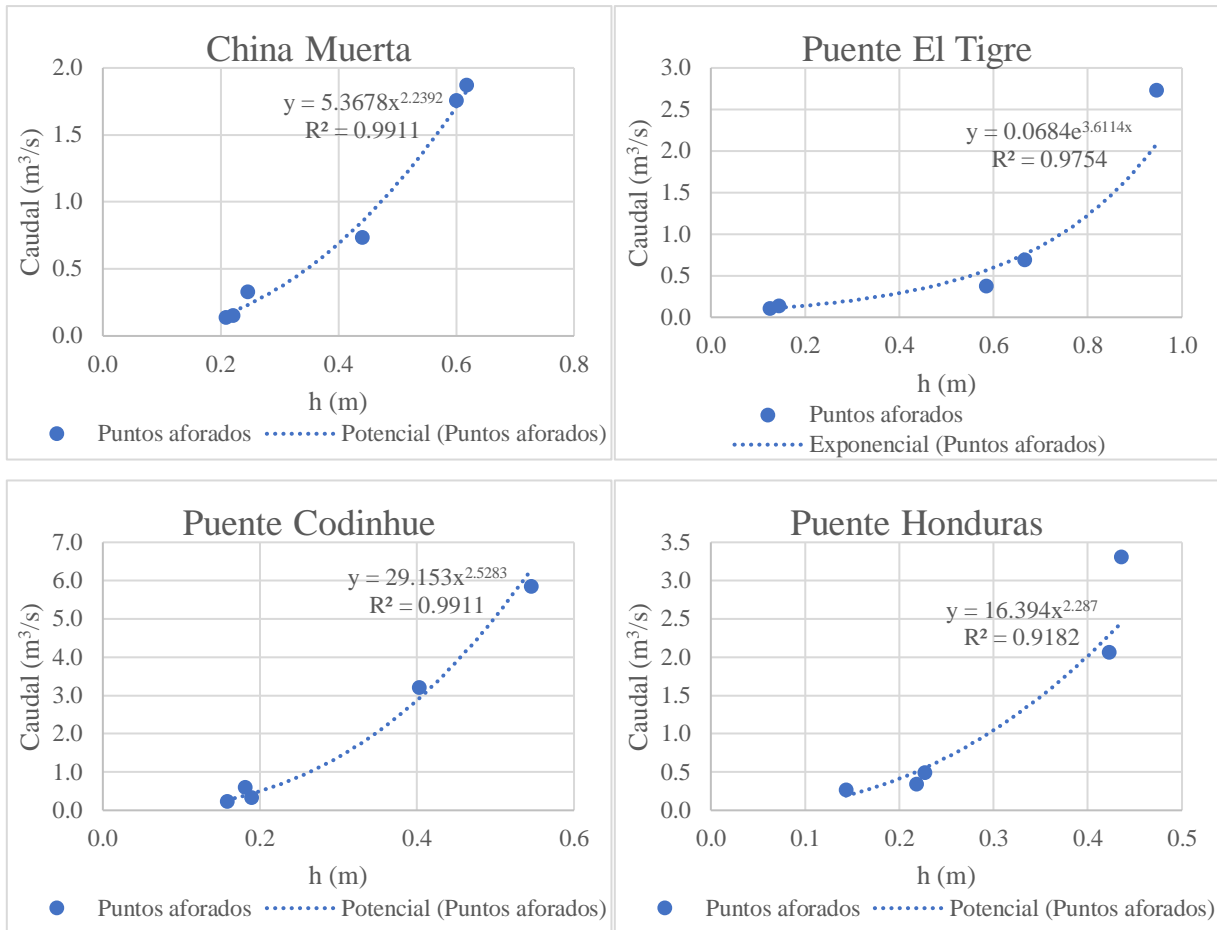


Figura 3.7 Curvas de descarga puntos de aforo

3.3.2. Información fisiográfica

Análisis relieve y morfología

El análisis de relieve y morfométrico de las cuencas se efectuó utilizando un modelo de elevación digital (MDE) de la Región de la Araucanía, obtenido de la Infraestructura de Datos Geospaciales de Chile, (IDE Chile). El MDE tiene resolución de 12.5 x 12.5 m. La Figura 3.8 muestra el modelo de elevación de la Región de la Araucanía.

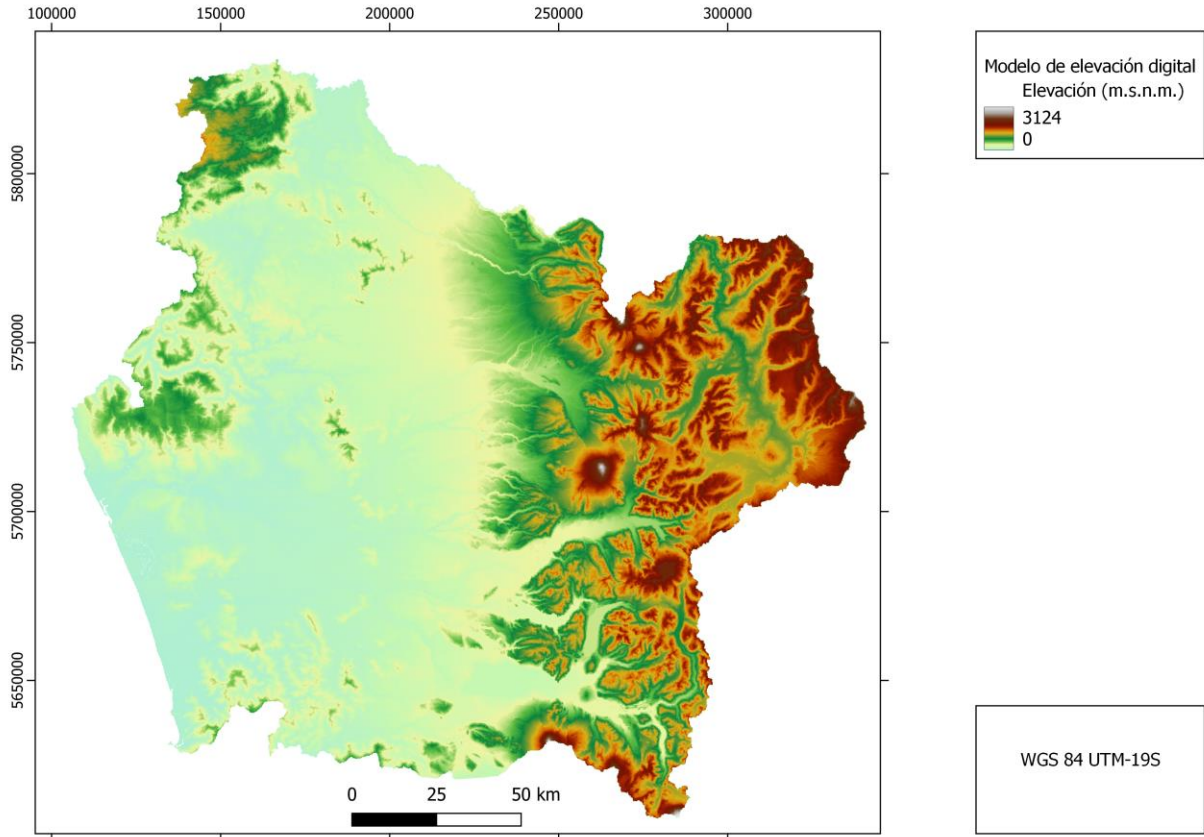


Figura 3.8 Modelo de elevación digital Región de la Araucanía

A través del modelo de elevación digital se obtuvo la elevación mínima, media y máxima, la pendiente media y la razón hipsométrica para cada cuenca en análisis. La razón hipsométrica se obtiene de la curva hipsométrica, que presenta la distribución acumulada de las elevaciones de una cuenca. Utilizando la ecuación (3.1) se calculó la razón hipsométrica.

$$R_h = \frac{S_s}{S_i} \tag{3.1}$$

Donde R_h es la razón hipsométrica, S_s y S_i son el área sobre y bajo la curva hipsométrica adimensional.

Utilizando el modelo de elevación digital se obtuvieron para cada cuenca en análisis los parámetros morfométricos que se muestran en la Tabla 3.4. También se muestra una descripción del parámetro y su ecuación de cálculo.

Tabla 3.4 Parámetros morfométricos calculados

Parámetro	Abreviación	Descripción	Ecuación
Área	A	Área que drena al punto de salida	-
Perímetro	P	Longitud borde de la cuenca	-
Longitud de la cuenca	L	Longitud de la cuenca medida a lo largo del cauce principal hasta la divisoria	-
Longitud cauce principal	L_c	Longitud de la cuenca medida a lo largo del cauce principal entre su nacimiento y el punto de desagüe	-
Longitud al centroide	L_{ca}	Longitud medida a lo largo del cauce principal entre punto de desagüe y el punto más cercano al centroide de área de la cuenca	-
Índice de Compacidad	I_c	Compara el perímetro de una cuenca con el perímetro de un círculo con igual superficie que la cuenca	$I_c = 0.282 \frac{P}{A}$
Índice de Circularidad	K_c	Compara el área de la cuenca con el área de un círculo cuyo perímetro es igual al perímetro de la cuenca	$K_c = 4\pi \frac{A}{P^2}$
Factor de Forma	K_f	Razón entre el ancho medio y la longitud de la cuenca medida a lo largo del cauce principal hasta la divisoria	$K_f = \frac{A}{L^2}$
Razón de elongación	R_e	Razón entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma	$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L}$

Uso de suelo

La información de uso de suelo utilizada se obtuvo del Proyecto “Catastros Recursos Vegetacionales y Usos de la Tierra de Chile” de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), donde se tienen las coberturas cartográficas en formato *shapefile* de la Región de la Araucanía. En este

estudio se utilizó la versión actualizada del año 2014. La Figura 3.9 muestra el uso de suelo en la Región de la Araucanía. Se calculó el porcentaje de uso de suelo para cada cuenca en análisis.

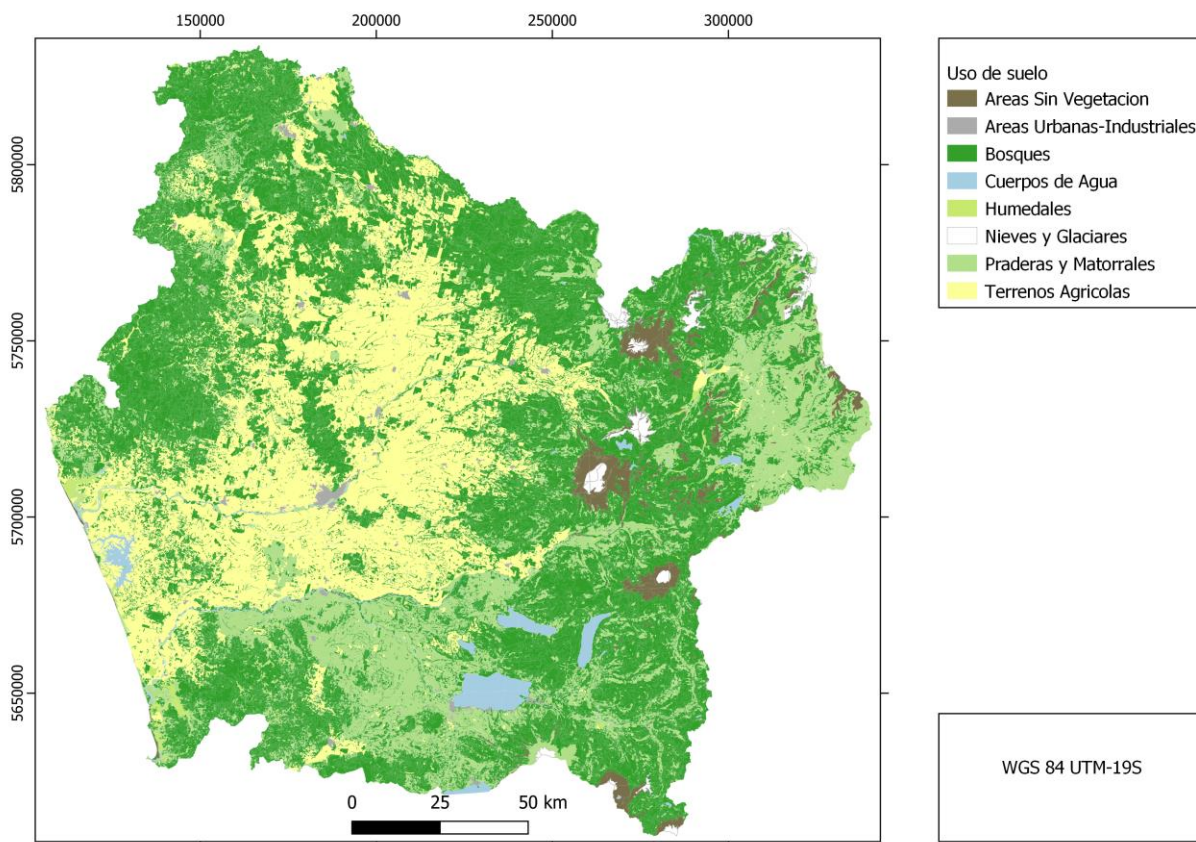


Figura 3.9 Uso de suelo Región de la Araucanía

3.3.3. Derechos de aprovechamientos de agua

El análisis de derechos de agua se efectuó utilizando la base de datos Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en la DGA, utilizando en específico el listado de derechos concedidos para la Región de la Araucanía. Previo al análisis se estandarizaron las unidades de caudal a m^3/s , los derechos de acciones y porcentaje de acciones no se consideraron. Asimismo, se estandarizó el datum de los derechos, re proyectando las coordenadas, considerando el datum WGS 84 UTM-19S

como el estándar. En la Figura 3.10 se observa la localización de los derechos de aprovechamientos entregados en la Región de la Araucanía.

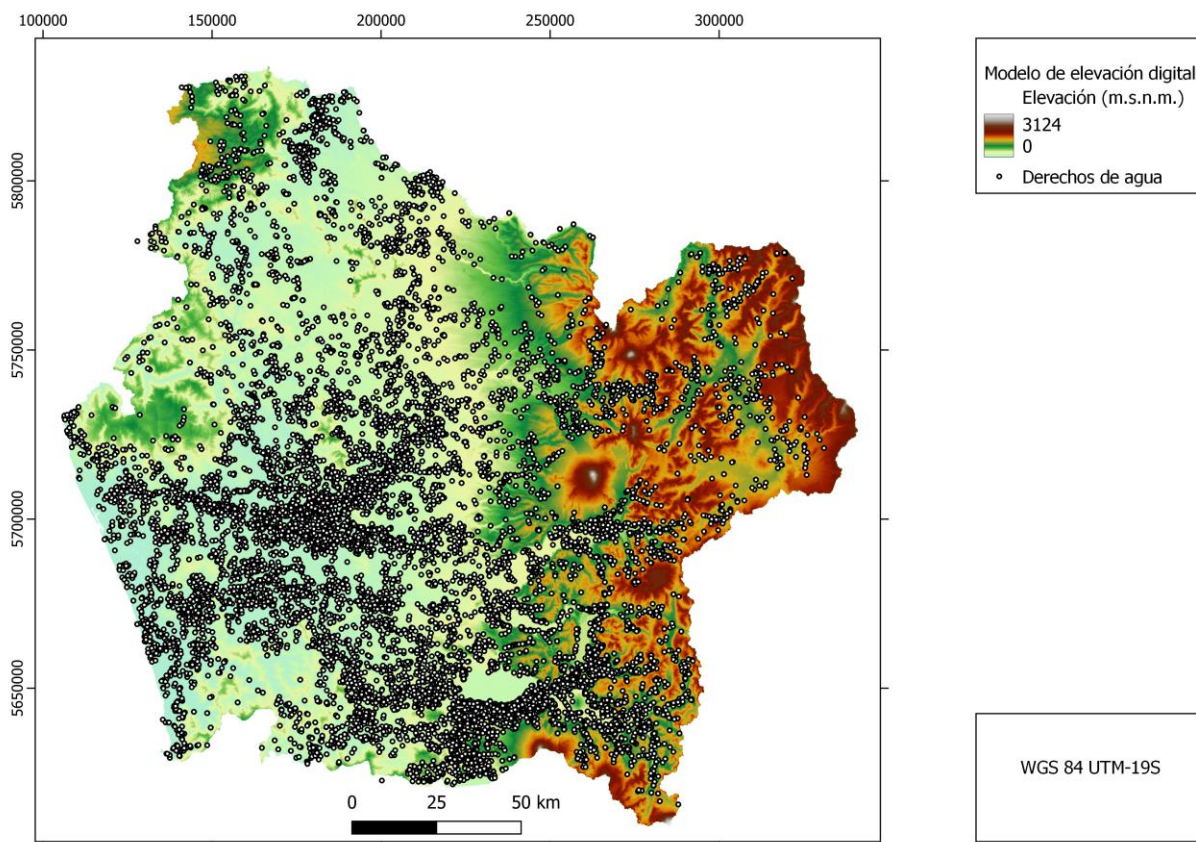


Figura 3.10 Derechos de aprovechamientos de agua Región de la Araucanía

3.4. Métodos de regionalización

A continuación, se muestran los métodos de regionalización con los que se formularon los modelos de predicción de caudales. Se utilizaron métodos hidrológicamente independientes, ya que estos son más simples de aplicar, requieren menor cantidad de datos y conocimientos.

Para el desarrollo de todos los métodos se utilizó el caudal específico en vez del caudal, a continuación, se muestra la ecuación para su cálculo:

$$q = \frac{Q}{A} \tag{3.2}$$

donde q es el caudal medio diario específico, Q es el caudal medio diario y A es el área de la cuenca. El proceso de calibración y validación de los modelos se esquematiza en la Figura 3.11. En la Tabla 3.5 se muestran los métodos de regionalización utilizados y sus respectivas ecuaciones.

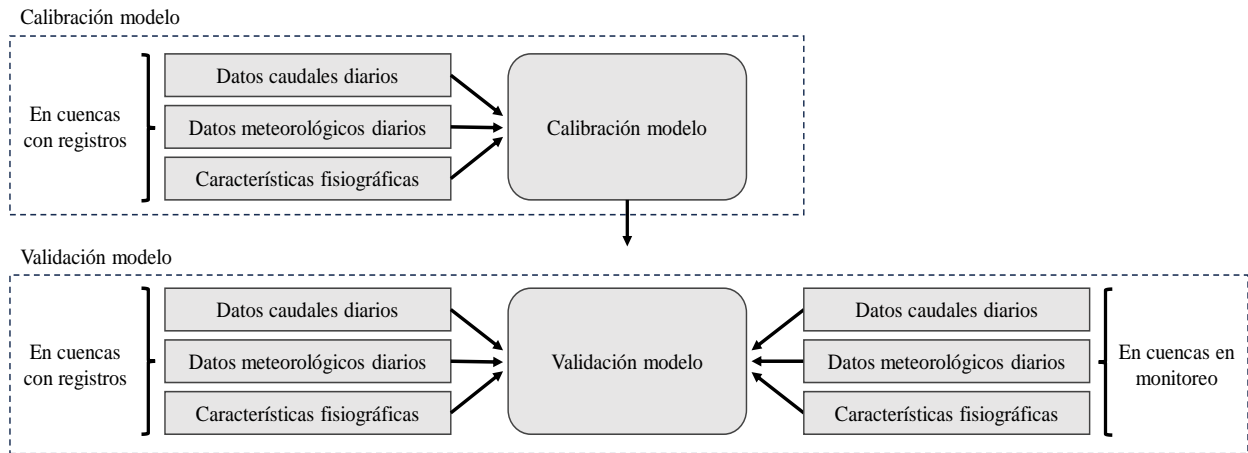


Figura 3.11 Esquema calibración y validación métodos de regionalización

Tabla 3.5 Métodos de regionalización

Método	Abreviación	Ecuación
Transposición	MT	$q_1 = q_2$ (3.3)
Regresión lineal	MRL	$q_1 = k + \alpha_1 q_2$ (3.4)
Regresión lineal logarítmica	MRLl	$\ln q_1 = k + \alpha_1 \ln q_2$ (3.5)

Regresión lineal múltiple	MRLM	$q_1 = k + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_p x_p$ (3.6)
Regresión lineal logarítmica múltiple	MRLLM	$\ln q_1 = k + \alpha_1 + \dots + \alpha_p \ln x_p$ (3.7)

donde q_1 es el caudal medio diario específico en la cuenca objetivo, q_2 es el caudal medio diario específico de la cuenca donante, α_1 , α_2 y α_p son coeficientes de la regresión y x_1 , x_2 y x_p , son variables predictoras.

En los métodos de regresión lineal múltiple y regresión logarítmica múltiple se aplicaron regresiones *stepwise*, que consisten en añadir o eliminar iterativamente variables predictoras, con el fin de encontrar el subconjunto de variables del conjunto de datos que den como resultado el modelo con menor error de predicción. El conjunto de posibles variables predictoras consiste en la serie de caudal de una cuenca donante, las series de precipitación y temperatura de la cuenca objetivo, la precipitación anual, los parámetros morfométricos y el porcentaje de uso de suelo de la cuenca objetivo. Se asume que la precipitación anual, los parámetros morfométricos y el porcentaje de uso de suelo permanecen constantes en el tiempo.

Los métodos de las ecuaciones (3.5) y (3.7) requieren que los valores de q_1 , q_2 , x_1 , x_2 y x_p sean mayores que cero, en otro caso, estas ecuaciones serían inválidas. Para evitar esto, se suma una unidad a todas las variables predictoras, salvo a las variables de temperatura, a las que se les suman 20°C.

3.5. Calibración

El proceso de calibración consiste en ajustar los coeficientes de un modelo para que los valores simulados por éste se aproximen lo más posible a los valores observados. Se formuló una base de datos de calibración, con cuencas que debiesen tener un comportamiento hidrológico similar a las cuencas en monitoreo.

Se determinaron pares de cuencas en el área de estudio, de tal forma que se utilizó información fluviométrica de una cuenca (cuenca donante) para simular el caudal en otra cuenca (cuenca objetivo). La selección de la cuenca donante se efectuó seleccionando la cuenca con registros aguas abajo más cercana u otra cuenca con registros cercana, además se seleccionó para cada par un año de datos con un porcentaje disponibilidad de datos mayor al 90%. Por último y considerando el supuesto de porcentaje de uso de suelo constante, se seleccionaron periodos cercanos a la fecha de elaboración de los datos de uso de suelo disponibles.

En la Tabla 3.6 se muestran los pares de cuencas utilizados para la calibración. La Figura 3.12 muestra la localización de las cuencas objetivo y donante de la calibración.

Tabla 3.6 Pares de cuencas calibración

Cuenca objetivo	Cuenca donante	Periodo de datos
Río Collihuaqui camino a Curacautín	Río Quino en Longitudinal	2019
Río Collín en Codahue	Río Muco en Puente Muco	2018
Río Huichahue en Faja 24000	Río Quepe en Quepe	2019

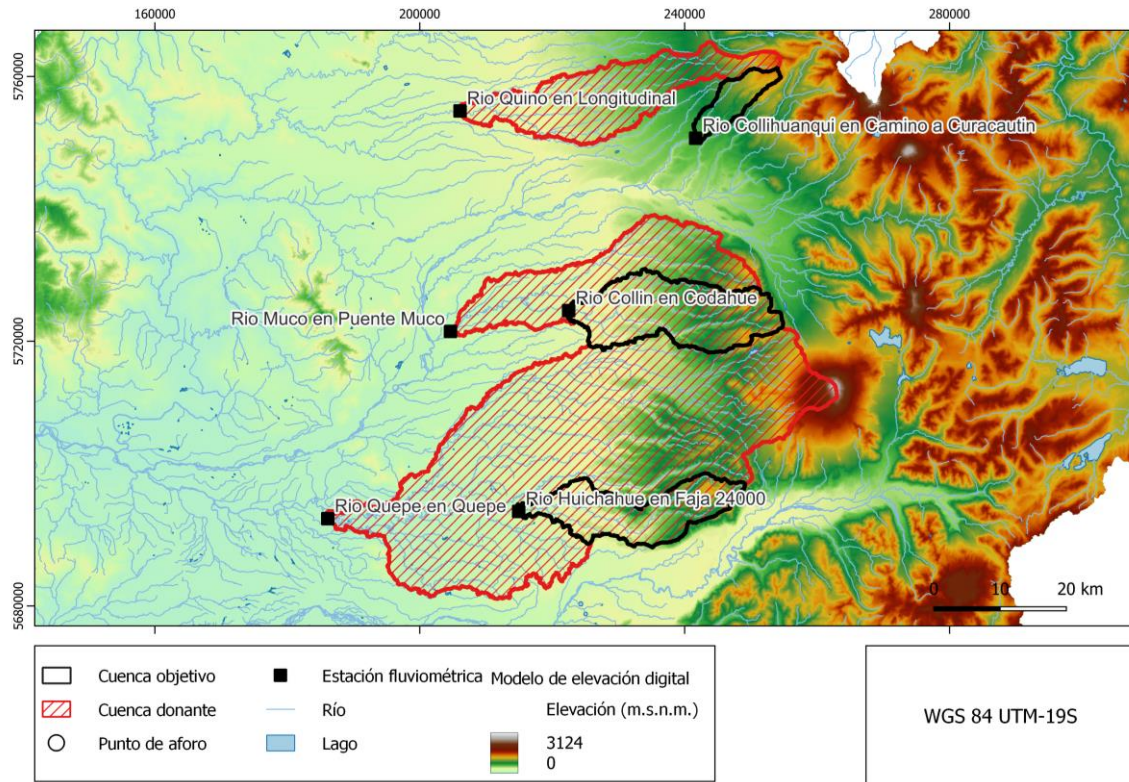


Figura 3.12 Localización cuencas objetivo/donante calibración

3.6. Validación

Para validar los modelos generados, se aplicaron los modelos y se compararon los valores simulados con los observados. Se realizó una comparación gráfica y se calculó el coeficiente de determinación, la eficiencia de Nash y Sutcliffe y el Percent Bias, medidas de bondad de ajuste (MBA) que permiten conocer que tan cercanos son los valores simulados con los observados. A continuación, se describen las ecuaciones para el cálculo de las medidas de bondad de ajuste mencionadas.

Coefficiente de determinación R^2

Se utiliza para estimar la calidad del ajuste de un modelo, se determina según la siguiente ecuación:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (3.8)$$

Donde O_i es el valor observado, S_i es el valor simulado, \bar{O} y \bar{S} son los valores observados y simulados promedio. El valor de R^2 varía entre 0, para un ajuste nulo y 1 para un ajuste perfecto. Generalmente valores iguales o mayores a 0.7 permiten afirmar buena concordancia entre dos series de valores.

Eficiencia de Nash y Sutcliffe

La eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) fue desarrollada por Nash y Sutcliffe (1970) para evaluar modelos hidrológicos, se define como:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.9)$$

Donde O_i es el valor observado, S_i es el valor simulado y \bar{O} es el promedio de los valores observados. El NSE tiene un rango entre $-\infty$ y 1, mientras más se acerque al 1, más preciso es el modelo. $NSE=1$ indica ajuste perfecto, $NSE = 0$ indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados. $NSE < 0$ indica que la media de los datos observados es mejor predictor que el modelo. Valores mayores a 0.75 indican un buen ajuste, entre 0.75 y 0.35 se considera satisfactorio, menores a 0.35 se considera no satisfactorio.

Percent Bias

El Percent Bias (PBIAS) mide la tendencia media de los valores simulados a ser mayores o menores que los observados, se define como:

$$PBIAS=100 \frac{\sum_{i=1}^n (S_i-O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3.10)$$

Donde O_i es el valor observado y S_i es el valor simulado. El valor óptimo del PBIAS es 0.0, siendo los valores de pequeñas magnitudes indicadores de un buen ajuste. Valores positivos indican sobreestimación, valores negativos indican subestimación. Valores absolutos menores a 20% indican un buen ajuste, entre 20 y 40% se considera satisfactorio, mayores a 40% se considera no satisfactorio.

Datos de validación

En la validación 1, se utilizan los mismos pares de cuencas utilizados en la calibración en distintos años, exceptuando el par Río Collínhuaqui camino a Curacautín-Río Quino en Longitudinal, que carecen de otro año completo de datos coincidentes aparte del año 2019. En vez del par recién mencionado se utiliza el par Río Quepe en Vilcún-Río Quepe en Quepe. En la Tabla 3.7 se muestran los pares de cuencas, y su periodo de datos considerado, utilizados para la validación 1. La Figura 3.13 muestra la localización de las cuencas objetivo y donante de la validación 1.

Tabla 3.7 Pares de cuencas utilizados para la validación 1

Cuenca objetivo	Cuenca donante	Periodo de datos
Río Collín en Codahue	Río Muco en Puente Muco	2009
Río Huichahue en Faja 24000	Río Quepe en Quepe	2018
Río Quepe en Vilcún	Río Quepe en Quepe	2006

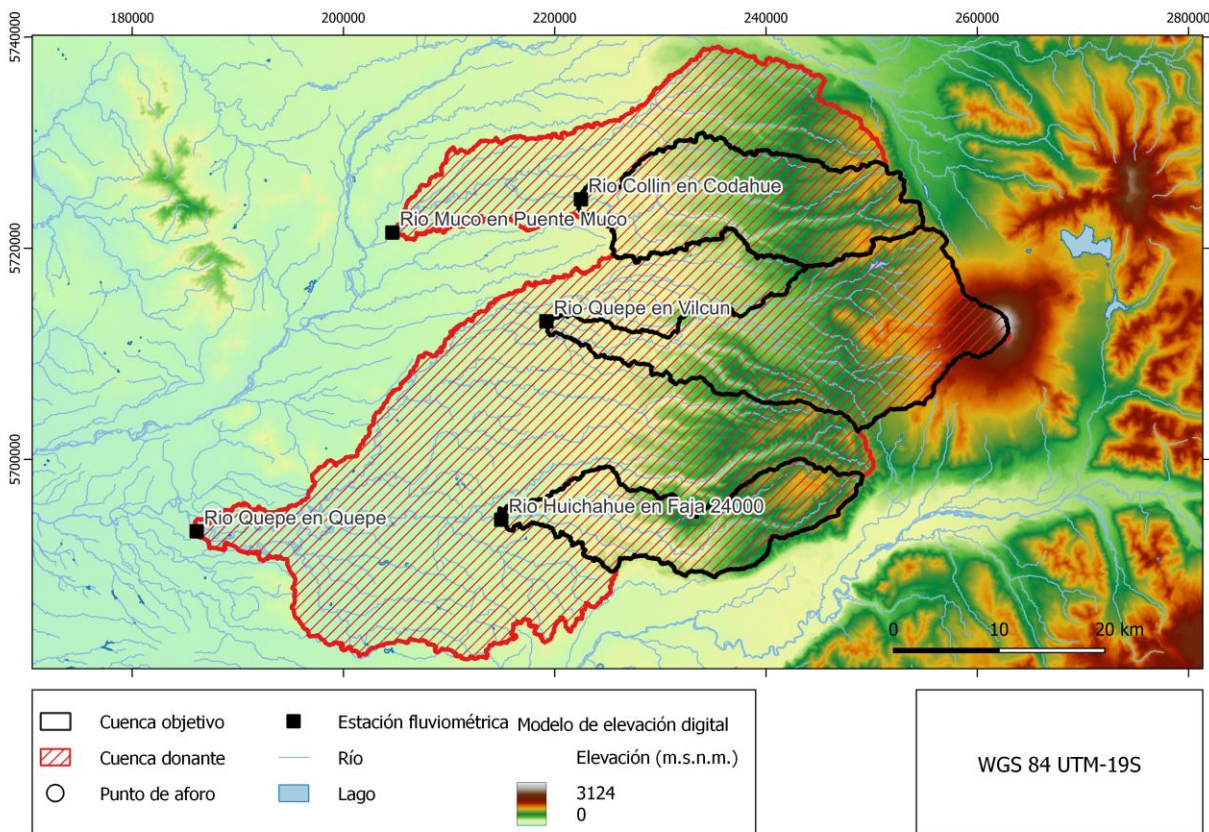


Figura 3.13 Localización cuencas objetivo/donante validación 1

En la validación 2, también se determinaron pares de cuenca, y se utilizó información del Sistema Hidrométrico en Línea, tanto para caudales como para precipitación, asumiendo una precipitación uniforme en toda la cuenca. Para temperatura se utilizó la medida en los sensores HOBO, asumiendo una temperatura uniforme en toda la cuenca. En la Tabla 3.8 se muestran los pares de cuencas utilizados para la validación 2 y la estación con datos de precipitación utilizada. La Figura 3.14 muestra la localización de las cuencas objetivo y donante de la validación 2.

Tabla 3.8 Pares de cuencas y estación pluviométrica validación 2

Cuenca objetivo	Cuenca donante	Estación pluviométrica
China Muerta	Río Allipén en Los Laureles	Río Triful En Camino Internacional
Puente El Tigre	Río Huichahue en Faja 24000	Cherquenco

Puente Codinhue	Río Huichahue en Faja 24000	Vilcún
Puente Honduras	Río Huichahue en Faja 24000	Cherquenco

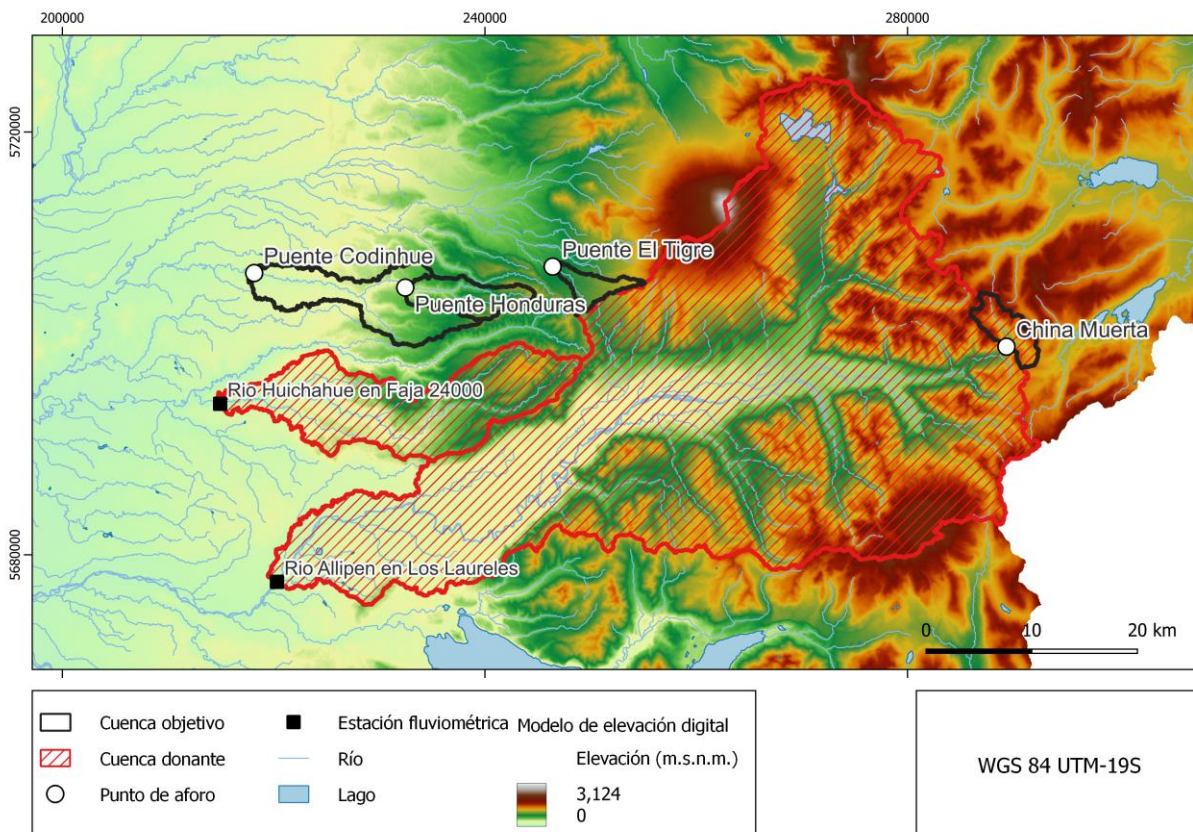


Figura 3.14 Localización cuencas objetivo/donante validación 2

3.7. Simulación series de caudales

Obtenidos los resultados de la validación de los modelos, se procedió a simular las series de caudales históricos de las cuencas en monitoreo, utilizando las cuencas donantes enunciadas en la Tabla 3.8, ocupando el modelo con mejor ajuste.

3.8. Conclusión

Se presentaron las cuencas en monitoreo, luego se proporcionaron las fuentes de información junto a las fuentes y métodos de obtención de características hidrometeorológicas y fisiografías de las cuencas en análisis. Por último, se mostraron los métodos de elaboración de modelos de predicción de caudales medios diarios, detallando su calibración y validación.

4. RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan las características hidrometeorológicas y fisiográficas de las cuencas en análisis, así como los resultados del análisis de derechos de aguas. También se presentan los resultados de la calibración y validación de los modelos de regionalización de caudales medio diarios. Finalmente se presenta un registro de caudales medios diarios en las cuencas en monitoreo, generados a partir de los modelos formulados.

4.2. Características hidrometeorológicas

4.2.1. Series de caudal cuencas con registros

La Figura 4.1 muestra curvas suavizadas del caudal medio diario específico en las cuencas con registro.

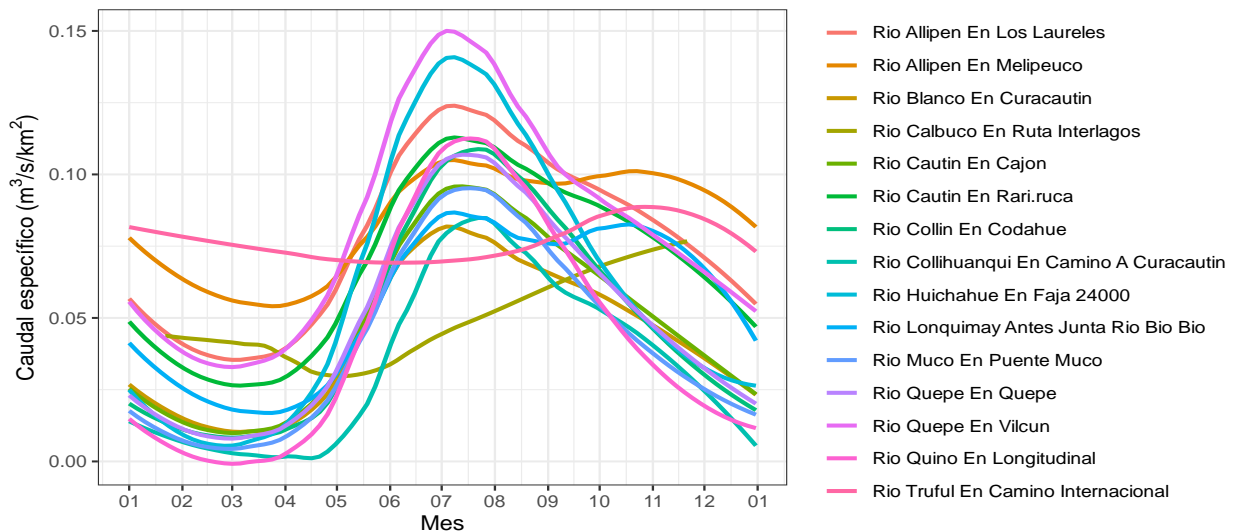


Figura 4.1 Caudal específico medio diario cuencas con registro

De la Figura 4.1 se pueden desprender los regímenes hidrológicos de las cuencas aportantes a las estaciones fluviométricas. Se pueden distinguir regímenes pluviales, pluvionivales y nivales. Los

ríos Blanco en Curacautín, Cautín en Cajón, Cautín en Rari-Ruca, Collín en Codahue, Collihuanqui en camino a Curacautín, Huichahue en Faja 24000, Río Muco en Puente Muco, Quepe en Quepe, y Quino en Longitudinal presentan un régimen pluvial. Los ríos Allipén en los Laureles, Allipén en Melipeuco, Lonquimay antes de río Biobío, Quepe en Vilcún presentan un régimen pluvionival. El río Calbuco en Ruta Interlagos no tiene datos de caudal medio en todo el año, a pesar de esto se puede asumir que tiene un régimen nival. El río Triful en Camino Internacional también tiene un régimen nival.

4.2.2. Series de precipitación

La Figura 4.2 muestra la precipitación media diaria con curvas suavizadas en las cuencas en análisis. Se puede observar que las cuencas en análisis tienen tendencias de precipitación similares, concentrándose las precipitaciones en los meses de invierno. Los meses de verano, en especial enero y febrero son cuando menos precipita.

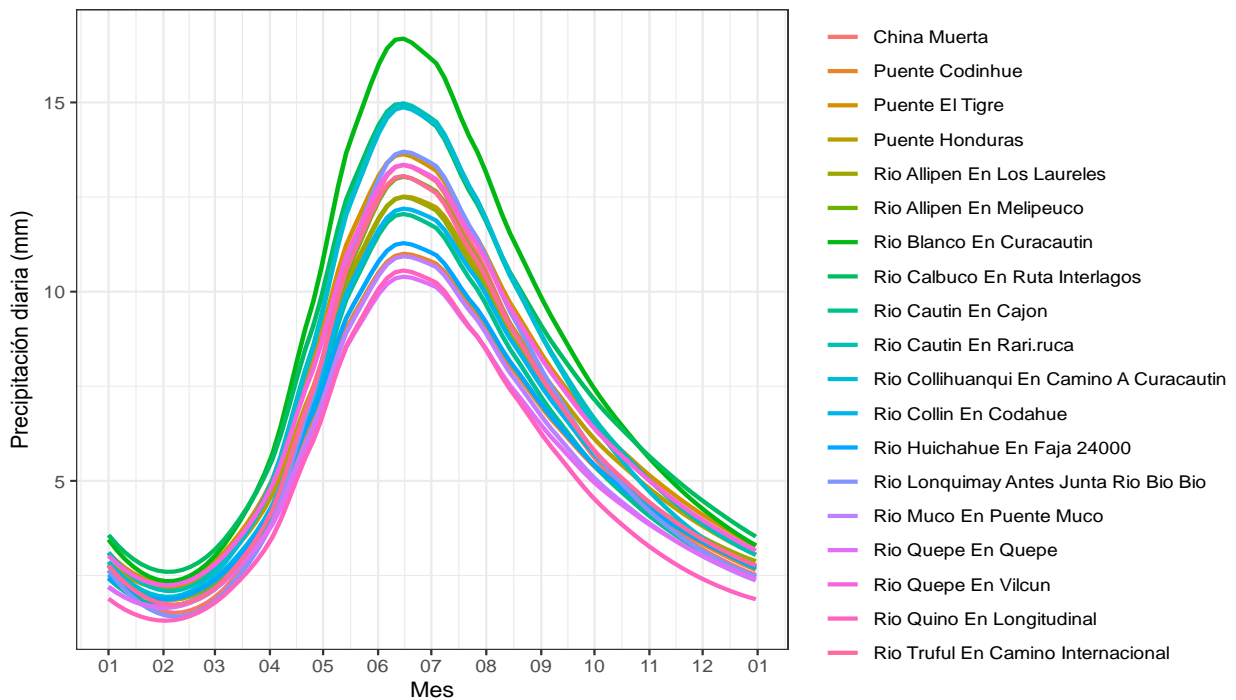


Figura 4.2 Precipitación media diaria cuencas en análisis

La Tabla 4.1 se muestra la precipitación media anual de las cuencas en análisis.

Tabla 4.1 Precipitación media anual cuencas en análisis

Cuenca	Precipitación media anual (mm)
China Muerta	2305
Puente Codinhue	2096
Puente El Tigre	2567
Puente Honduras	2381
Río Allipén En Los Laureles	2287
Río Allipén En Melipeuco	2322
Río Blanco En Curacautín	2993
Río Calbuco En Ruta Interlagos	2816
Río Cautín En Cajón	2173
Río Cautín En Rari.ruca	2682
Río Collihuanqui En Camino A Curacautín	2629
Río Collín En Codahue	2259
Río Huichahue En Faja 24000	2132
Río Lonquimay Antes Junta Río Bio Bio	2341
Río Muco En Puente Muco	2015
Río Quepe En Quepe	1951
Río Quepe En Vilcún	2510
Río Quino En Longitudinal	1854
Río Triful En Camino Internacional	2334

En la Tabla 4.1 se observa que todas las cuencas en análisis, salvo Río Quepe en Quepe y Río Quino en Longitudinal sobrepasan una precipitación media anual de 2000 mm. La cuenca Río Blanco En Curacautín cuenta con la máxima precipitación media anual de las cuencas analizadas, con 2993 mm.

4.2.3. Series de temperatura

La Figura 4.3 muestra la temperatura media diaria en las cuencas en análisis.

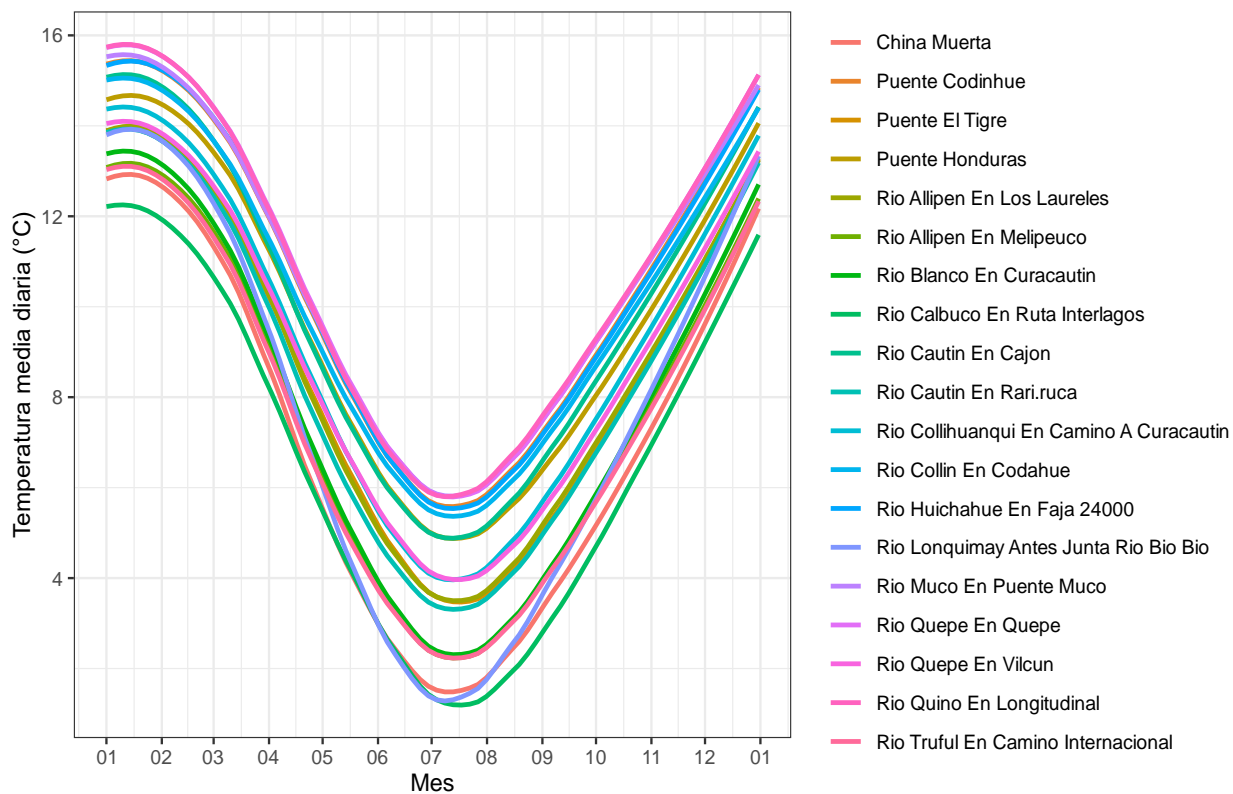


Figura 4.3 Temperatura media diaria cuencas en análisis

4.2.4. Series de caudal cuencas en monitoreo

La Figura 4.4 muestra las series de caudales medios diarios observados en las cuencas en monitoreo. Los valores observados indican que, para todas las cuencas en monitoreo, se han medido periodos de caudales bajos entre los meses 01-2023 y mediados del 05-2023, y también caudales altos a partir de mediados del mes 05-2023.

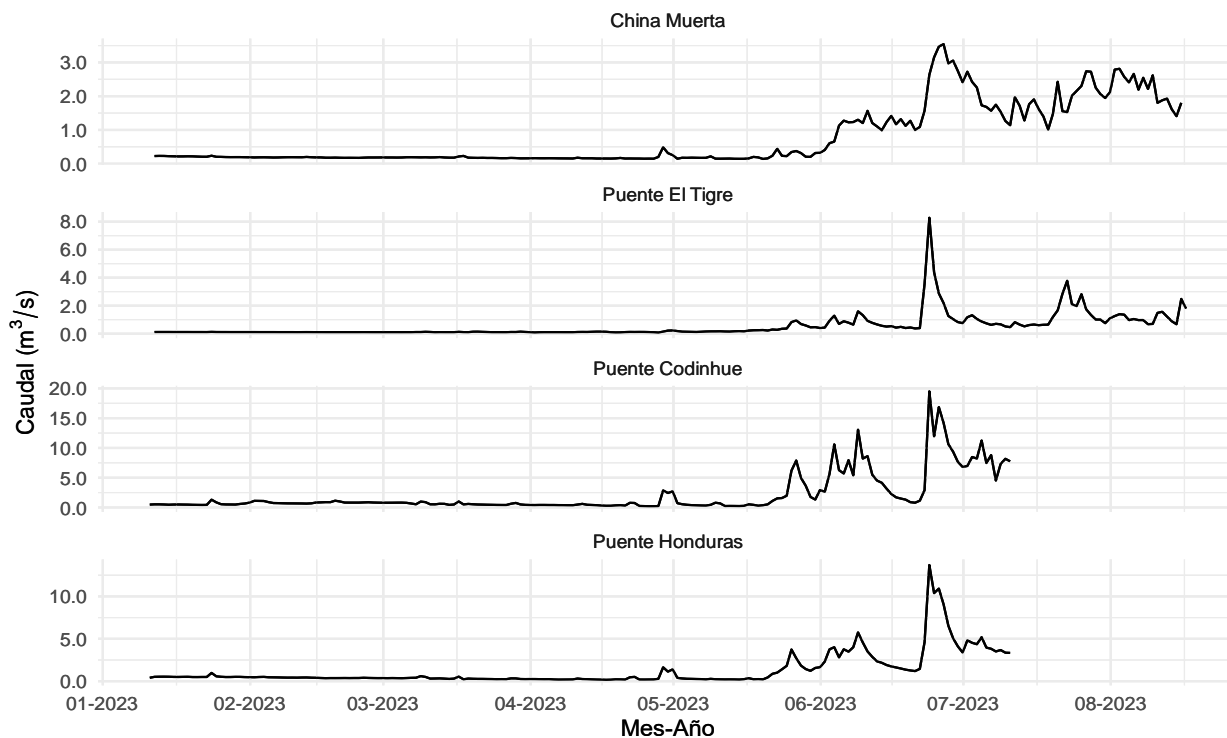


Figura 4.4 Caudal medio diario cuencas en monitoreo

4.3. Características fisiográficas

4.3.1. Parámetros relieve

En la Figura 4.5 se muestra un modelo de elevación digital para cada cuenca en monitoreo, además se muestra su cauce principal y el punto de aforo. La Tabla 4.2 muestra la elevación media, mínima y máxima, así como la pendiente media y razón hipsométrica de las cuencas en análisis.

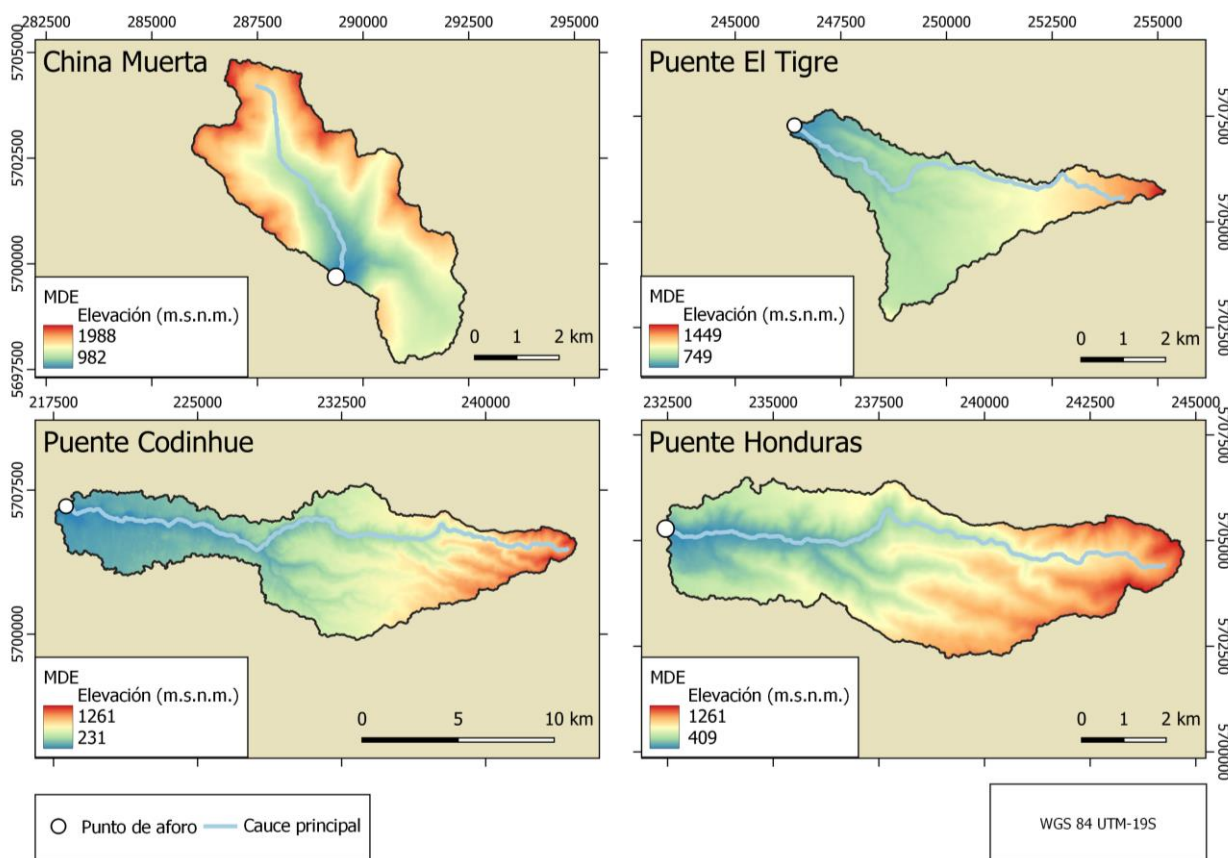


Figura 4.5 Relieve cuencas en monitoreo

Tabla 4.2 Características relieve cuencas en análisis

Cuenca	Elevación media (m.s.n.m.)	Elevación mínima (m.s.n.m.)	Elevación máxima (m.s.n.m.)	Pendiente media (%)	Razón hipsométrica
CHM	1486	982	1988	46.2	1.0
PET	997	749	1449	12.9	1.9
PNC	588	231	1261	24.3	1.9
PNH	799	409	1261	38.7	1.2
RAELL	1053	215	3095	31.3	2.0
RAEM	1325	472	3095	39.7	1.4
RBEC	1330	590	2842	27.8	2.0
RCERI	1425	668	3086	22.4	2.2
RCEC	780	128	3085	19.7	3.5
RCER	1150	421	3085	28.5	2.7
RCECAC	981	587	1510	17.3	1.3
RCEC	689	229	1447	21.3	1.7

RHEF2	630	155	1401	25.3	1.6
RLAJRBB	1372	903	2539	31.7	2.5
RMEPM	578	173	1447	17.0	2.2
RQEQ	515	68	3086	16.8	5.7
RQEV	950	285	3086	21.5	3.2
RQEL	604	298	1704	9.2	3.6
RTECI	1375	540	3094	37.0	2.1

4.3.2. Parámetros morfométricos

La Tabla 4.3 muestra parámetros morfométricos calculados de las cuencas en análisis.

Tabla 4.3 Parámetros morfométricos cuencas en análisis

Cuenca	A (km ²)	P (km)	L (km)	L _c (km)	L _{ca} (km)	I _c	K _c	K _f	R _e
CHM	20	32	6.7	5.9	2.1	2.02	0.25	0.45	0.75
PET	14.6	34	11.2	10.2	5.1	2.51	0.16	0.12	0.38
PNC	107.7	103	33.5	32.9	16.9	2.8	0.13	0.1	0.35
PNH	31.3	43	14.9	14.3	6.9	2.17	0.21	0.14	0.42
RAELL	1648.1	287	112.7	107.3	77.9	1.99	0.25	0.13	0.41
RAEM	821.4	185	36.6	31.2	26.8	1.82	0.3	0.61	0.88
RBEC	165.9	84	31.5	28.6	20.1	1.84	0.3	0.17	0.46
RCERI	63.4	53	21.4	16.3	12.1	1.88	0.28	0.14	0.42
RCEC	2701.2	354	155.5	150.8	79	1.92	0.27	0.11	0.38
RCER	1250.7	210	75.5	70.8	37.6	1.67	0.36	0.22	0.53
RCECAC	56.6	45	19.2	17.2	9.5	1.69	0.35	0.15	0.44
RCEC	258.9	105	41.2	40.2	23.7	1.84	0.3	0.15	0.44
RHEF2	194.5	105	48.6	47.7	25.2	2.12	0.22	0.08	0.32
RLAJRBB	461.4	151	52.8	49.8	24.8	1.98	0.25	0.17	0.46
RMEPM	571.5	167	65.4	62.1	41.7	1.97	0.26	0.13	0.41
RQEQ	1665.8	271	118.9	113.7	64.2	1.87	0.29	0.12	0.39
RQEV	375.7	173	58.9	55.3	37	2.52	0.16	0.11	0.37
RQEL	299	147	63.7	54.2	31.1	2.4	0.17	0.07	0.31
RTECI	371.7	118	36.2	34.6	18.7	1.73	0.34	0.28	0.6

4.3.3. Uso de suelo

En la Figura 4.6 se muestra el uso de suelo en las cuencas en monitoreo. La Tabla 4.4 muestra el uso de suelo en porcentaje para las cuencas en análisis.

Para las cuencas en monitoreo, los bosques superan el 78.5 % del uso de suelo en todos los casos, llegando a un máximo de 87.9% en la cuenca Puente Honduras. También todas las cuencas en monitoreo presentan entre 6.0% y 17.6% de praderas y matorrales. Únicamente la cuenca China Muerta tiene áreas sin vegetación, que conforma el 10.5% del área de la cuenca. Las cuencas Puente Codinhue y Puente Honduras tienen áreas con terrenos agrícolas, que conforman el 15.7% y 2.7% del área de la cuenca, respectivamente. En las cuencas con registro, el uso de suelo predominante es también el de bosque.

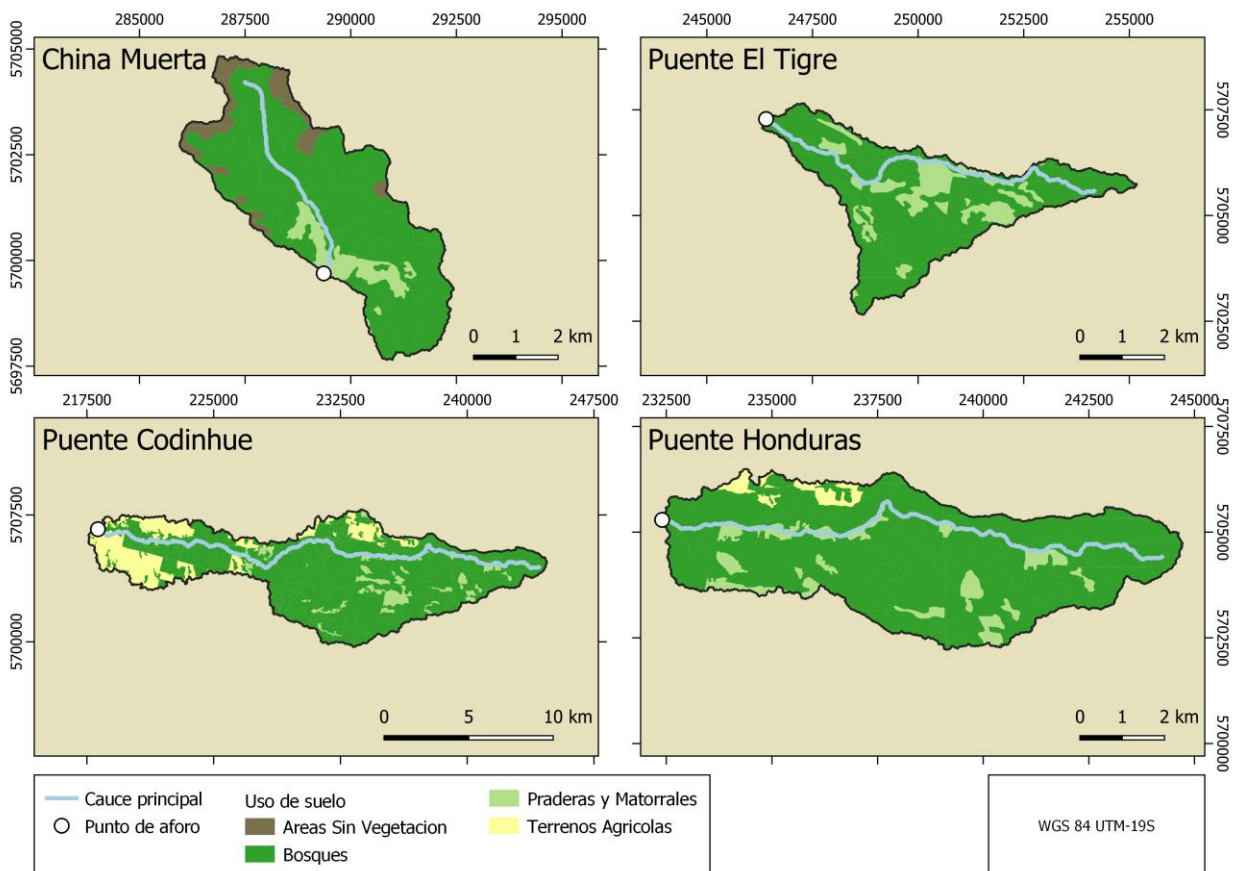


Figura 4.6 Uso de suelo cuencas en monitoreo

Tabla 4.4 Uso de suelo cuencas en análisis, en porcentaje

Cuenca	Áreas Sin Vegetación	Áreas Urbanas-Industriales	Bosques	Cuerpos de Agua	Humedales	Nieves y Glaciares	Praderas y Matorrales	Terrenos Agrícolas
CHM	10.5	0.0	81.4	0.0	0.0	0.0	8.1	0.0
PET	0.0	0.0	82.4	0.0	0.0	0.0	17.6	0.0
PNC	0.0	0.0	78.5	0.0	0.0	0.0	6.0	15.6
PNH	0.0	0.0	87.9	0.0	0.0	0.0	9.4	2.7
RAELL	11.7	0.2	56.7	1.0	0.2	3.0	22.0	5.2
RAEM	17.5	0.0	61.0	1.3	0.2	4.2	15.8	0.0
RBEC	6.7	0.0	43.0	0.5	1.0	10.4	28.8	9.6
RCERI	22.3	0.0	52.5	0.0	0.0	14.8	10.0	0.4
RCEC	3.9	0.6	46.9	0.2	0.1	1.7	9.5	37.0
RCER	8.3	0.3	58.1	0.1	0.2	3.7	14.8	14.5
RCECAC	0.0	0.0	83.6	0.0	0.0	0.0	9.3	7.2
RCEC	0.0	0.1	66.2	0.0	0.0	0.0	11.2	22.6
RHEF2	0.0	0.0	59.4	0.0	0.0	0.0	14.7	25.9
RLAJRBB	9.3	0.2	59.9	0.1	2.2	4.0	19.1	5.1
RMEPM	0.0	0.2	51.7	0.0	0.0	0.1	6.9	41.2
RQEQ	1.6	0.3	42.1	0.1	0.1	0.6	6.7	48.6
RQEV	7.2	0.2	60.9	0.3	0.1	2.5	11.2	17.7
RQEL	0.0	0.0	71.4	0.0	0.0	0.0	3.5	25.0
RTECI	24.8	0.0	58.7	2.8	0.0	6.3	7.4	0.0

4.4. Derechos de aprovechamientos de agua

En la Figura 4.7 se muestran los derechos de aprovechamientos de agua inscritos en las cuencas en monitoreo. En la cuenca Puente Codinhue, aguas arriba del punto de aforo se encuentran inscritos dos derechos de agua con código de expediente ND-0902-8914, ambos son tipo no consuntivo, superficial y corriente, y se utilizan para piscicultura. El derecho n°11997 es de ejercicio eventual y discontinuo por un total 0.38 m³/s, el derecho n°11998 es de ejercicio permanente y continuo por un total de 1.15 m³/s. La restitución de esta agua es aguas abajo del punto de aforo. Como

eventualmente se puede extraer hasta 1.53 m³/s, se consideró agregar este caudal para la elaboración de los modelos.

En las demás cuencas en monitoreo se desestimaron los derechos de agua inscritos en el análisis, debido a que el caudal de extracción no es considerable, o a que el uso de derecho inscrito este asignado para producción de hidroelectricidad. A pesar de que existan derechos para la producción hidroeléctrica, no existen instalaciones hidroeléctricas en esos lugares. Se desestimó el análisis de derechos de aprovechamiento para las demás cuencas.

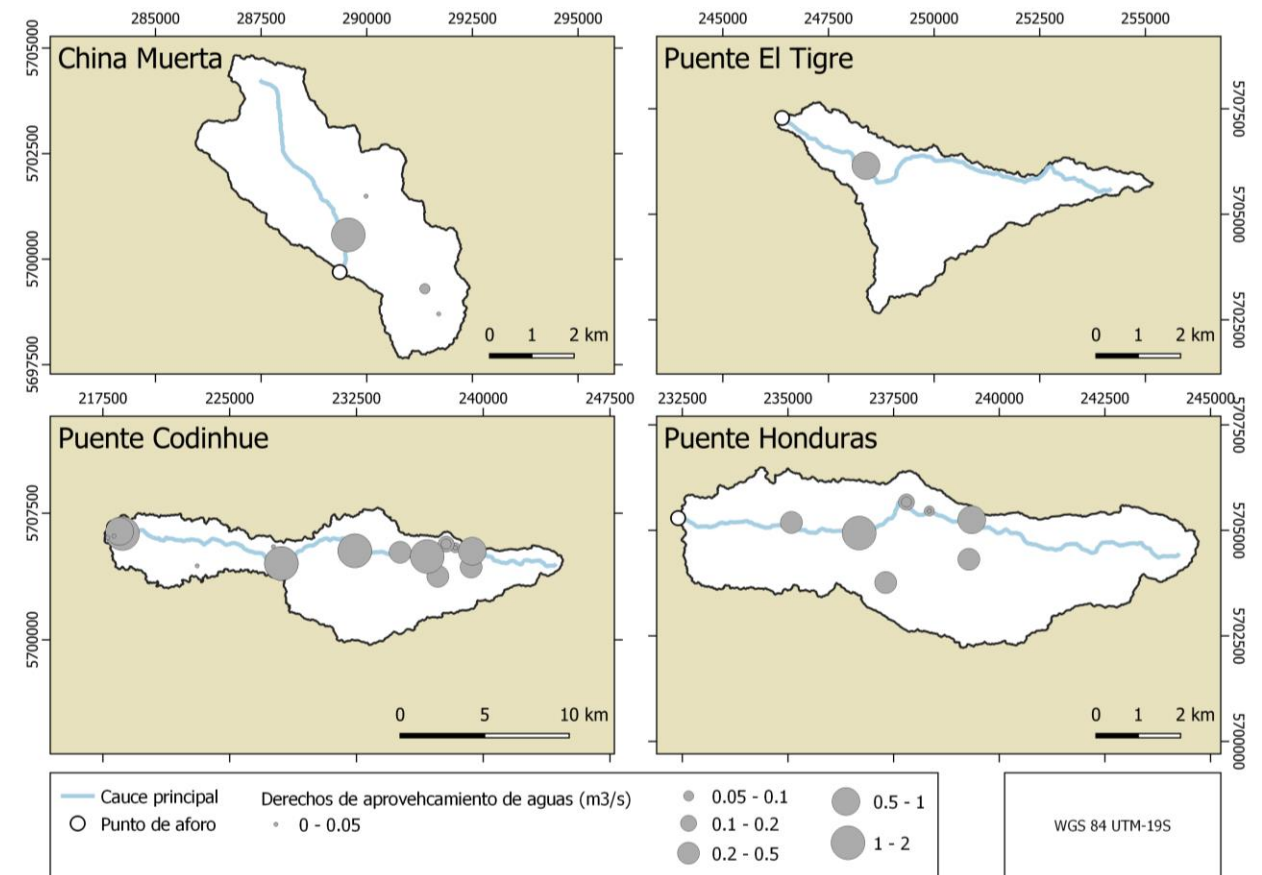


Figura 4.7 Derechos de agua cuencas en monitoreo

4.5. Calibración

La Tabla 4.5 muestra las ecuaciones calibradas según los diferentes tipos de regresión, formulados para predecir caudales medios diarios en todas las cuencas en monitoreo. El modelo de transposición no se calibró en ningún caso.

Tabla 4.5 Modelos calibrados

Modelo	Ecuación
MRL	$q_1 = 1.38 \cdot 10^{-2} + 7.52 \cdot 10^{-1} q_2$ (4.1)
MRLl	$\ln q_1 = 1.22 \cdot 10^{-2} + 7.78 \cdot 10^{-1} \ln q_2$ (4.2)
MRLM	$q_1 = - 2.65 \cdot 10^{-2} + 6.80 \cdot 10^{-1} q_2 + 3.60 \cdot 10^{-2} rh -$ $1.35 \cdot 10^{-3} t_{2m} + 3.03 \cdot 10^{-4} pr$ (4.3)
MRLlM	$\ln q_1 = 8.04 \cdot 10^{-2} + 7.08 \cdot 10^{-1} \ln q_2 + 6.91 \cdot 10^{-3} \ln area -$ $2.83 \cdot 10^{-2} \ln t_{max} + 1.87 \cdot 10^{-3} \ln pr$ (4.4)

En donde q_1 y q_2 corresponden a el caudal medio diario específico en la cuenca objetivo y donante respectivamente, t_{2m} , t_{max} , pr , rh y $area$ corresponden a la elevación máxima, la temperatura media y máxima diaria, la precipitación diaria, la razón hipsométrica y el área de la cuenca objetivo.

Por medio del método *stepwise* se logró determinar que las variables predictoras más relevantes para simular el caudal medio diario, además del caudal de la cuenca donante, son las variables climáticas temperatura y precipitación, así como las variables morfométricas razón hipsométrica y área. Como se observa también, el caudal de la cuenca donante está presente en todos los modelos, y es además es parámetro más relevante en todos los casos, todos los modelos se basan en esta variable.

La Tabla 4.6 muestra los valores de las medidas de bondad de ajuste de la calibración.

Tabla 4.6 Medidas de bondad de ajuste calibración

Cuenca objetivo		Río Collihuanqui En Camino A Curacautín	Río Collín En Codahue	Río Huichahue En Faja 24000
Cuenca donante		Río Quino en Longitudinal	Río Muco en Puente Muco	Río Quepe en Quepe
Modelo	MBA			
MT	R ²	0.90	0.95	0.61
	NSE	0.22	0.90	0.58
	PBIAS	10.2	-11.6	-11.1
MRL	R ²	0.90	0.95	0.61
	NSE	0.73	0.92	0.51
	PBIAS	17.5	-7.1	-6.6
MRLM	R ²	0.90	0.95	0.60
	NSE	0.73	0.93	0.51
	PBIAS	15.8	-7.6	-7.3
MRLM	R ²	0.91	0.94	0.59
	NSE	0.79	0.94	0.51
	PBIAS	0	0.4	-0.4
MRLLM	R ²	0.92	0.95	0.59
	NSE	0.80	0.94	0.51
	PBIAS	1.5	0.1	-3.7

En ANEXO 4.1 se muestran los gráficos los valores observados y simulados por cada modelo. Como se aprecia en la Tabla 4.6, en general las medidas de bondad de ajuste indican buenos/satisfactorios rendimientos de los modelos. Los modelos de regresión múltiple son los que tienen mejor ajuste.

4.6. Validación 1: cuencas con registro

La Tabla 4.7 muestra los valores de las medidas de bondad de ajuste de la validación 1.

Tabla 4.7 Medidas de bondad de ajuste validación 1

Cuenca objetivo		Río Collín En Codahue	Río Huichahue En Faja 24000	Río Quepe En Vilcún
Cuenca donante		Río Muco en Puente Muco	Río Quepe en Quepe	Río Quepe en Quepe
Modelo	MBA			
MT	R ²	0.98	0.65	0.95
	NSE	0.90	0.62	0.81
	PBIAS	-23.8	-17.7	-27.3
MRL	R ²	0.98	0.65	0.95
	NSE	0.80	0.56	0.72
	PBIAS	-20.8	-15.5	-29.6
MRLM	R ²	0.98	0.64	0.95
	NSE	0.81	0.56	0.72
	PBIAS	-21.3	-15.9	-29.6
MRLM	R ²	0.97	0.64	0.94
	NSE	0.83	0.56	0.59
	PBIAS	-13.2	-10.0	39.0
MRLLM	R ²	0.97	0.64	0.93
	NSE	0.84	0.57	0.80
	PBIAS	-13.7	-12.7	-21.1

En ANEXO 4.2 se muestran los gráficos los valores observados y simulados por cada modelo. Como se ve en la Tabla 4.7, el ajuste de los modelos es bueno en general. Para el modelo de transposición, las medidas de bondad de ajuste indican resultados buenos o satisfactorios en todos los casos. Los modelos de regresión lineal y logarítmica tienen medidas de bondad de ajuste similares al modelo de transposición. Los modelos de regresión lineal múltiple y logarítmica múltiple tienen mejores resultados en cuanto a las medidas de bondad de ajuste en comparación con los demás modelos, que se ve reflejado sobre todo en la disminución del PBIAS. Se observa también que todos los modelos en todos los casos, excepto el MRLM en Río Quepe en Quepe, que el PBIAS es negativo, indicando que los modelos subestiman los caudales.

Para las tres cuencas, se tiene que el modelo con mejor ajuste corresponde a uno de regresión múltiple: regresión lineal múltiple para las cuencas Río Collín En Codahue y Río Huichahue En

Faja 24000 y regresión lineal logarítmica múltiple para la cuenca Río Quepe en Vilcún. En ANEXO 4.2, se observa que las mayores diferencias entre caudales observados y simulados se producen en los caudales altos, en los que los modelos tienden a subestimar.

4.7. Validación 2: cuencas en monitoreo

La Tabla 4.8 muestra los valores de las medidas de bondad de ajuste de la validación 2.

Tabla 4.8 Medidas de bondad de ajuste validación 2

Cuenca objetivo		China Muerta	Puente El Tigre	Puente Codinhue	Puente Honduras
Cuenca donante		Río Allipén en Los Laureles	Río Huichahue en Faja 24000	Río Huichahue en Faja 24000	Río Huichahue en Faja 24000
Modelo	MBA				
MT	R²	0.72	0.74	0.89	0.98
	NSE	0.44	0.70	0.55	0.84
	PBIAS	54.6	5.0	-21.9	-41.3
MRL	R²	0.72	0.74	0.89	0.98
	NSE	0.51	0.72	0.86	0.76
	PBIAS	52.0	16.3	3.3	-22.5
MRLM	R²	0.72	0.73	0.89	0.98
	NSE	0.52	0.72	0.86	0.77
	PBIAS	52.0	14.6	0.3	-24.7
MRLM	R²	0.73	0.73	0.89	0.96
	NSE	0.72	0.61	0.70	0.67
	PBIAS	5.1	52.8	38.2	-48.8
MRLLM	R²	0.73	0.72	0.88	0.97
	NSE	0.71	0.71	0.80	0.71
	PBIAS	13.2	-13.9	-13.7	-38.9

En ANEXO 4.3 se muestran los caudales observados y simulados por cada modelo para cada cuenca en monitoreo. Como se muestra en la Tabla 4.8, en general el ajuste de los modelos es bueno y al igual que en las cuencas con registros, ciertos modelos se ajustan mejor que otros según la cuenca.

Las medidas de bondad de ajuste del modelo de transposición indican resultados buenos o satisfactorios en todos los casos, salvo el PBIAS de las cuencas China Muerta y Puente Honduras, con resultados no satisfactorios. Los modelos de regresión lineal y logarítmica producen, en comparación al modelo de transposición, mejores resultados para todas las cuencas exceptuando Puente El Tigre, dando resultados buenos/satisfactorios en todos los casos salvo el PBIAS de China Muerta. Los modelos de regresión lineal múltiple y logarítmica múltiple producen mejores resultados para la cuenca China Muerta, en el resto de las cuencas el R^2 y el NSE son similares a los obtenidos en los modelos de regresión lineal y regresión logarítmica. El PBIAS empeora para el modelo de regresión lineal múltiple, obteniéndose valores no satisfactorios, y se mantiene similar para el modelo de regresión lineal logarítmica.

En la Tabla 4.9 se muestra el modelo con mejor ajuste para cada cuenca en monitoreo y la Figura 4.8 muestra el caudal observado y simulado por el modelo asignado.

Tabla 4.9 Modelo asignado simulación de caudales cuencas en monitoreo

Cuenca objetivo	Cuenca donante	Modelo con mejor ajuste
China Muerta	Río Allipén en Los Laureles	MRLM
Puente El Tigre	Río Huichahue en Faja 24000	MT
Puente Codinhue	Río Huichahue en Faja 24000	MRL
Puente Honduras	Río Huichahue en Faja 24000	MRL

Como muestra la Tabla 4.8, considerando el modelo con mejor ajuste para cada cuenca, el R^2 es mayor a 0.7 en todos los casos, lo que permite afirmar buena concordancia ente caudales

observados y simulados. El NSE es bueno para las cuencas Puente Codinhue y Puente Honduras, y satisfactorio para China Muerta y Puente El Tigre. El PBIAS es bueno para las cuencas China Muerta, Puente El Tigre y Puente Codinhue, y satisfactorio para Puente Honduras.

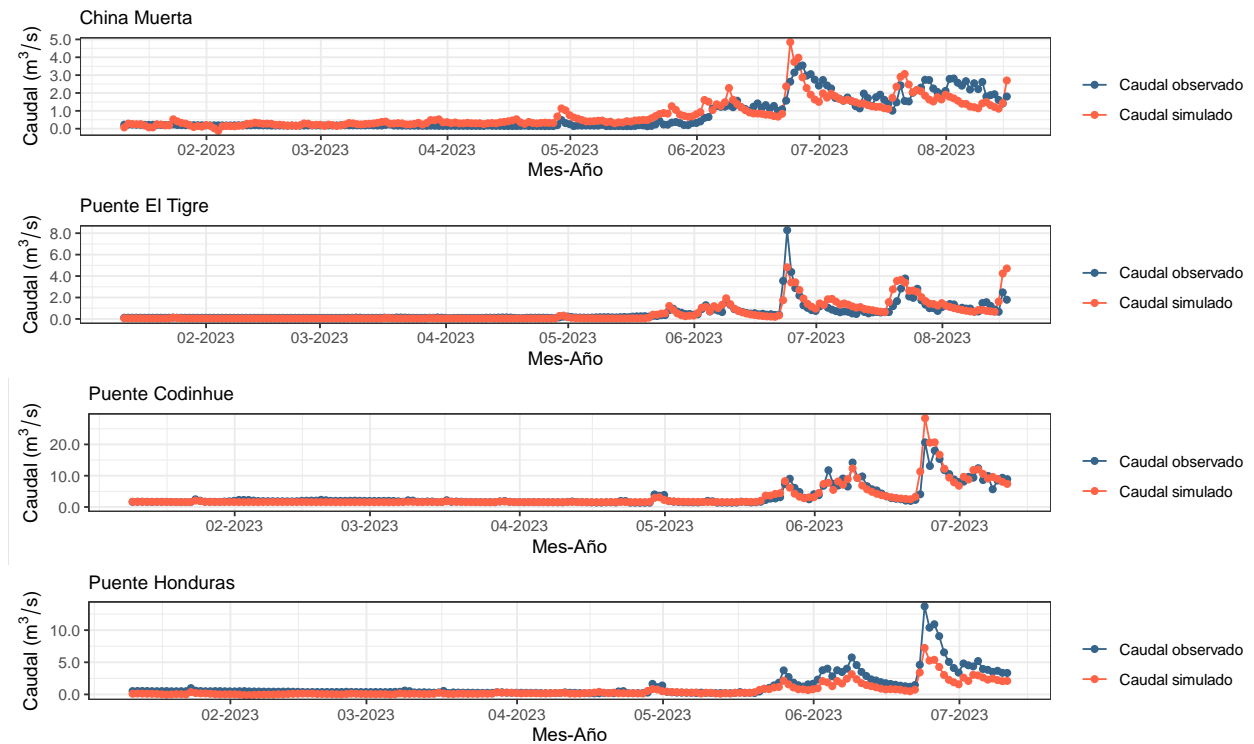


Figura 4.8 Caudal observado y simulado por modelo con mejor ajuste cuencas en monitoreo

En la Figura 4.8 se observa en general buena concordancia entre los caudales observados y simulados, exceptuando los caudales altos en ciertas cuencas. Los caudales bajos son bien simulados para todas las cuencas, en cuanto a los caudales altos se logran buenos resultados para las cuencas Puente El Tigre y Puente Codinhue. Para la cuenca China Muerta se sobreestiman los caudales *peak*, pero se subestiman los caudales de recesión. Para la cuenca Puente Honduras, los caudales *peak* y los caudales de recesión se subestiman.

En el caso de la cuenca China Muerta, las discordancias producidas pueden deberse a la diferencia de tamaño con su cuenca donante de información (Río Allipén en Los Laureles: 1648.1 km²; China

Muerta: 20.0 km²). La cuenca Río Allipén en Los Laureles, al ser una cuenca mucho más grande, es posible que su respuesta hidrológica a los eventos de precipitación sea distinta a la de una cuenca mucho más pequeña como la de China Muerta.

Para la cuenca Puente Honduras es posible que la subestimación de sus caudales altos se deba a que para la validación 2 no se toman datos de precipitación distribuidos, como si se hace en la calibración y validación 1, y que por lo tanto los datos de precipitación que se utilizan no sean representativos del área la cuenca. Además, como se observa en la Tabla 4.1, su precipitación anual media es mayor que la de su cuenca donante (2381 y 2132 mm, respectivamente) por lo que también es posible que para los eventos de precipitación se produzca mayor escorrentía en la cuenca Puente Honduras que para su cuenca donante.

4.8. Series de caudales

La Figura 4.9 muestra las series de caudales medios diarios simulados para las cuencas en monitoreo, para el periodo 2011-2012. Se simula en este periodo de años puesto que las cuencas donantes de información tienen un 100% de datos disponibles en ese periodo.

De la Figura 4.9 se observa que las cuencas en monitoreo tienen el mismo régimen hidrológico que su cuenca donante, teniendo la cuenca de China Muerta un régimen pluvio-nival, con una leve influencia nival. Las cuencas Puente El Tigre, Puente Honduras y Puente Codinhue presentan régimen pluvial.

En la Figura 3.3 se observa que la cuenca donante Río Allipén en los Laureles tiene buena disponibilidad de información en todo el periodo en análisis, contando con más del 50% de datos disponibles para todos los años en todo el periodo analizado. La cuenca Río Huichahue en Faja

24000 también cuenta con más del 50% de datos disponibles para todos los años desde 1985. A partir de lo mencionado, se puede afirmar que, con los modelos formulados, hay suficiente información como para generar series de caudales medios diarios, con más del 50% de datos disponibles por año, de 41 años para la cuenca China Muerta, y de 35 años para las cuencas Puente El Tigre, Puente Codinhue y Puente Honduras.

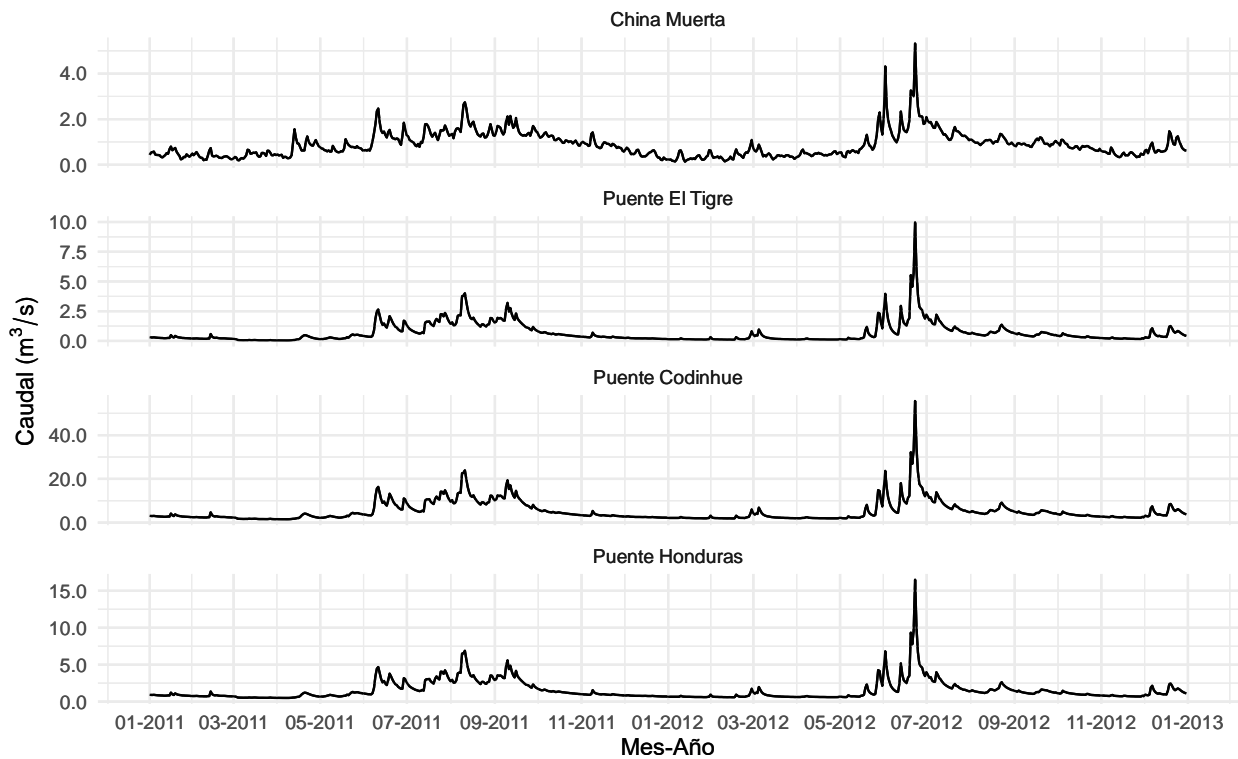


Figura 4.9 Caudales medios diarios simulados cuencas en monitoreo

4.9. Conclusión

Se obtuvieron series de tiempo de caudales, precipitación y temperatura, así como parámetros de relieve, morfométricos y porcentajes de uso de suelo de las cuencas en análisis, datos esenciales para la elaboración de modelos de predicción de caudales. Del análisis de derechos de

aprovechamiento de aguas, se estimó agregar el caudal extraído para simular el régimen natural del río Codihue en el Puente Codinhue.

Se aplicó el método de transposición y se formularon cuatro modelos de regresión para simular caudales medios diarios. Los resultados de la validación 1 y 2 indican que es posible simular correctamente caudales medios diarios a través de modelos empíricos para las cuencas analizadas. Para las cuencas de la validación 1, los métodos de regresión múltiples producen los mejores resultados. Para la validación 2, en las cuencas en monitoreo, ciertos modelos se ajustan mejor que otros dependiendo de la cuenca. En general, los caudales bajos se simulan correctamente, y para los caudales altos se producen las mayores diferencias, sobre todos en las cuencas China Muerta y Puente Honduras. Según el modelo de mejor ajuste, se simularon caudales medios diarios para los años 2011 y 2012.

5. CONCLUSIONES

La estimación de caudales en cuencas sin registro es uno de los grandes desafíos de la ingeniería hidrológica debido a que la mayor parte de las cuencas no cuentan con registros de caudal y que esta información es fundamental para obras civiles y la gestión del agua. En esta investigación se aplicaron diferentes métodos empíricos para predecir caudales medios diarios en cuencas del centro-sur de Chile.

Se obtuvieron las características hidrometeorológicas de las cuencas con registros y las cuencas en monitoreo. Se sintetizaron series de tiempo de caudal de 15 estaciones con registros, además, para estas cuencas y las cuencas en monitoreo se sintetizaron series de tiempo de temperatura y precipitación con datos grillados. Los regímenes de caudal presentes son principalmente pluviales y pluvio-nivales, donde la precipitación fluctúa entre 2000 y 3000 mm/año. También se caracterizó la fisiografía de las cuencas con registros y las cuencas en monitoreo, obteniendo parámetros de relieve, morfométricos y porcentaje de usos de suelo, en donde se encontró que el uso de suelo que predomina es el de bosques.

Se analizaron los derechos de aguas en las cuencas en monitoreo, detectándose un derecho de aprovechamiento que pudiese estar afectando el régimen natural del río Codihue en el Puente Codihue y, por ende, que pudiese afectar el rendimiento de los modelos de simulación, considerándose sumar el caudal extraído en la modelación.

Para la modelación se formularon modelos con métodos de escala y métodos de regresión, generando un modelo de transposición, modelos de regresión lineal y lineal logarítmica y modelos de regresión lineal múltiple y lineal logarítmica múltiple, aplicando para los dos últimos un procedimiento *stepwise*, determinándose otras variables predictoras además del caudal medio diario de la cuenca donante. La calibración de los modelos se efectuó utilizando pares de cuencas de la zona, y la validación 1 consideró este mismo grupo de cuencas. La validación 2 se efectuó

con los datos obtenidos en el trabajo en terreno, y con datos de caudal del Sistema Hidrométrico en Línea.

Los resultados de la modelación indican que es posible simular caudales medios diarios a través de modelos empíricos en cuencas andinas del centro sur de Chile. Para la validación en cuencas con registro, se encontró que los modelos que mejor se ajustan son los de regresión múltiple. Para la validación en las cuencas en monitoreo, los modelos con mejor ajuste varían, en todos los casos todas las medidas de bondad de ajuste indican un ajuste bueno o satisfactorio. En general, los modelos simulan correctamente los caudales exceptuando, en ciertos casos, los caudales *peak*, que se tienden a subestimar.

Finalmente, como posibles líneas de investigación futuras, se propone generar o evaluar modelos existentes de predicción de otras variables hidrológicas en las cuencas en monitoreo, como pueden ser caudales extremos, medios mensuales y medios anuales. También se propone, en caso de necesitar modelos con mejor ajuste y de tener más datos, calibrar y validar los modelos con los datos de las cuencas en monitoreo.

REFERENCIAS

- Archfield, S. A., y Vogel, R. M. (2010). Map correlation method: Selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungauged catchments. *Water Resources Research*, 46(10). <https://doi.org/10.1029/2009WR008481>
- Arsenault, R., Martel, J.-L., Brunet, F., Brissette, F., y Mai, J. (2023). Continuous streamflow prediction in ungauged basins: Long short-term memory neural networks clearly outperform traditional hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(1), 139–157. <https://doi.org/10.5194/hess-27-139-2023>
- de Lavenne, A., Loree, T., Squidant, H., y Cudennec, C. (2023). The transfR toolbox for transferring observed streamflow series to ungauged basins based on their hydrogeomorphology. *Environmental Modelling and Software*, 159. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105562>
- Gianfagna, C. C., Johnson, C. E., Chandler, D. G., y Hofmann, C. (2015). Watershed area ratio accurately predicts daily streamflow in nested catchments in the Catskills, New York. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 583–594. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.09.002>
- Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., y Wang, Z. (2021). Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review. *WIREs Water*, 8(1), e1487. <https://doi.org/10.1002/wat2.1487>
- Harvey, C. L., Dixon, H., y Hannaford, J. (2012). An appraisal of the performance of data-infilling methods for application to daily mean river flow records in the UK. *Hydrology Research*, 43(5), 618–636. <https://doi.org/10.2166/nh.2012.110>
- Kokkonen, T. S., Jakeman, A. J., Young, P. C., y Koivusalo, H. J. (2003). Predicting daily flows in ungauged catchments: Model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological Processes*, 17(11), 2219–2238. <https://doi.org/10.1002/hyp.1329>

- Medina, Y., y Muñoz, E. (2020). Estimation of Annual Maximum and Minimum Flow Trends in a Data-Scarce Basin. Case Study of the Allipén River Watershed, Chile. *Water*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/w12010162>
- Niu, W., y Feng, Z. (2021). Evaluating the performances of several artificial intelligence methods in forecasting daily streamflow time series for sustainable water resources management. *Sustainable Cities and Society*, 64, 102562. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102562>
- Razavi, T., y Coulibaly, P. (2013). Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 958–975. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000690](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690)
- Wagener, T., y Wheater, H. S. (2006). Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology*, 320(1), 132–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.015>
- Yang, S., Yang, D., Chen, J., Santisirisomboon, J., Lu, W., y Zhao, B. (2020). A physical process and machine learning combined hydrological model for daily streamflow simulations of large watersheds with limited observation data. *Journal of Hydrology*, 590, 125206. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125206>
- Zhang, Y., Chiew, F. H. S., Li, M., y Post, D. (2018). Predicting Runoff Signatures Using Regression and Hydrological Modeling Approaches. *Water Resources Research*, 54(10), 7859–7878. <https://doi.org/10.1029/2018WR023325>

ANEXOS

ANEXO 4.1

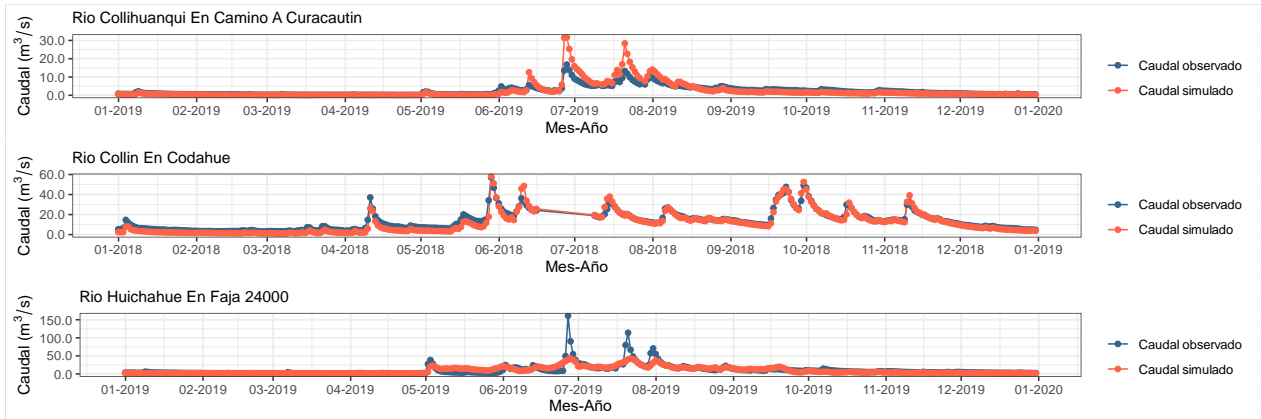


Figura A.4.1 Resultados MT

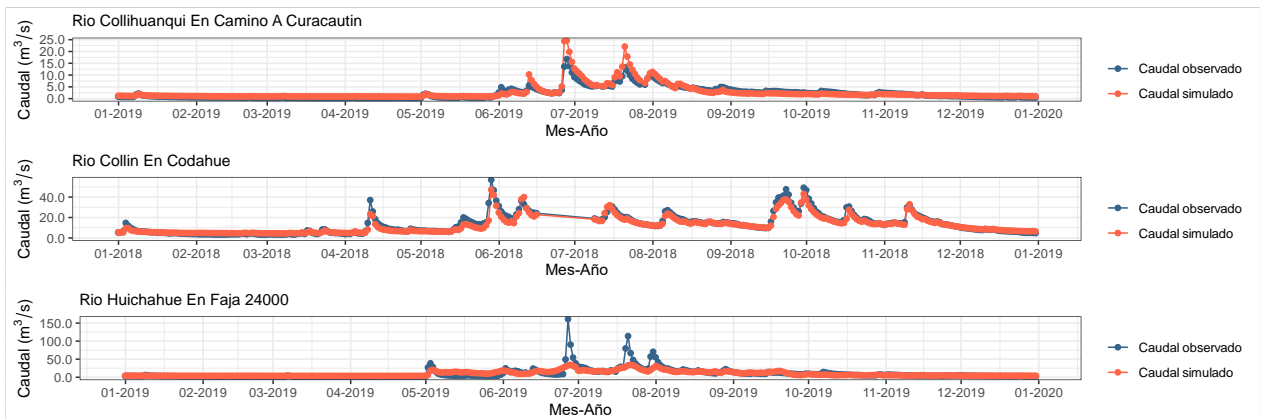


Figura A.4.2 Resultados calibración MRL

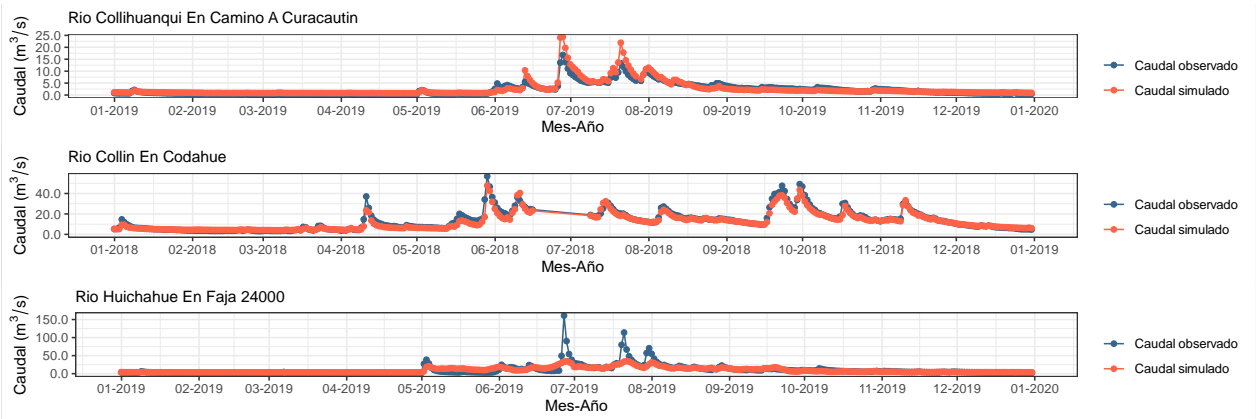


Figura A.4.3 Resultados calibración MRLM

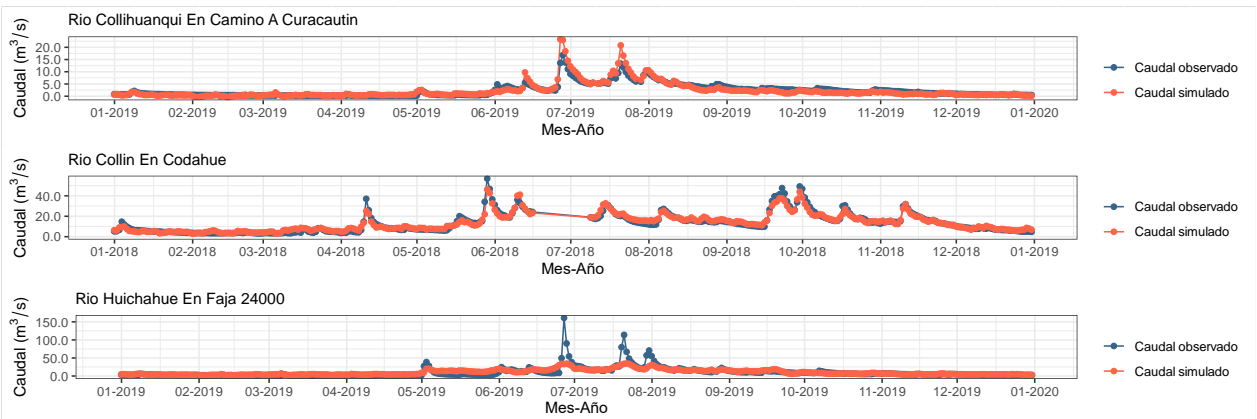


Figura A.4.4 Resultados calibración MRLM

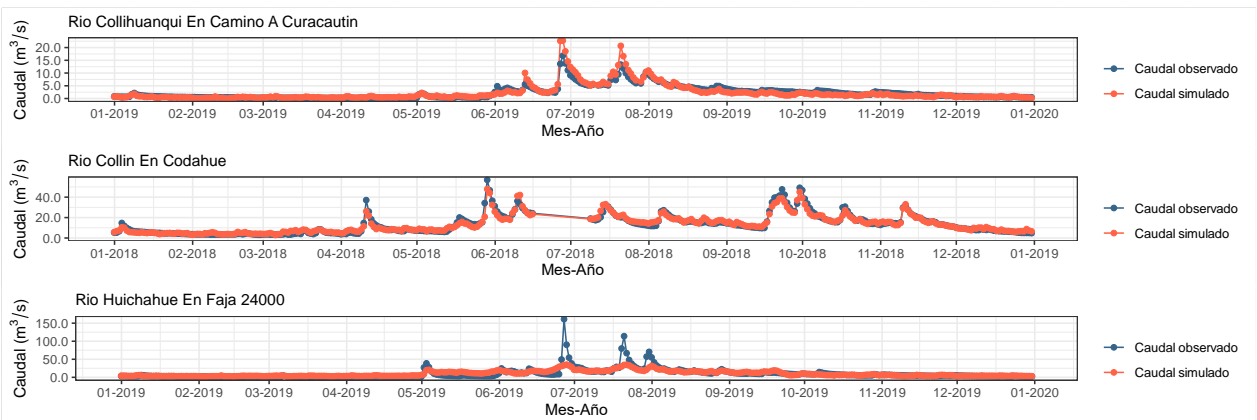


Figura A.4.5 Resultados calibración MRLM

ANEXO 4.2

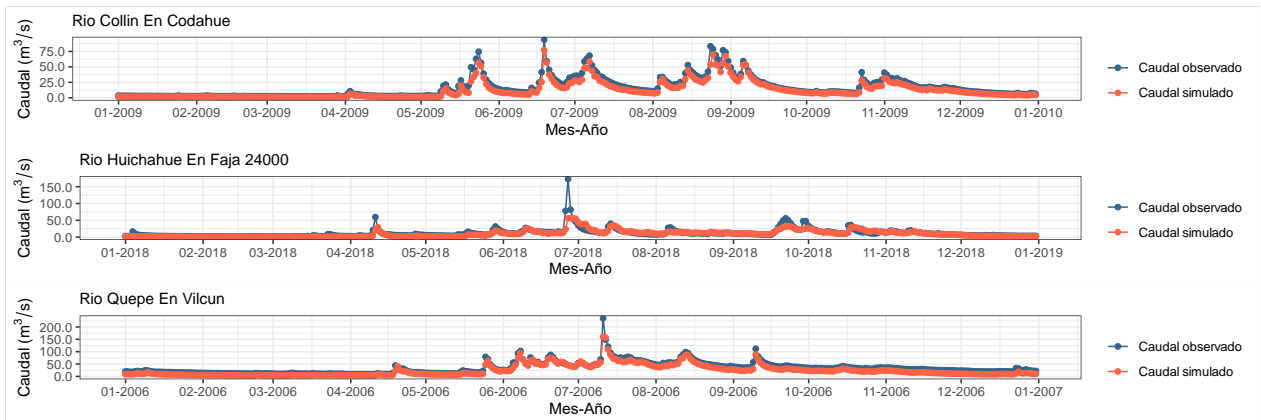


Figura A.4.6 Resultados MT

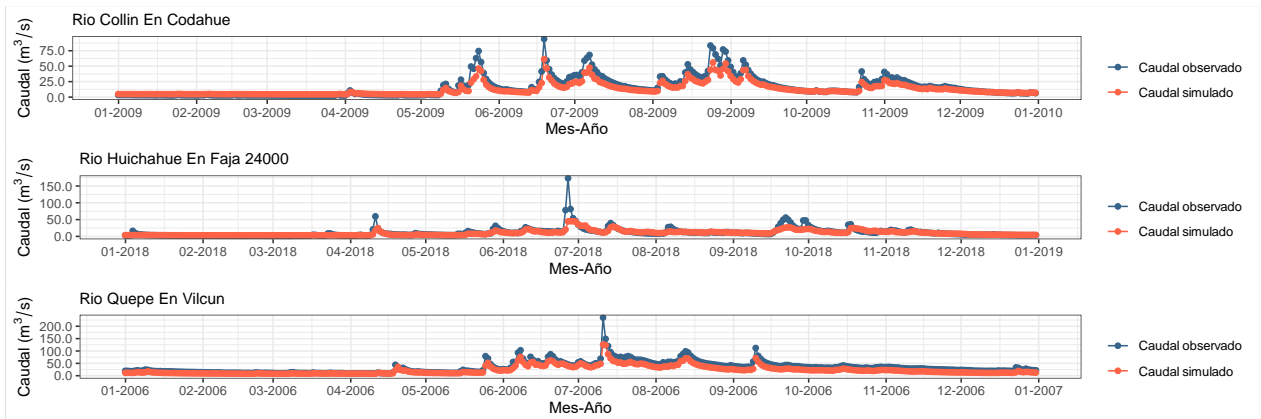


Figura A.4.7 Resultados validación 1 MRL

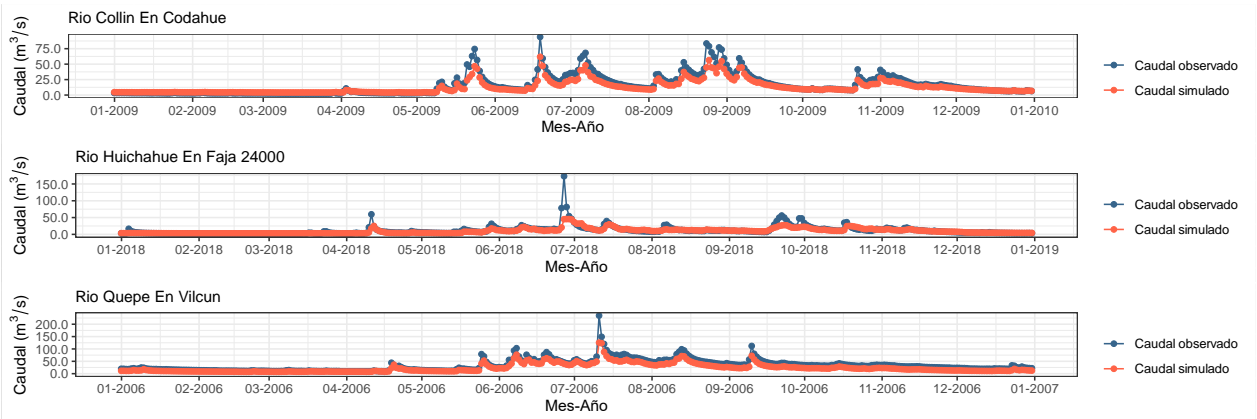


Figura A.4.8 Resultados validación 1 MRL

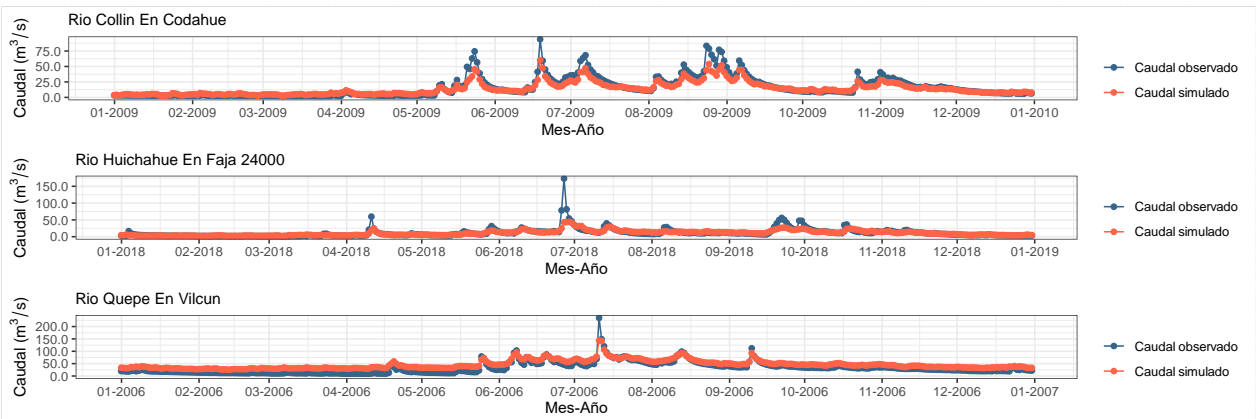


Figura A.4.9 Resultados validación 1 MRLM

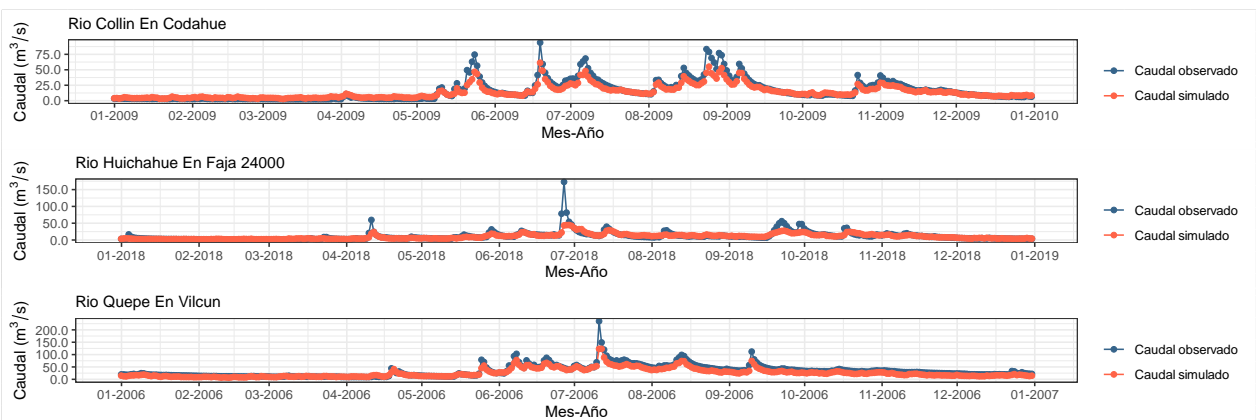


Figura A.4.10 Resultados validación 1 MRLLM

ANEXO 4.3

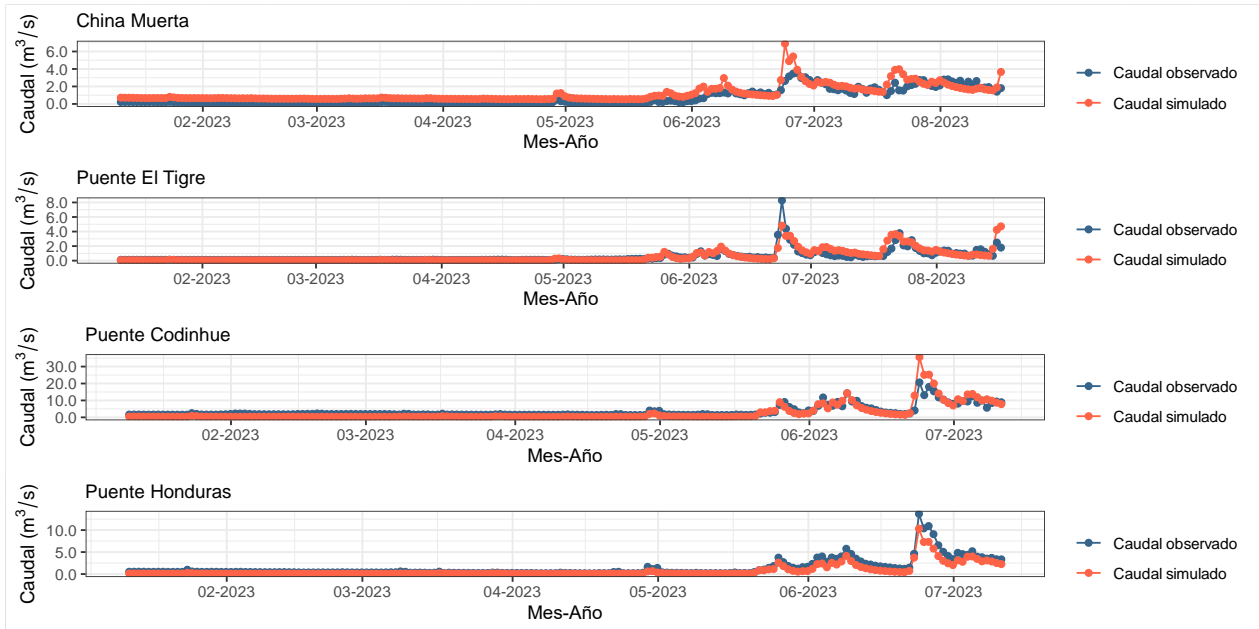


Figura A.4.11 Resultados MT

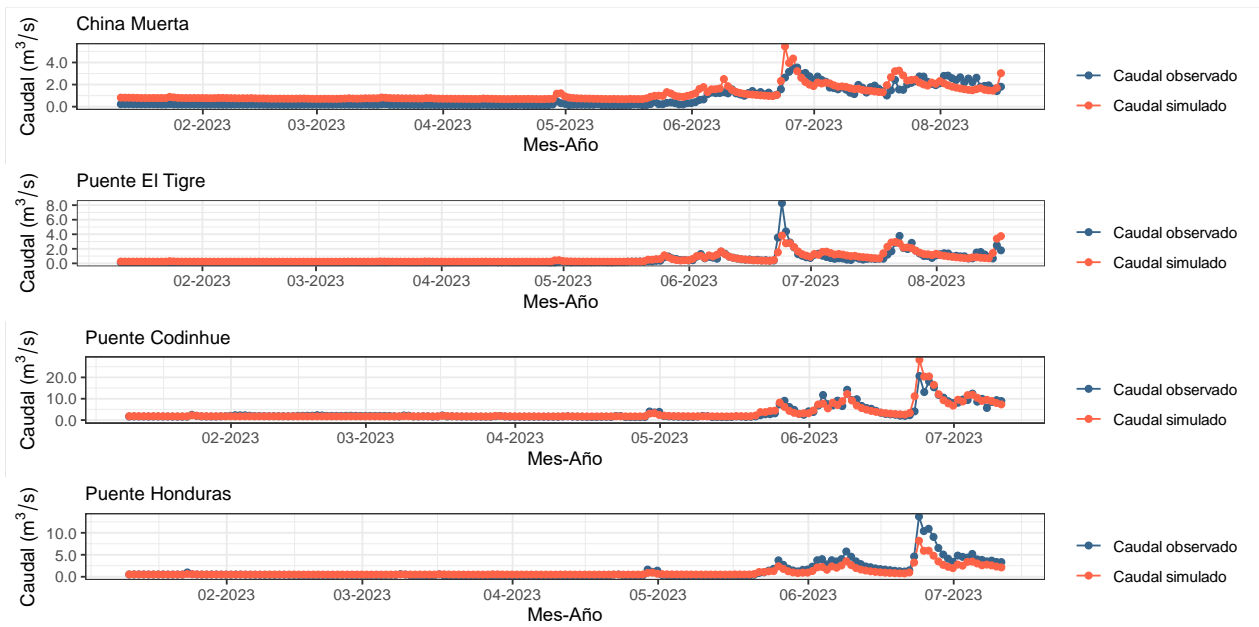


Figura A.4.12 Resultados validación 2 MRL

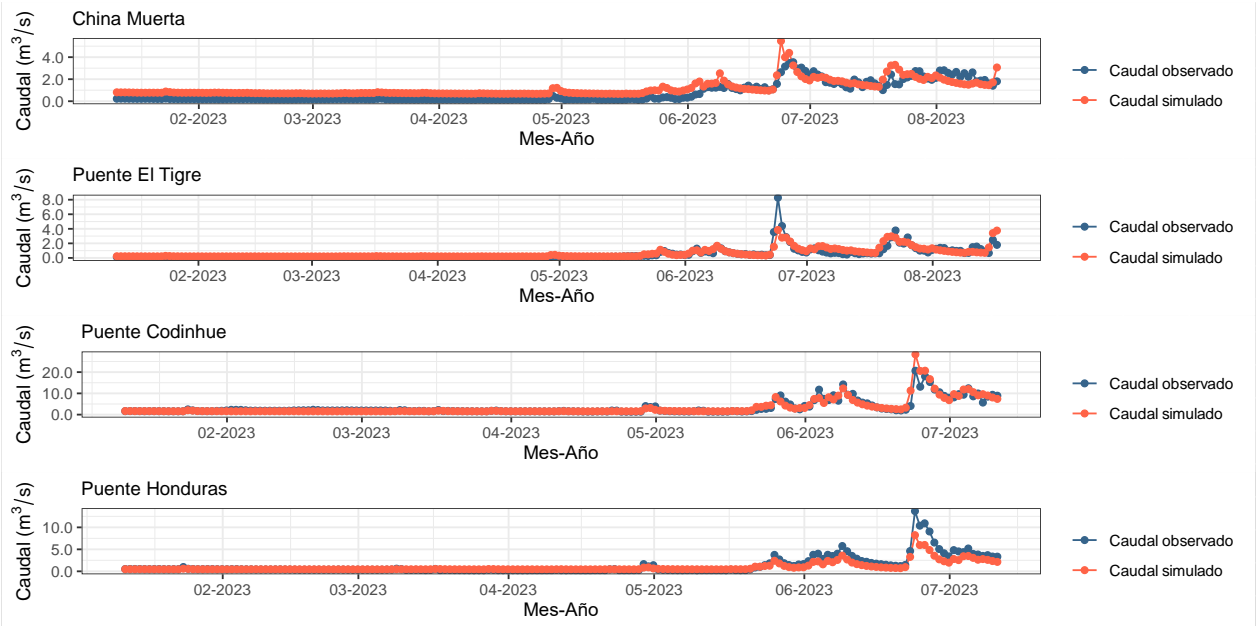


Figura A.4.13 Resultados validación 2 MRLM

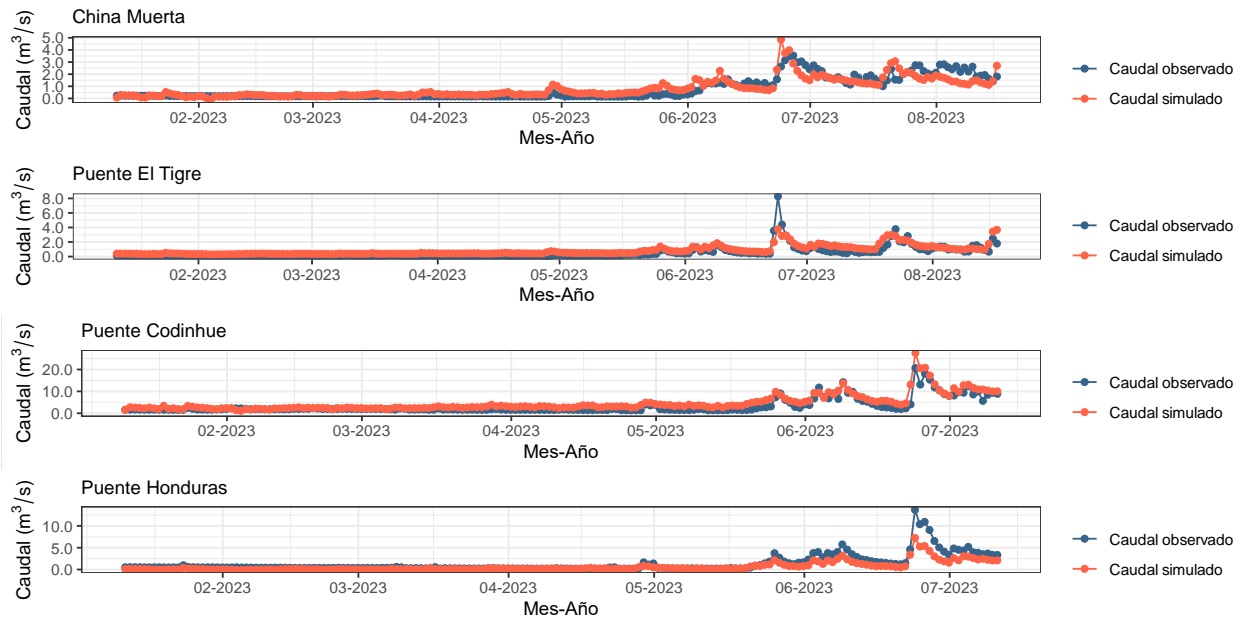


Figura A.4.14 Resultados validación 2 MRLM

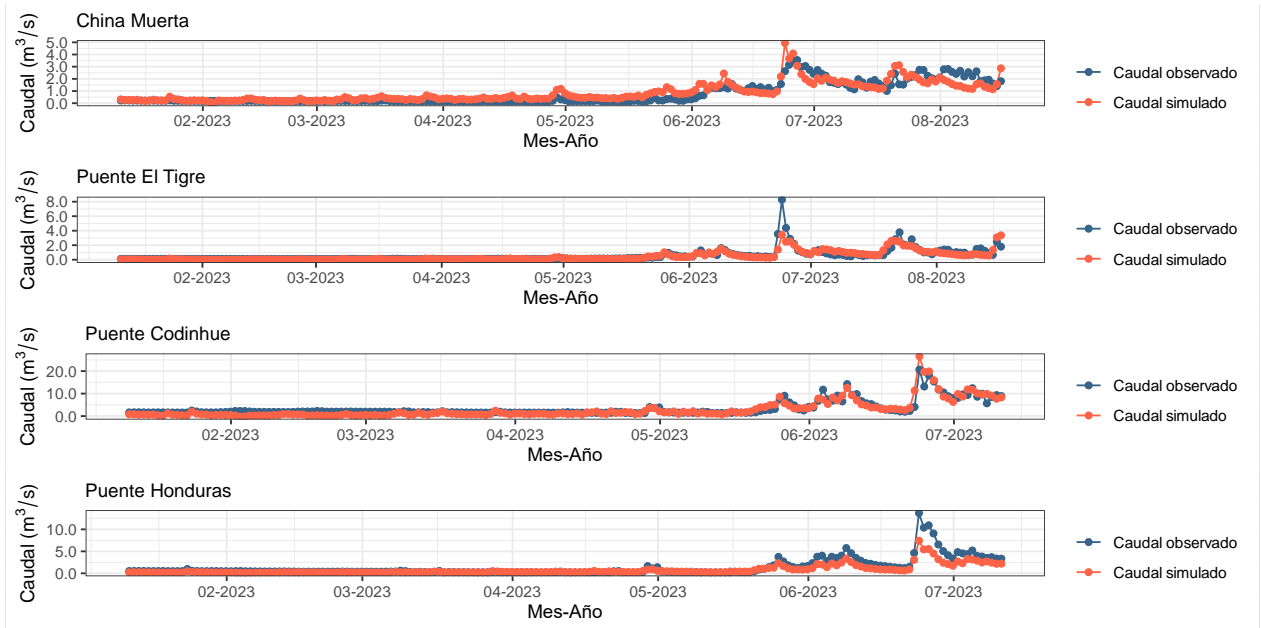


Figura A.4.15 Resultados validación 2 MRLLM

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Vicente Ricardo Saenger Derache
Título de la memoria : Simulación de caudales en cuencas del centro-sur de Chile
Fecha de la presentación oral : 23 / 08 / 2023

Profesor(es) Guía : Alejandra Stehr Gesche
Profesor(es) Revisor(es) : Maricarmen Guerra París
Concepto :
Calificación :

Resumen

La información fluviométrica es fundamental para la gestión de recursos hídricos y para el diseño de obras de infraestructura, sin embargo, la mayor parte de las cuencas en Chile y en el mundo no cuentan con esta información. El objetivo principal de este trabajo es simular caudales medios diarios en cuencas del centro sur de Chile, específicamente en cuatro cuencas en monitoreo situadas en la zona andina de la región de la Araucanía.

Se recopiló información hidrometeorológica y fisiográfica de cuencas con registros y de las cuencas en monitoreo. En base a esto, se desarrollaron modelos empíricos, utilizando métodos de escala y regresión, basando las simulaciones en la información hidrológica de una cuenca donante. Los modelos se validaron con datos de las cuencas con registro y datos de las cuencas en monitoreo. Los resultados de los modelos con mejor bondad ajuste de la validación en cuencas con registro indican un ajuste bueno en dos cuencas y satisfactorio en otra cuenca. Para la validación en las cuencas en monitoreo, los modelos con mejor bondad de ajuste indican un ajuste bueno en una cuenca y satisfactorio en las otras tres cuencas. El modelo de transposición de caudales produce buenos resultados, pero en general, los modelos de regresión tienen un mejor ajuste. Los caudales altos se suelen subestimar, y es donde se producen las mayores discordancias. Con el modelo de mejor ajuste se generaron caudales medios diarios en las cuencas en monitoreo para el periodo 2011-2012.