



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



**EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO MAULE,  
CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN ESPACIO TEMPORAL DEL USO DE SUELO**

**POR**

**TOMÁS ALEJANDRO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ**

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

Miembros Comisión  
Maricarmen Guerra Paris

Agosto, 2025  
Concepción (Chile)

© 2025 Tomás Alejandro González Hernández

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

*Este trabajo está dedicado a mi familia: a mis padres, Jorge y María Teresa, y a mis hermanas, Fernanda y Bárbara, quienes siempre han estado presentes apoyándome de distintas maneras y buscando lo mejor para mí. Gracias por acompañarme en cada etapa y por su amor inquebrantable.*

*También lo dedico a mis amigos más cercanos, quienes son, de una u otra forma, una segunda familia y han estado siempre dispuestos a brindarme su apoyo incondicional.*

*Asimismo, a mis amigos que conocí durante la carrera, con quienes compartimos desafíos, aprendizajes y momentos que forjaron un vínculo que sé perdurará en el tiempo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco especialmente a mi profesora guía, Alejandra Stehr, por su constante disposición, orientación y apoyo durante el desarrollo de esta memoria. Su compromiso, junto con las valiosas instancias de conversación y el acceso a recursos que facilitaron la realización de este trabajo, fueron fundamentales para su culminación.

Extiendo mi gratitud a la profesora Maricarmen Guerra, cuyo interés genuino por el aprendizaje y sus observaciones constructivas aportaron significativamente a mejorar la calidad de este estudio, motivándome a seguir perfeccionando mi desempeño académico.

## RESUMEN

La gestión eficiente de los recursos hídricos constituye un desafío prioritario frente a la disminución de la disponibilidad de agua y el incremento sostenido de su demanda. La modelación hidrológica se presenta como una herramienta clave para estimar y analizar caudales futuros bajo distintos escenarios, aportando insumos relevantes para la toma de decisiones. En este contexto, el presente estudio evalúa la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Maule (Chile), considerando la evolución espacio temporal del uso de suelo, mediante la aplicación del modelo hidrológico semi-distribuido SWAT, calibrado y validado con la herramienta SWAT-CUP Premium.

La investigación se desarrolló a escala diaria, considerando un periodo de calibración comprendido entre 2010 y 2016, y un periodo de validación entre 2017 y 2019. Los parámetros físicos e hidráulicos de los suelos provinieron de la base de datos CLSoilMaps y fueron sometidos a análisis de correlación, componentes principales (PCA) y métodos de agrupamiento (K-Means y *Silhouette*) para optimizar su representación espacial. Se utilizaron mapas de uso de suelo para los años 1998, 2010 y 2020 y luego se modeló la evolución del uso bajo dos enfoques: un método estacionario, que mantiene fijos los datos en los años sin información, y un método dinámico, que interpola la información disponible para representar cambios interanuales de los usos de suelo.

El desempeño del modelo fue evaluado mediante indicadores estadísticos como NSE, KGE,  $R^2$  y PBIAS, evidenciando resultados moderados en términos de ajuste, pero con mejoras consistentes al emplear el método dinámico respecto al estacionario. Si bien la magnitud de la mejora fue acotada, la representación espacial y temporal de los usos de suelo, junto con la calidad de los tipos de suelos generados, permitió una caracterización más realista de los procesos hidrológicos en la cuenca.

Los hallazgos obtenidos resaltan la importancia de incorporar variabilidad temporal en la información de usos de suelo y de utilizar bases de datos de suelos robustas para fortalecer la modelación hidrológica. Aun con desempeños estadísticos no sobresalientes, este trabajo aporta insumos relevantes para la planificación y gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Maule, constituyendo una referencia para futuros estudios orientados a mejorar la precisión y aplicabilidad de modelos hidrológicos bajo escenarios de cambio de uso de suelo.

## ABSTRACT

The efficient management of water resources constitutes a priority challenge in the face of declining water availability and the sustained increase in demand. Hydrological modeling emerges as a key tool to estimate and analyze future streamflows under different scenarios, providing valuable inputs for decision-making. In this context, the present study evaluates water availability in the Maule River basin (Chile), considering the spatio-temporal evolution of land use through the application of the semi-distributed hydrological model SWAT, calibrated and validated using the SWAT-CUP Premium tool.

The research was conducted on a daily scale, considering a calibration period between 2010 and 2016, and a validation period between 2017 and 2019. Soil physical and hydraulic parameters were obtained from the CLSoilMaps database and subjected to correlation analysis, principal component analysis (PCA), and clustering methods (K-Means and Silhouette) to optimize their spatial representation. Land use maps for the years 1998, 2010, and 2020 were employed, and land use evolution was then modeled under two approaches: a stationary method, which keeps data fixed in years without information, and a dynamic method, which interpolates available data to represent interannual land use changes.

Model performance was evaluated using statistical indicators such as NSE, KGE,  $R^2$ , and PBIAS, showing moderate results in terms of fit, but consistent improvements when using the dynamic method compared to the stationary one. Although the magnitude of improvement was limited, the spatial and temporal representation of land uses, along with the quality of the generated soil types, enabled a more realistic characterization of hydrological processes in the basin.

The findings highlight the importance of incorporating temporal variability in land use information and employing robust soil databases to strengthen hydrological modeling. Even with non-outstanding statistical performances, this study provides valuable inputs for water resource planning and management in the Maule River basin, serving as a reference for future studies aimed at improving the accuracy and applicability of hydrological models under land use change scenarios.

**TABLA DE CONTENIDO**

TABLA DE CONTENIDO.....	i
INDICE DE TABLAS .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo general .....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Métodos .....	4
1.4 Principales resultados y conclusiones .....	4
1.5 Estructura del informe .....	5
2 CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Introducción.....	6
2.2 Modelación hidrológica.....	6
2.3 Estudios previos sobre cambio de uso de suelo y modelación hidrográfica .....	7
2.4 Comparación entre modelos hidrológicos: HEC-HMS y SWAT .....	9
2.5 Modelo SWAT .....	11
2.6 Justificación del uso del modelo SWAT en Chile.....	13
2.7 Conclusiones .....	14
3 CAPÍTULO 3: MÉTODOS Y MATERIALES .....	15
3.1 Introducción.....	15
3.2 Área de estudio .....	15
3.3 Fuentes de información .....	17
3.3.1 Información climática.....	17
3.3.2 Información fisiográfica .....	18
3.3.3 Información fluviométrica.....	26
3.3.4 Extracciones de agua .....	27
3.3.5 Caudales afluentes de embalses .....	28
3.3.6 Análisis de consistencia.....	28
3.4 Softwares de modelación.....	29
3.4.1 ArcSWAT.....	29
3.5 Evolución espacio temporal del uso de suelo.....	30
3.6 Calibración y validación.....	31

3.6.1	SWAT-CUP .....	31
3.6.2	Periodos de calibración y validación.....	33
3.6.3	Parámetros Estadísticos.....	34
3.7	Comparación de resultados entre cambio dinámico y estacionario de uso de suelo .....	36
3.8	Conclusiones .....	37
4	CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	38
4.1	Introducción.....	38
4.2	Tipos de suelo.....	38
4.3	Método 1: Modelación con usos de suelo estacionario .....	46
4.3.1	Resultados .....	46
4.4	Método 2: Modelación con interpolación temporal de los usos de suelo .....	50
4.4.1	Resultados .....	50
4.5	Comparación de resultados .....	54
4.6	Conclusiones .....	56
5	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	57
	REFERENCIAS .....	60
	ANEXOS.....	66
	Anexo 1.1: Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible .....	66
	Anexo 3.3.1: Fuentes de información – Catastro de información fluviométrica .....	67
	Anexo 3.3.1: Fuentes de información – Análisis de Consistencia.....	68
	Anexo 3.3.2: Periodos de calibración y validación – Comparación de medias .....	71
	Anexo 4.3: Análisis de Correlación.....	72
	Anexo 4.4: Parámetros ajustados en la calibración de los modelos .....	85
	Anexo 4.5: Resultados calibración y validación método estacionario .....	87
	Anexo 4.5: Resultados calibración y validación método estacionario .....	92

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 3.1: Comparación del porcentaje de uso de suelo para cada año (1998, 2010 y 2020).....	19
Tabla 3.2: Equivalencia entre usos de suelo de Proyecto FONDECYT 1212032 y SWAT LULC Codes .....	20
Tabla 3.3: Parámetros del suelo extraídas de CLSoilMaps .....	24
Tabla 3.4: Rango de desempeño de indicadores de bondad de ajuste .....	36
Tabla 4.1: Resultados de contribuciones de cada variable para cada Componente Principal (PC) para el primer estrato de 0 a 5 cm .....	40
Tabla 4.2: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 0 a 5 cm .....	41
Tabla 4.3: Resumen para PC1 (a), PC2 (b) y PC3 (c) en el estrato de 0 a 5 cm .....	42
Tabla 4.4: Variables relevantes, interpretación física y variable escogida por cada componente para el primer estrato de 0 a 5 cm .....	43
Tabla 4.5: Área de cubrimiento de cada tipo de suelo en porcentaje y en hectáreas.....	45
Tabla 4.6: Datos diarios disponibles por estación fluviométrica para el periodo de calibración .....	47
Tabla 4.7: Indicadores estadísticos para proceso de calibración con método estacionario .....	47
Tabla 4.8: Datos diarios disponibles por estación fluviométrica para el periodo de validación .....	49
Tabla 4.9: Indicadores estadísticos para proceso de validación con método estacionario .....	49
Tabla 4.10: Indicadores estadísticos para proceso de calibración con método dinámico.....	51
Tabla 4.11: Indicadores estadísticos para proceso de validación con método dinámico.....	53
Tabla 4.12 Resultados de Test T para distintos métodos en periodo de calibración y validación.....	55

**ANEXOS**

Tabla A. 1: Catastro de información para cada estación en la cuenca en estudio. a) porcentaje de información para los años 2000-2008, b) porcentaje de información para los años 2009-2017, c) porcentaje de información para los años 2018-2024 y porcentaje total, d) leyenda .....	67
Tabla A. 2: Análisis de diferencias significativas entre período de calibración y validación.....	71
Tabla A. 3: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 5 a 15 cm .....	74
Tabla A. 4: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 15 a 30 cm .....	75
Tabla A. 5: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 30 a 60 cm .....	75
Tabla A. 6: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 60 a 100 cm .....	76
Tabla A. 7: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 100 a 200 cm .....	76
Tabla A. 8: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 5 a 15 cm .....	79
Tabla A. 9: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 15 a 30 cm .....	80
Tabla A. 10: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 30 a 60 cm .....	80
Tabla A. 11: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 60 a 100 cm....	81
Tabla A. 12: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 100 a 200 .....	81
Tabla A. 13: Resumen de variables escogidas para el estrato de 5 a 15 cm .....	82
Tabla A. 14: Resumen de variables escogidas para el estrato de 15 a 30 cm .....	82
Tabla A. 15: Resumen de variables escogidas para el estrato de 30 a 60 cm .....	83
Tabla A. 16: Resumen de variables escogidas para el estrato de 60 a 100 cm .....	83
Tabla A. 17: Resumen de variables escogidas para el estrato de 60 a 100 cm .....	84

---

Tabla A. 18: Estaciones fluviométricas y nombres trabajados .....	85
Tabla A. 19: parámetros ajustados en calibración diaria con método estacionario .....	85
Tabla A. 20: parámetros ajustados en calibración diaria con método dinámico.....	86

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 3.1: Representación gráfica de la Cuenca del Río Maule y Cuenca del Río Maule en Longitudinal ..... 17

Figura 3.2: Distintos escenarios de uso de suelo en la cuenca del Río Maule en Longitudinal para el año 1998 (a), para el año 2010 (b) y para el año 2020 (c)..... 22

Figura 3.3: Disponibilidad de información de tipo de suelo de CIREN en la cuenca en estudio ..... 23

Figura 3.4: Estaciones fluviométricas utilizadas en el estudio..... 26

Figura 4.1: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el estrato de 0 a 5 cm ..... 39

Figura 4.2: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 0 a 5 cm..... 40

Figura 4.3: Tipos de suelo para la cuenca del Río Maule en Longitudinal ..... 44

Figura 4.4: Resultados del período completo en estación Estero Las Garzas, método estacionario.. 48

Figura 4.5: Resultados del período completo en estación Río Maule en Armerillo, método estacionario ..... 48

Figura 4.6: Resultados del período completo en estación Estero Las Garzas, método dinámico ..... 52

Figura 4.7: Resultados del período completo en estación Río Maule en Armerillo, método dinámico ..... 52

Figura 4.8: Distribución espacial de métricas obtenidas con método estacionario ..... 54

Figura 4.9: Distribución espacial de métricas obtenidas con método dinámico ..... 54

**ANEXOS**

Figura A. 1: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Estero Las Garzas ..... 68

Figura A. 2: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Río Claro en San Carlos..... 68

Figura A. 3: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Río Melado en El Salto ..... 69

Figura A. 4: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Río Maule en Los Baños..... 69

Figura A. 5: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Río Maule en Armerillo ..... 70

Figura A. 6: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 5 a 15 cm ..... 72

Figura A. 7: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 15 a 30 cm ..... 72

Figura A. 8: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 30 a 60 cm ..... 73

Figura A. 9: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 60 a 100 cm ..... 73

Figura A. 10: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 100 a 200 cm .... 74

Figura A. 11: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 5 a 15 cm .... 77

Figura A. 12: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 15 a 30 cm .. 77

Figura A. 13: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 30 a 60 cm .. 78

Figura A. 14: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 60 a 100 cm 78

Figura A. 15: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 100 a 200 cm ..... 79

Figura A. 16: Resultados de calibración y validación para estación Río Maule en Longitudinal, método estacionario..... 87

Figura A. 17: Resultados de calibración y validación para estación Río Claro en San Carlos, método estacionario..... 87

Figura A. 18: Resultados de calibración y validación para estación Río Maule en Los Baños, método estacionario..... 88

Figura A. 19: Resultados de calibración y validación para estación Río Melado en El Salto, método estacionario..... 88

Figura A. 20: Resultados de validación para estación Río Maule en Longitudinal, método estacionario ..... 89

Figura A. 21: Resultados de validación para estación Río Claro en San Carlos, método estacionario..... 89

Figura A. 22: Resultados de validación para estación Río Maule en Armerillo, método estacionario..... 90

Figura A. 23: Resultados de validación para estación Estero Las Garzas, método estacionario..... 90

Figura A. 24: Resultados de validación para estación Río Maule en Los Baños, método estacionario..... 91

Figura A. 25: Resultados de validación para estación Río Melado en El Salto, método estacionario 91

Figura A. 26: Resultados de calibración y validación para estación Río Maule en Longitudinal, método dinámico ..... 92

Figura A. 27: Resultados de calibración y validación para estación Río Claro en San Carlos, método dinámico ..... 92

Figura A. 28: Resultados de calibración y validación para estación Río Maule en Los Baños, método dinámico ..... 93

Figura A. 29: Resultados de calibración y validación para estación Río Melado en El Salto, método dinámico ..... 93

Figura A. 30: Resultados de validación para estación Río Maule en Longitudinal, método dinámico ..... 94

Figura A. 31: Resultados de validación para estación Río Claro en San Carlos, método dinámico .. 94

Figura A. 32: Resultados de validación para estación Río Maule en Armerillo, método dinámico... 95

Figura A. 33: Resultados de validación para estación Estero Las Garzas método dinámico ..... 95

Figura A. 34: Resultados de validación para estación Río Maule en Los Baños, método dinámico . 96

Figura A. 35: Resultados de validación para estación Río Melado en El Salto, método dinámico ... 96

# 1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

El agua dulce es un recurso esencial para la vida, el equilibrio de los ecosistemas y el desarrollo de actividades económicas y sociales. Sin embargo, su disponibilidad presenta una marcada variabilidad espacial y temporal, lo que representa un desafío considerable para su gestión sostenible. En países como Chile, esta desigualdad se ve intensificada por las condiciones climáticas heterogéneas entre el norte árido, el centro semiárido y el sur más húmedo (Lozano-Parra, 2018).

A pesar de que el país cuenta con una disponibilidad anual estimada de más de 500 km<sup>3</sup> de agua, esta no se distribuye equitativamente a lo largo del territorio. Las zonas con mayor población y desarrollo productivo coinciden con regiones de mayor escasez relativa. Esta situación hace indispensable evaluar con precisión la disponibilidad hídrica para apoyar una planificación adecuada del recurso.

En este contexto, el sector agrícola concentra el segundo mayor porcentaje del consumo hídrico en Chile. Según el informe “Escenarios Hídricos 2030” (2022), el 96% del uso total del agua, considerando tanto fuentes superficiales como subterráneas, está destinado entre la zona forestal (59%) y la agrícola (37%). Esta tendencia se intensifica en la zona centro-sur del país, donde se encuentran cuencas altamente intervenidas y con fuerte presión sobre los recursos.

Uno de los factores que incide con fuerza sobre la disponibilidad del agua es el cambio de uso del suelo. Modificaciones como la expansión urbana, la sustitución de bosque nativo por plantaciones forestales o la intensificación agrícola, alteran procesos clave del ciclo hidrológico, incluyendo la escorrentía, la infiltración y la evapotranspiración (Pliscoff, 2020). La vegetación, especialmente en zonas altas, cumple un rol regulador en el proceso precipitación–escorrentía. Diversos estudios han evidenciado que la cobertura vegetal, independiente de su tipo, mejora la capacidad de regulación hídrica del suelo (UNESCO, 2019).

En esta línea, el tipo de suelo también influye significativamente en la respuesta hidrológica de una cuenca. Propiedades como la textura, la densidad aparente (*Bulk Density*), la capacidad de agua disponible (AWC) y la conductividad hidráulica saturada (Ksat), determinan en gran medida la

magnitud de la escorrentía superficial. Suelos arenosos, por ejemplo, presentan alta infiltración, pero baja capacidad de retención hídrica, lo que puede disminuir el escurrimiento y limitar el almacenamiento útil. En contraste, suelos arcillosos tienden a saturarse con mayor rapidez, generando escorrentías más intensas (Bouma, 1989; Rawls *et al.*, 1982). Estos elementos hacen necesario considerar tanto el uso como las propiedades del suelo en cualquier evaluación de disponibilidad hídrica.

La Región del Maule presenta un contexto particularmente sensible a estos fenómenos. Se caracteriza por un clima mediterráneo, con precipitaciones concentradas en invierno y veranos secos, lo que hace que la gestión del agua sea un desafío constante. A ello se suma una economía intensamente agrícola, donde el 16,2% del Producto Interno Bruto regional proviene de este sector (Muñoz & Navarro, 2011). Además, la cuenca alberga embalses de riego y centrales hidroeléctricas que ejercen una presión adicional sobre los recursos hídricos. Las comunas más dependientes del riego agrícola — como Talca, San Rafael y Hualañé— enfrentan altos niveles de erosión en los suelos, lo que afecta la capacidad de retención hídrica y agrava la vulnerabilidad frente a la escasez.

Entre los años 1995 y 2016, la cuenca del río Maule experimentó importantes transformaciones en su cobertura vegetal. Según Pliscoff (2020), se produjo una reducción significativa de ecosistemas clave como el bosque caducifolio costero, el bosque espinoso interior y el matorral esclerófilo. Esto implicó una pérdida de funciones ecosistémicas que contribuyen a la regulación del ciclo hidrológico, como la infiltración, el sombreado de cauces y el control de la erosión. Si bien el cambio de uso del suelo ha sido relativamente moderado en extensión, se destacan procesos como la expansión urbana en la comuna de Talca, en detrimento de superficies agrícolas. Además, cabe recordar que estos datos preceden al mega incendio de 2017, que destruyó más de 450 mil hectáreas entre las regiones de O'Higgins y Biobío, con graves consecuencias para los suelos y la disponibilidad hídrica en la zona costera del Maule (Pliscoff *et al.*, 2020).

Un aspecto que refuerza la complejidad de evaluar la disponibilidad hídrica en la cuenca del Maule es la limitada resolución y cobertura de la información edáfica disponible. Bases de datos tradicionales como las del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) presentan vacíos significativos en varias zonas de la cuenca, dificultando una caracterización precisa de los suelos. Esta situación plantea la necesidad de fortalecer la base de información con nuevas fuentes de datos

que permitan una representación más detallada y coherente de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo. Contar con una caracterización edáfica confiable es clave para entender la dinámica de la escorrentía y otros procesos hidrológicos, especialmente en contextos de cambio de uso del suelo.

Frente a este escenario, evaluar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Maule bajo distintos escenarios de cambio de uso del suelo se vuelve una tarea prioritaria. El modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) ha demostrado ser una herramienta robusta para este tipo de análisis, al integrar datos espaciales y temporales y simular procesos clave como escorrentía, evapotranspiración, infiltración y flujo base (Arnold *et al.*, 1998; Janjić & Tadić, 2023). La presente investigación busca contribuir a una mejor comprensión del comportamiento hidrológico de la cuenca del Maule y entregar insumos útiles para la gestión sostenible del recurso hídrico.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Maule, considerando la evolución espacio temporal del uso de suelo.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Generar los datos de entrada requeridos para implementar el modelo SWAT en la cuenca del río Maule, integrando información hidrometeorológica, edáfica y de uso del suelo para los años 1998, 2010 y 2020.
- Implementar y ejecutar el modelo hidrológico SWAT considerando distintas metodologías de evolución temporal y espacial del uso del suelo para la simulación del balance hídrico de la cuenca.
- Analizar la existencia de diferencias significativas en la disponibilidad hídrica obtenidas mediante modelos que consideran evolución temporal y espacial del uso de suelo.

### 1.3 Métodos

Para llevar a cabo el presente estudio, se definieron cuatro etapas principales que estructuran el desarrollo metodológico del trabajo. Estas etapas comprenden tanto el levantamiento de información como la implementación y análisis del modelo hidrológico.

1. Se realizó una revisión exhaustiva de estudios relacionados con la disponibilidad hídrica en la zona centro-sur de Chile, el impacto del tipo y uso del suelo sobre el ciclo hidrológico, y las herramientas de modelación utilizadas en este tipo de análisis. En particular, se abordaron antecedentes del modelo SWAT y su aplicación en contextos similares.
2. Se recopilaron los datos de entrada requeridos para el modelo hidrológico, incluyendo información hidrometeorológica, coberturas de uso del suelo correspondientes a los años 1998, 2010 y 2020, y una base de datos de suelos generada a partir de parámetros físicos e hidráulicos obtenidos desde productos espaciales de libre acceso.
3. Se configuró y ejecutó el modelo hidrológico para la cuenca del río Maule, generando los archivos y estructuras necesarias para simular escenarios con cambio de uso de suelo de tipo estacionario y dinámico. Posteriormente, se llevó a cabo la calibración y validación del modelo utilizando indicadores de ajuste como el Coeficiente de Correlación ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffe (NSE) y Kling-Gupta *Efficiency* (KGE).
4. Finalmente, se evaluaron y compararon los resultados obtenidos bajo ambos enfoques de cambio de uso de suelo (estacionario y dinámico), identificando diferencias significativas en los caudales simulados y su comportamiento espacial y temporal.

### 1.4 Principales resultados y conclusiones

La simulación hidrológica realizada mediante el modelo SWAT permitió evaluar la disponibilidad hídrica diaria en la cuenca del río Maule bajo distintos escenarios de cambio de uso de suelo. Uno de los principales aportes del estudio fue la generación de una base de datos edáfica detallada, obtenida mediante análisis estadísticos sobre la base CLSoilMaps, que mejoró la parametrización del modelo

y permitió identificar 19 tipos de suelos representativos de la cuenca. Los resultados indicaron que el enfoque dinámico de uso de suelo presentó un mejor desempeño en varias estaciones clave en comparación con el método estacionario, especialmente en términos de ajuste a la media observada y replicación del caudal base. Sin embargo, se identificaron limitaciones relevantes asociadas a la presencia de embalses y obras hidráulicas, cuyas características debieron ser parcialmente asumidas por falta de datos, lo que afectó la representación en algunas zonas. En conjunto, el estudio evidencia que la calidad de los datos de entrada —especialmente de suelos y condiciones antrópicas— es clave para la fidelidad de las simulaciones hidrológicas, y destaca la utilidad de integrar enfoques dinámicos para representar mejor la evolución del paisaje y su efecto sobre la disponibilidad de agua.

### **1.5 Estructura del informe**

El presente informe se organiza en cinco capítulos principales. El Capítulo 1 presenta la introducción general del estudio, incorporando la motivación, el contexto, los objetivos, la metodología, los principales resultados y la estructura del documento. El Capítulo 2 corresponde al estado del arte, donde se reúnen antecedentes conceptuales y empíricos relacionados con la disponibilidad hídrica, la influencia del uso y tipo de suelo en el ciclo hidrológico, y la aplicación del modelo SWAT en estudios similares. El Capítulo 3 detalla los materiales y métodos empleados en la investigación, incluyendo el área de estudio, las fuentes de información, el proceso de generación de insumos y la configuración del modelo SWAT. En el Capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos, tanto en términos de calibración y validación del modelo como de los escenarios simulados, destacando los efectos del cambio de uso del suelo sobre la disponibilidad hídrica. Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones generales del estudio, sus implicancias para la gestión del recurso hídrico y las recomendaciones para futuras investigaciones.

## 2 CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introducción

La evaluación de la disponibilidad hídrica en una cuenca requiere comprender en profundidad los procesos que componen el ciclo hidrológico, los cuales se ven influenciados por factores climáticos, edáficos, topográficos y por el uso del suelo. Dado que el comportamiento hidrológico de las cuencas es complejo y dinámico, resulta fundamental el uso de herramientas de modelación que permitan representar estos procesos y simular su respuesta ante diferentes escenarios.

En este contexto, la modelación hidrológica se ha consolidado como una técnica clave para la gestión sustentable del recurso hídrico, ya que permite analizar el impacto de variaciones en la cobertura del suelo, el cambio climático o las intervenciones humanas sobre la disponibilidad y distribución del agua. El presente capítulo entrega una revisión de los fundamentos de la modelación hidrológica, el rol de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los principales modelos utilizados a nivel internacional y nacional, y la justificación del uso del modelo SWAT para esta investigación.

### 2.2 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica busca representar de manera matemática los procesos del ciclo hidrológico que ocurren en una cuenca hidrográfica. Esto permite comprender el comportamiento del agua en respuesta a la precipitación, la evapotranspiración, el almacenamiento en el suelo, la escorrentía superficial y el flujo subterráneo. La elección del modelo depende de múltiples factores como el objetivo del estudio, la escala de trabajo, la disponibilidad de datos y la precisión requerida (WMO, 2009).

Desde una perspectiva metodológica, los modelos hidrológicos pueden ser clasificados en determinísticos y probabilísticos. Los modelos determinísticos emplean ecuaciones físicas o empíricas que generan un resultado numérico único para un conjunto dado de condiciones iniciales y parámetros, mientras que los modelos probabilísticos asumen que las variables involucradas tienen una distribución estadística asociada y entregan resultados en términos de probabilidades de

ocurrencia. Esta distinción es importante a la hora de seleccionar el enfoque más adecuado para el tipo de estudio y nivel de incertidumbre aceptable (Bladé *et al.*, 2014).

Una de las clasificaciones más comunes de los modelos hidrológicos se basa en el nivel de detalle espacial con que representan los procesos físicos de una cuenca. Bajo este criterio, los modelos se agrupan en tres categorías: modelos agrupados, distribuidos y semi-distribuidos. Los modelos agrupados consideran la cuenca como una unidad homogénea, sin distinguir diferencias internas en variables como pendiente, uso del suelo o tipo de suelo. Esta simplificación permite una implementación sencilla y bajos requerimientos de datos, aunque limita la representación espacial del sistema. Ejemplos representativos incluyen el método racional, el hidrograma unitario y el método DGA-AC, ampliamente aplicado en Chile para estimaciones de caudales máximos. En contraste, los modelos distribuidos subdividen la cuenca en una malla de celdas con parámetros propios, permitiendo una simulación detallada y continua en el espacio. Este enfoque mejora la precisión en el modelado de procesos complejos, pero requiere alta disponibilidad de información y recursos computacionales. Entre los modelos distribuidos más reconocidos se encuentran SHE (Abbott *et al.*, 1986) e IDHM (Beven *et al.*, 1987). Finalmente, los modelos semi-distribuidos surgen como una alternativa intermedia que combina ventajas de ambos extremos. Estos dividen la cuenca en subcuencas, con el fin de agrupar áreas con condiciones homogéneas de pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, precipitaciones, etc. Así, permiten representar la variabilidad espacial con un costo computacional más razonable. Modelos como HEC-HMS (en su versión semidistribuida) y SWAT pertenecen a esta categoría y han sido ampliamente utilizados para evaluar el efecto del cambio de uso del suelo sobre la disponibilidad hídrica (Arnold *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2019).

En el contexto chileno, donde las cuencas presentan alta heterogeneidad y la información disponible es limitada en muchas zonas, los modelos semi-distribuidos han mostrado un buen desempeño en términos de equilibrio entre precisión, capacidad de análisis espacial y demanda de datos.

### **2.3 Estudios previos sobre cambio de uso de suelo y modelación hidrográfica**

Numerosos estudios nacionales e internacionales han abordado el impacto del cambio de uso del suelo sobre la disponibilidad hídrica y el comportamiento de las cuencas, utilizando distintos modelos

hidrológicos. Estas investigaciones permiten comprender cómo variaciones en la cobertura vegetal o expansión urbana alteran procesos como la escorrentía, la infiltración o la recarga de acuíferos.

En Corea del Sur, Heo *et al.* (2008) aplicaron el modelo SWAT en la cuenca del río Hoeya para evaluar los efectos combinados del cambio climático y del uso del suelo bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5. Los resultados indicaron que el cambio climático ejercía un efecto predominante sobre la escorrentía, pero la urbanización intensificaba la variabilidad del flujo estacional, generando aumentos significativos en épocas húmedas y disminuciones marcadas en periodos secos. Esta interacción subraya la importancia de considerar ambos factores en la planificación hídrica.

En Europa, Palacios-Cabrera *et al.* (2022) emplearon el modelo HEC-HMS para simular la dinámica hidrológica de la cuenca mediterránea de Guadalest, España. El estudio evaluó los impactos del abandono agrícola y la posterior regeneración natural hacia bosques de coníferas y pastizales. Se observaron aumentos en los caudales pico durante tormentas y una reducción en los caudales base, revelando la sensibilidad de estos ecosistemas kársticos a cambios en la cobertura vegetal y a la modificación de las condiciones del suelo.

En el centro-sur de Chile, diversos estudios han aplicado SWAT con resultados significativos. Martínez-Retureta *et al.* (2020) analizaron el comportamiento de la cuenca del río Andalién ante la sustitución del bosque nativo por plantaciones forestales (pino y eucalipto) entre 1986 y 2011. Los hallazgos mostraron incrementos en la evapotranspiración y escorrentía superficial, junto con una disminución de la percolación y del flujo lateral, lo que implica una merma en la recarga subterránea y en la disponibilidad hídrica durante el estiaje.

Por otro lado, Aguayo *et al.* (2016) desarrollaron un análisis en la cuenca del río Vergara, también en Chile, proyectando escenarios futuros de expansión forestal para los años 2018, 2028 y 2038. A través de simulaciones con SWAT, se estimó una reducción progresiva en los caudales estivales, alcanzando disminuciones superiores al 50% en algunos puntos de la cuenca. Estos resultados advierten sobre los riesgos asociados a cambios intensivos en el uso del suelo, particularmente en zonas ya vulnerables a la sequía.

Además de estos casos, la literatura científica ha documentado aplicaciones de SWAT en otras regiones con condiciones climáticas y geomorfológicas similares a las del centro-sur de Chile. En África, el modelo SWAT ha sido implementado en estudios como el de Serpa *et al.* (2024), que evalúan el comportamiento hidrológico del continente mediante versiones adaptadas como SWAT+, destacando su aplicabilidad en zonas con escasez de datos y climas variables. Por otro lado, en el sudeste asiático, se ha documentado una amplia aplicación del modelo, como en la revisión sistemática de Bui *et al.* (2019), donde se identifican más de 120 estudios en países como Tailandia, Vietnam y Filipinas, enfocados en cambio de uso del suelo, dinámica del agua y manejo sostenible del recurso hídrico.

También se han realizado estudios con el modelo HEC-HMS en otras regiones. Por ejemplo, Azizi *et al.* (2021) evaluaron los efectos del cambio de uso del suelo en la cuenca del embalse Ekbatan, en Irán, utilizando imágenes Landsat correspondientes a los años 1985, 2000 y 2015. A partir del cálculo de los valores de Curva Número (CN) y simulaciones hidrológicas en HEC-HMS, se detectó un aumento progresivo en los caudales pico de 64.3 m<sup>3</sup>/s (1985) a 70.5 m<sup>3</sup>/s (2015), revelando el efecto acumulativo del crecimiento urbano y la transformación del paisaje sobre la dinámica hidrológica.

Estas investigaciones confirman la versatilidad de ambos modelos en regiones diversas, resaltando su utilidad para estudios hidrológicos complejos que requieren integrar múltiples factores espaciales y temporales. Tanto SWAT como HEC-HMS han demostrado ser herramientas eficaces para modelar el efecto del cambio de uso del suelo sobre el ciclo hidrológico. La elección entre uno u otro depende de las condiciones particulares del área de estudio, la escala temporal y espacial del análisis, así como de los objetivos específicos de la investigación. En distintos contextos geográficos y climáticos, ambos modelos han entregado resultados útiles para la planificación del recurso hídrico.

#### **2.4 Comparación entre modelos hidrológicos: HEC-HMS y SWAT**

La selección del modelo hidrológico más adecuado para un estudio depende de múltiples factores, incluyendo el objetivo de la investigación, la escala temporal y espacial del análisis, la disponibilidad de datos y el nivel de detalle deseado. En este contexto, dos de los modelos más utilizados a nivel internacional y nacional son HEC-HMS y SWAT, ambos pertenecientes a la categoría de modelos semi-distribuidos, aunque con enfoques y funcionalidades distintas.

HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*) fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para simular el proceso de precipitación-escorrentía en cuencas hidrográficas. Su estructura modular permite representar diferentes componentes del ciclo hidrológico, como la escorrentía directa, el flujo base y el almacenamiento en canales, mediante métodos empíricos y conceptuales (USACE, 2000). HEC-HMS es ampliamente utilizado en el diseño de obras hidráulicas, análisis de eventos extremos y estudios de crecidas, destacándose por su flexibilidad, interfaz amigable y bajos requerimientos de datos. Sin embargo, su capacidad para representar variaciones espaciales complejas del uso del suelo o del tipo de suelo es más limitada en comparación con modelos que integran Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Por otro lado, SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) es un modelo semi-distribuido orientado al análisis de largo plazo del balance hídrico y el transporte de sedimentos y nutrientes en cuencas hidrográficas. Fue desarrollado por el USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) y se integra de forma nativa con herramientas SIG, lo que le permite capturar la heterogeneidad espacial del terreno a través de subcuencas y Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). Cada HRU representa una combinación única de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente, permitiendo una simulación detallada de los procesos hidrológicos.

A diferencia de HEC-HMS, SWAT permite realizar simulaciones multianuales y evaluar el impacto de distintos escenarios de uso del suelo, prácticas de manejo o condiciones climáticas. Esta característica lo convierte en una herramienta especialmente útil para estudios de planificación territorial, manejo integrado de cuencas y evaluación de políticas ambientales. Asimismo, su enfoque basado en procesos permite modelar fenómenos como la escorrentía superficial, la evapotranspiración, la infiltración, la percolación profunda y el flujo subterráneo, entre otros.

En resumen, mientras HEC-HMS resulta más apropiado para simulaciones hidrológicas en eventos específicos y de corta duración, especialmente en contextos de ingeniería aplicada, SWAT ofrece una solución más robusta para estudios a escala de cuenca en el largo plazo, donde se requiere una comprensión detallada de la dinámica hidrológica bajo distintas condiciones espaciales y temporales. En el presente estudio, se opta por utilizar SWAT debido a su mayor adecuación a los objetivos de evaluación de disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio de uso del suelo en la cuenca del río Maule.

## 2.5 Modelo SWAT

El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es una herramienta semi-distribuida de carácter físico-empírico desarrollada por el USDA-ARS (*United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service*). Está diseñado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo, los cambios de uso del suelo y las condiciones climáticas en la calidad y cantidad del agua en cuencas hidrográficas de gran extensión y en horizontes temporales largos (Arnold *et al.*, 1998).

La estructura de SWAT considera la división jerárquica de la cuenca en subcuencas y, posteriormente, en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). Estas HRU agrupan áreas con condiciones homogéneas en cuanto a pendiente, tipo de suelo y uso de suelo. Esta organización permite modelar la heterogeneidad espacial de la cuenca sin recurrir a un enfoque completamente distribuido, reduciendo los requerimientos computacionales. Las simulaciones se realizan inicialmente a nivel de cada HRU, donde se calcula el balance hídrico y los procesos asociados de forma independiente. Luego, los resultados obtenidos para todas las HRU de una subcuenca se agregan para determinar las salidas hidrológicas a nivel de subcuenca, las cuales finalmente se integran en la red de drenaje de toda la cuenca, permitiendo obtener los caudales y demás variables hidrológicas en los puntos de interés definidos en el modelo. El cálculo del balance hidrológico se realiza a nivel de HRU a escala diaria según la Ecuación 2.1.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})_i \quad (2.1)$$

Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo (mm),  $SW_0$  es el contenido de agua inicial en el día  $i$  (mm),  $R_{day}$  es la precipitación ocurrida en el día  $i$  (mm),  $Q_{surf}$  corresponde a la escorrentía superficial del día  $i$ ,  $E_a$  es la evapotranspiración diaria del día  $i$  (mm),  $w_{seep}$  es el agua que percola en el día  $i$ ,  $Q_{gw}$  el flujo de retorno que ocurre en el día  $i$  y  $t$  el tiempo en días.

En lo que respecta a la hidrología, los principales procesos simulados por SWAT comprenden la escorrentía superficial, la infiltración, la evapotranspiración, la percolación profunda, el flujo lateral, el flujo base y la recarga de acuíferos.

Para modelar la escorrentía superficial, SWAT permite seleccionar entre dos métodos: el método de la Curva Número (CN), desarrollado por el SCS (*Soil Conservation Service*, 1972), y el método de Green-Ampt (Green & Ampt, 1911), que considera el avance del frente de humedad en el suelo en función de la succión capilar y el contenido de agua. Dado que SWAT trabaja a nivel de HRU, en cada unidad calcula su escorrentía de forma independiente y luego se agregan los resultados para obtener el total a nivel de subcuenca.

La estimación de la evapotranspiración se puede realizar mediante distintos enfoques, siendo los más comunes Penman-Monteith (Monteith, 1965), Priestley-Taylor (Priestley & Taylor, 1972) y Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985). Este último método resulta particularmente útil en contextos donde la información climática es limitada, ya que solo requiere las temperaturas máximas y mínimas diarias. Su cálculo se expresa mediante la Ecuación 2.2.

$$\lambda E_0 = 0.0023 \times H_0 \times (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0.5} \times (T_m + 17.8) \quad (2.2)$$

Donde  $\lambda$  representa el calor latente de vaporización ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ),  $E_0$  la evapotranspiración potencial ( $\text{mm/día}$ ),  $H_0$  la radiación extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $T_{m\acute{a}x}$  y  $T_{m\acute{i}n}$  las temperaturas máxima y mínima diarias ( $^{\circ}\text{C}$ ), y  $T_m$  la temperatura media diaria ( $^{\circ}\text{C}$ ).

El flujo base en SWAT se representa mediante un modelo de recesión, que simula la contribución del acuífero superficial al caudal base.

El modelo requiere diversos datos de entrada para su correcta implementación. En el caso de la información climática, se consideran variables como la temperatura máxima y mínima, la precipitación, la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento. Cabe destacar que, si no se cuenta con registros locales de radiación solar, humedad o viento, el modelo ofrece la posibilidad de estimarlos mediante uso de valores por defecto. En el ámbito topográfico, es fundamental contar con un Modelo Digital de Elevación (DEM) que permita representar la morfología del terreno, calcular pendientes, definir redes de drenaje y delimitar subcuencas. Respecto a las características edáficas, se incluyen propiedades de los tipos de suelo como la textura, la densidad aparente, la capacidad de retención de agua (AWC), la conductividad hidráulica saturada (Ksat), entre otros. Por último, es fundamental disponer de mapas actualizados de uso del suelo, los

cuales permiten definir las coberturas vegetales y actividades antrópicas presentes en la cuenca, aspectos clave para la estimación de la evapotranspiración y el coeficiente de escorrentía.

Las salidas del modelo pueden incluir series temporales de caudales diarios, mensuales y anuales, mapas de balance hídrico, curvas de escorrentía y simulaciones de calidad del agua y sedimentos.

Gracias a su flexibilidad y nivel de detalle, SWAT ha sido ampliamente utilizado en estudios de gestión integrada de recursos hídricos, evaluación de impactos del cambio de uso del suelo, escenarios de cambio climático y políticas de conservación ambiental. En Chile, su aplicación ha demostrado ser adecuada en regiones con variabilidad climática, topografía compleja y disponibilidad limitada de datos, lo cual refuerza su elección en esta investigación.

## **2.6 Justificación del uso del modelo SWAT en Chile**

La elección del modelo SWAT para esta investigación se justifica por las características propias de las cuencas chilenas y por su historial de aplicación en contextos similares. En primer lugar, muchas cuencas del país, como la del río Maule, presentan una alta heterogeneidad espacial tanto en términos de topografía como de uso del suelo y condiciones climáticas. SWAT, al ser un modelo semi-distribuido, permite representar esta variabilidad mediante la subdivisión en subcuencas y HRU, lo que resulta especialmente útil en contextos con complejidad territorial.

Además, uno de los desafíos recurrentes en Chile es la escasez o discontinuidad de datos climáticos y de suelos, especialmente en sectores rurales o de difícil acceso. En este sentido, SWAT ofrece una ventaja comparativa al permitir simulaciones razonablemente precisas aun cuando no se dispone de toda la información, ya que cuenta con módulos que permiten estimar ciertos parámetros a partir de datos básicos.

Estudios realizados en cuencas chilenas como las del río Andalién y río Vergara han demostrado la efectividad del modelo SWAT para evaluar impactos del cambio de uso del suelo, proyectar escenarios futuros de disponibilidad hídrica y apoyar la toma de decisiones en gestión territorial y planificación del recurso agua (Martínez-Retureta *et al.*, 2020; Aguayo *et al.*, 2016). Estas experiencias refuerzan su aplicabilidad en el caso de estudio del Maule.

Por último, la capacidad de SWAT para integrar información geoespacial, simular a largo plazo y modelar múltiples procesos simultáneamente lo posiciona como una herramienta adecuada para abordar estudios orientados a la sostenibilidad hídrica en cuencas agrícolas intensivas como la del río Maule. en estudios de gestión integrada de recursos hídricos, evaluación de impactos del cambio de uso del suelo, escenarios de cambio climático y políticas de conservación ambiental. En Chile, su aplicación ha demostrado ser adecuada en regiones con variabilidad climática, topografía compleja y disponibilidad limitada de datos, lo cual refuerza su elección en esta investigación.

## **2.7 Conclusiones**

El presente capítulo abordó los principales fundamentos conceptuales y técnicos necesarios para comprender el enfoque de esta investigación. Se revisaron las distintas clasificaciones de modelos hidrológicos y su aplicabilidad según la escala, los objetivos y la disponibilidad de datos, destacando el papel de los SIG como herramienta esencial para la integración de información espacial. Asimismo, se describieron diversos estudios nacionales e internacionales que han utilizado modelos como HEC-HMS y SWAT para analizar el efecto del cambio de uso del suelo sobre la dinámica hidrológica. Finalmente, se presentó en detalle la estructura y funcionamiento del modelo SWAT, justificando su elección a partir de su capacidad para representar la heterogeneidad de las cuencas chilenas y su comprobada eficacia en escenarios de escasa disponibilidad de datos.

### 3 CAPÍTULO 3: MÉTODOS Y MATERIALES

#### 3.1 Introducción

Este capítulo describe la metodología y los materiales empleados para la implementación del modelo hidrológico en la cuenca del río Maule, detallando las características principales del área de estudio y los datos utilizados para su configuración. Se aborda el tratamiento de la información climática, fisiográfica e hidrológica, junto con las técnicas aplicadas para asegurar la consistencia y representatividad de los datos. Asimismo, se expone el procedimiento seguido para la caracterización de la zona en estudio y la estructuración del modelo, incluyendo la delimitación de unidades espaciales y la representación de las condiciones del suelo y del uso del suelo. Finalmente, se presenta el proceso de calibración y validación del modelo, así como el análisis de los resultados obtenidos, permitiendo evaluar su desempeño y adecuación para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca bajo distintos escenarios.

#### 3.2 Área de estudio

La cuenca del río Maule se ubica en la zona centro-sur de Chile, abarcando principalmente la Región del Maule y una pequeña porción de la Región de Ñuble. Se extiende entre las coordenadas 35°06' S a 36°43' S de latitud y 70°22' W a 72°40' W de longitud, con una superficie aproximada de 21.052 km<sup>2</sup>, lo que la posiciona como una de las cuencas hidrográficas más extensas del país.

Geográficamente, esta cuenca se desarrolla desde la cordillera de los Andes hasta su desembocadura en el océano Pacífico, atravesando distintos pisos ecológicos y unidades fisiográficas. Esta diversidad territorial se traduce en una alta heterogeneidad de condiciones climáticas, edáficas y de uso del suelo, lo cual incide directamente en el comportamiento hidrológico de la cuenca. En este estudio se analiza específicamente la cuenca generada a partir de la estación Río Maule en Longitudinal (Figura 3.1), correspondiente a la parte centro-oriental de la cuenca, la cual se caracteriza por su fuerte actividad agrícola y por concentrar importantes obras de infraestructura hídrica.

En términos de régimen hidrológico, el río Maule presenta una dinámica mixta. En la alta cordillera predomina un régimen nival, condicionado por el derretimiento de nieve durante la temporada estival. Sin embargo, hacia su tramo medio e inferior —especialmente con la confluencia del río Loncomilla— se evidencia una mayor influencia pluvial, determinada por las precipitaciones invernales (Bobadilla, 2020).

El clima de la cuenca es mediterráneo, caracterizado por precipitaciones concentradas en invierno y, al menos, dos meses consecutivos del verano con déficit hídrico. El promedio anual de precipitaciones alcanza los 735 mm y el período seco es de seis meses, lo que obliga al almacenamiento de recursos hídricos.

Según el informe de la DGA, el uso del suelo en la cuenca del Maule está dominado por actividades agrícolas, destacando cultivos de mayor importancia como los cereales, especialmente trigo y arroz, los cuales dependen fuertemente del recurso hídrico para mantener su productividad (DGA, 2004). La población en la cuenca bordea las 630000 personas, concentrándose en centros urbanos como Talca, Linares y Curicó, además de numerosos asentamientos rurales vinculados al agro (Escenarios Hídricos 2030, n.d.).

Respecto a la infraestructura hidráulica, se identifican cinco embalses principales (Figura 3.1), entre ellos el embalse Colbún, con una capacidad cercana a los 1500 millones de metros cúbicos, siendo uno de los mayores del país. Otras obras relevantes son la laguna del Maule, la laguna La Invernada y el embalse El Melado, los cuales cumplen un rol clave en la regulación estacional del caudal y en el abastecimiento hídrico para riego y generación hidroeléctrica.

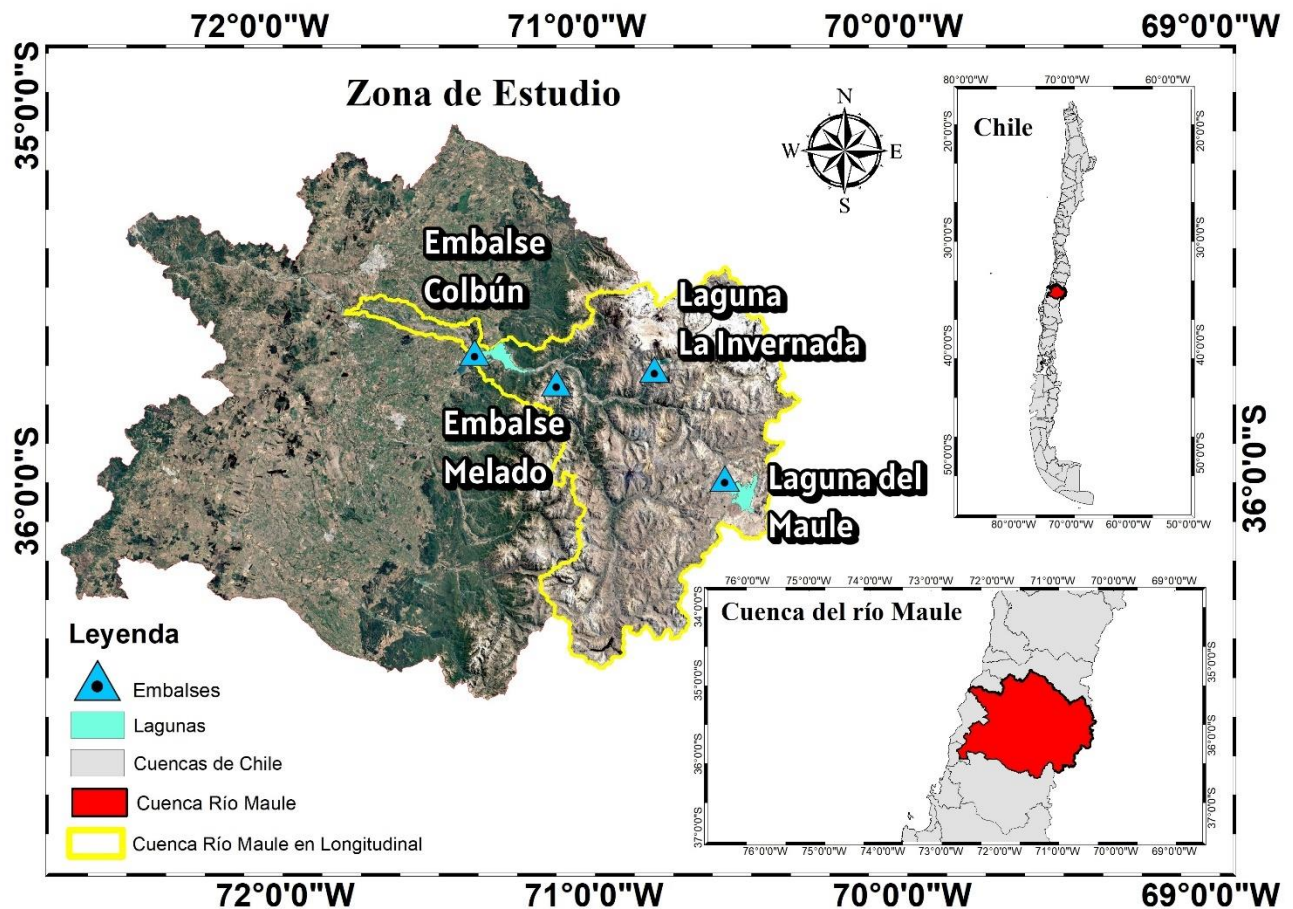


Figura 3.1: Representación gráfica de la Cuenca del Río Maule y Cuenca del Río Maule en Longitudinal

### 3.3 Fuentes de información

#### 3.3.1 Información climática

Para representar adecuadamente las condiciones climáticas de la cuenca del Maule durante el periodo de estudio, se emplearon registros diarios de precipitación y temperatura provenientes de un conjunto de datos de alta resolución espacial generado para Chile continental. Esta base de datos ofrece información continua desde 1960 hasta 2021, organizada en una cuadrícula regular de 0.05 grados de latitud y longitud. Los datos se derivan de modelos estadísticos ajustados con observaciones meteorológicas de calidad controlada, integrando variables del reanálisis ERA5, características topográficas y productos satelitales como MODIS. Esta combinación proporciona una representación coherente y espacialmente distribuida del clima en el territorio nacional, lo que resulta fundamental

para estudios hidrológicos a escala regional. La fuente de esta información corresponde a CR2MET, desarrollada por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) (Boisier, 2023).

### 3.3.2 Información fisiográfica

#### Modelo de elevación digital (DEM)

Para caracterizar la topografía de la cuenca del río Maule, se empleó un Modelo Digital de Elevación (DEM), el cual permitió representar la morfología del terreno y generar insumos fundamentales para el modelo hidrológico, como la delimitación de la cuenca y sus subcuencas, la identificación de la red de drenaje, y el cálculo de parámetros derivados como pendiente y dirección del flujo. El DEM utilizado corresponde a los datos generados por la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), desarrollada conjuntamente por la NASA, la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de Estados Unidos (NGA) y la Agencia Espacial Italiana. Este modelo presenta una resolución espacial cercana a 27 metros, lo que permite capturar adecuadamente las variaciones altitudinales a escala regional. La descarga del DEM se realizó a través del complemento “SRTM Downloader” de QGIS, mientras que el sistema de coordenadas empleado fue WGS 84 / UTM Zona 19 Sur (EPSG: 32719), compatible con la localización geográfica de la cuenca.

#### Usos de suelo

Los mapas de usos de suelo fueron obtenidos del proyecto FONDECYT N°1212032 y titulado *"Escenarios de inundaciones fluviales en un contexto de cambio climático y de uso de suelo en cuencas hidrográficas del centro-sur de Chile: aportes para una planificación urbana sostenible"*. En el marco de este proyecto, se desarrollaron mapas de uso de suelo para los años 1998, 2010 y 2020 (Figura 3.2), los cuales fueron utilizados en el presente estudio

Como se observa en la Tabla 3.1, la categoría de suelo desnudo se mantiene como la cobertura predominante en los tres años analizados, con una participación del 41.5 % en 1998, 47.72 % en 2010 y 45.57 % en 2020. En segundo lugar, destacan los matorrales, con proporciones de 19.84 % en 1998, 18.95 % en 2010 y 20.94 % en 2020. Finalmente, las praderas ocupan el tercer lugar, disminuyendo desde un 16.75 % en 1998 a un 10.99 % en 2010, con una leve recuperación a 11 % en 2020. Entre

las tendencias relevantes, se aprecia un crecimiento sostenido de la superficie destinada a agricultura, junto con aumentos progresivos en las coberturas de asentamientos humanos, humedales y bosque nativo, lo cual evidencia una transformación gradual del paisaje y su uso.

**Tabla 3.1: Comparación del porcentaje de uso de suelo para cada año (1998, 2010 y 2020)**

Clasificación	Uso de suelo (%)		
	1998	2010	2020
Agricultura	2.99	3.03	3.24
Praderas	16.75	10.99	11.00
Matorral	19.84	18.95	20.94
Plantaciones Forestales	0.90	0.70	0.80
Bosque Nativo	9.89	10.29	10.45
Humedales	0.13	0.17	0.22
Cuerpos de Agua	3.05	3.13	2.70
Asentamientos	0.13	0.16	0.23
Suelo Desnudo	41.50	47.72	45.57
Glaciares y Nieves	4.82	4.8	4.84

Para incorporar de forma adecuada los mapas de uso del suelo provenientes del Proyecto FONDECYT n.º 1212032 en el modelo SWAT, fue necesario realizar un proceso de reclasificación temática. Este procedimiento tuvo como objetivo traducir las categorías de uso del suelo del proyecto original a los códigos estandarizados que utiliza SWAT, conocidos como *Land Use/Land Cover Codes* (LULC Codes). Estos códigos permiten al modelo vincular cada tipo de cobertura terrestre con parámetros hidrológicos específicos predefinidos, como el coeficiente de escorrentía, el tipo de vegetación, la tasa de evapotranspiración y las prácticas de manejo asociadas.

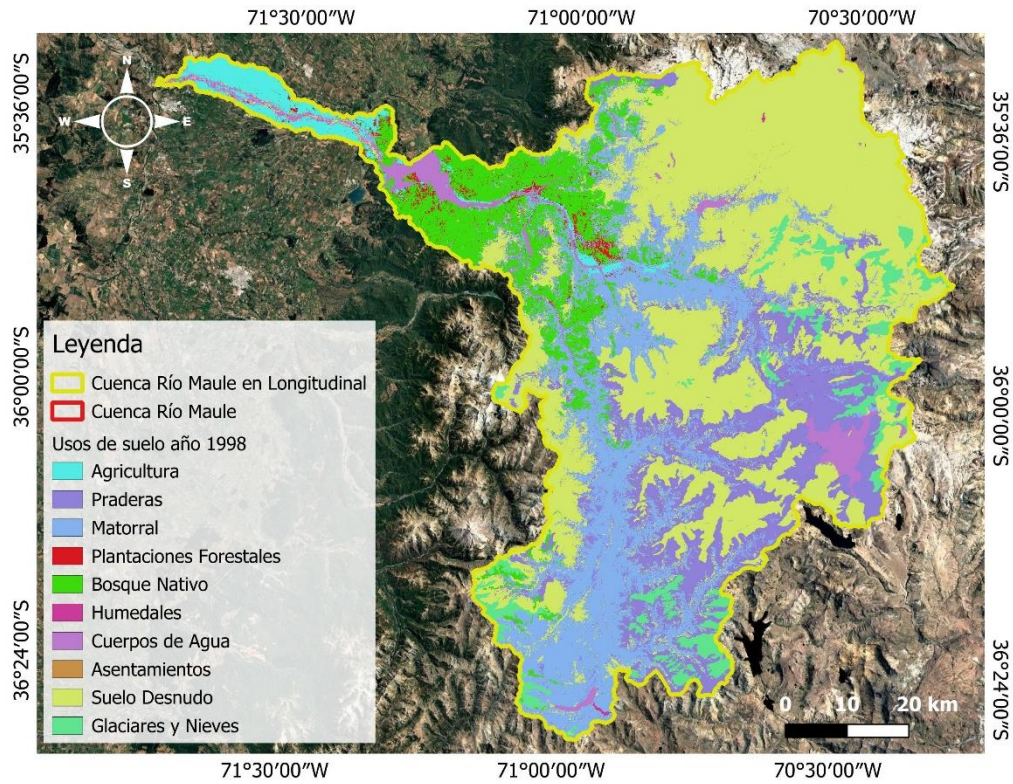
La estandarización de los datos de uso del suelo es un paso clave en la configuración del modelo, ya que garantiza la coherencia entre la información espacial ingresada y los procesos internos de simulación. En particular, SWAT requiere que cada celda o unidad de modelación esté asignada a una clase válida de su base de datos, lo que hace imprescindible realizar esta conversión manual o automatizada, dependiendo del origen de los datos.

En este caso, se identificaron y reclasificaron nueve categorías principales del uso del suelo en la cuenca, representadas originalmente en el proyecto FONDECYT. Estas categorías fueron reclasificadas a las clases equivalentes del modelo SWAT siguiendo criterios técnicos basados en la

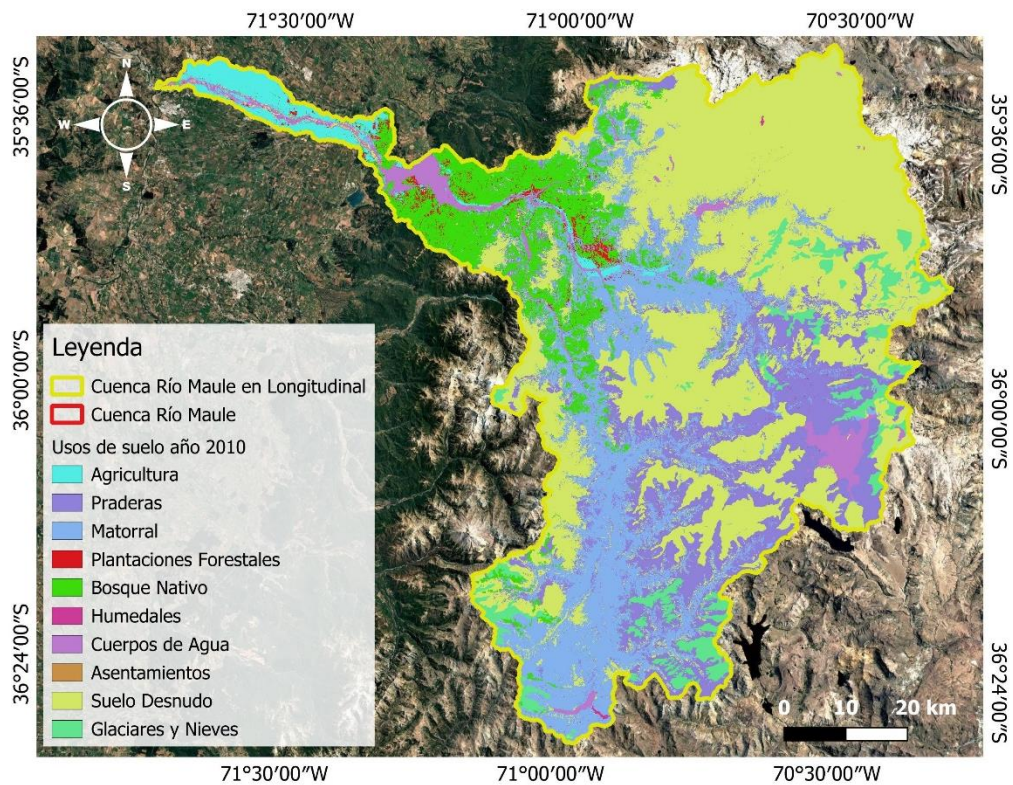
funcionalidad ecológica y el comportamiento hidrológico esperado de cada cobertura. La Tabla 3.2 resume dicha correspondencia, incluyendo el código LULC utilizado en SWAT y su respectiva descripción técnica.

**Tabla 3.2: Equivalencia entre usos de suelo de Proyecto FONDECYT 1212032 y SWAT LULC Codes**

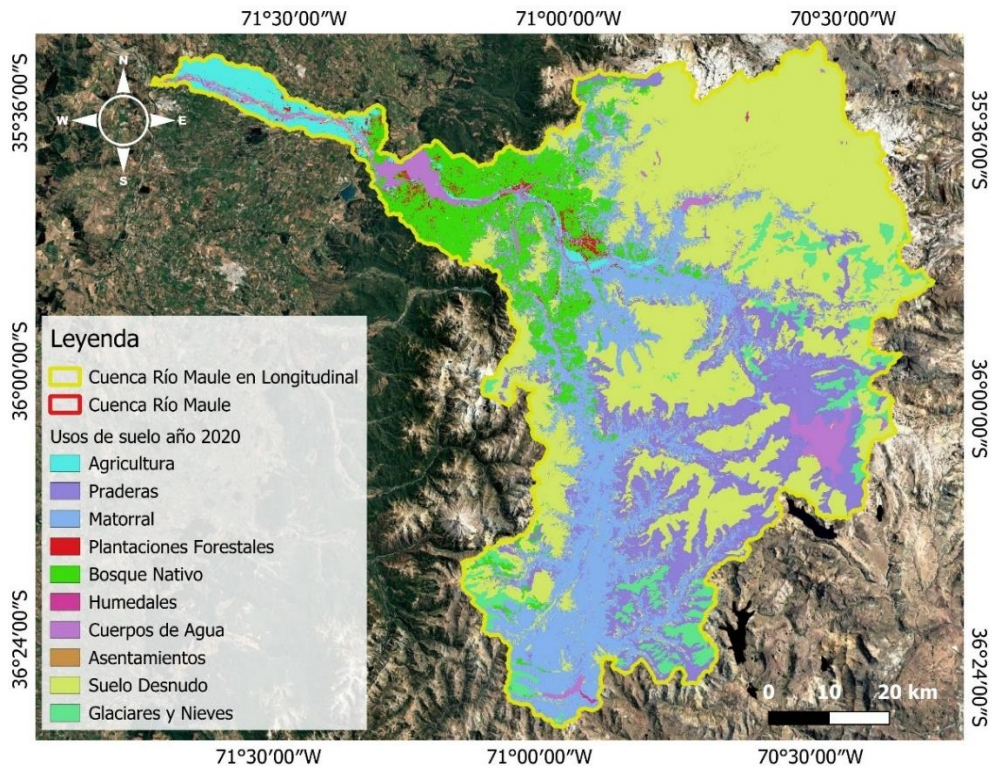
<b>Uso de suelo proyecto FONDECYT</b>	<b>Equivalencia en SWAT ("SWAT LULC Codes")</b>	<b>Detalle en SWAT</b>
Agricultura	AGRL	<i>Agricultural Land-Generic</i>
Praderas	PAST	<i>Pasture</i>
Matorral	RNGE	<i>Range-Grasses</i>
Plantaciones Forestales	FRSE	<i>Forest-Evergreen</i>
Bosque Nativo	FRSD	<i>Forest-Deciduous</i>
Humedales	WETN	<i>Wetlands</i>
Cuerpos de Agua	WATR	<i>Water bodies</i>
Asentamientos	URBN	<i>Urban/Residential</i>
Suelo Desnudo	BARR	<i>Bare Land</i>
Glaciares y Nieves	BARR	<i>Bare Land</i>



(a)



(b)



(c)

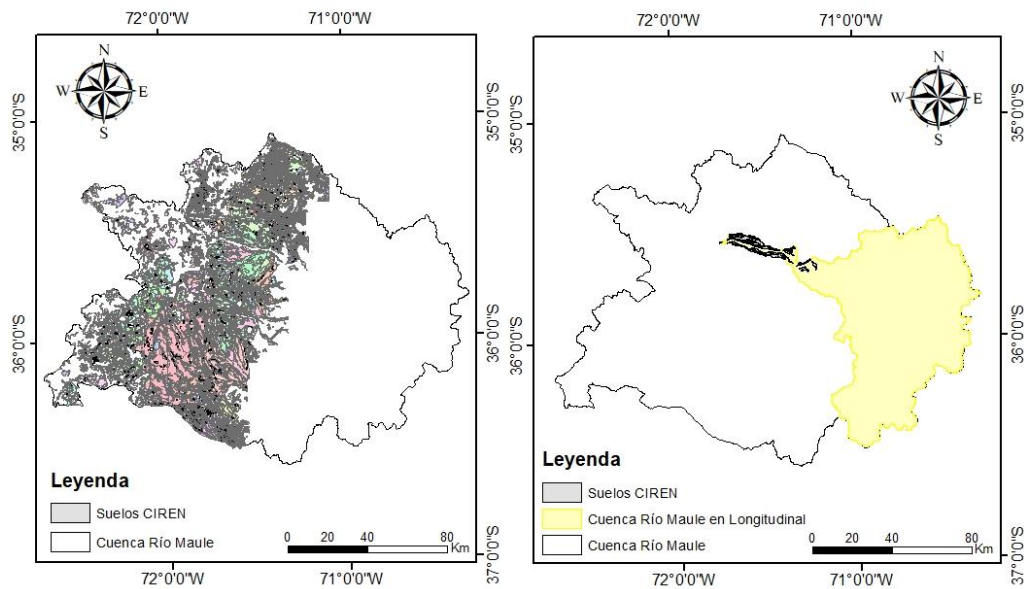
**Figura 3.2:** Distintos escenarios de uso de suelo en la cuenca del Río Maule en Longitudinal para el año 1998 (a), para el año 2010 (b) y para el año 2020 (c)

### Tipos de suelo

La caracterización de los tipos de suelo en una cuenca resulta esencial para representar adecuadamente los procesos hidrológicos en modelos como SWAT. El conocimiento detallado de las propiedades edáficas permite estimar con mayor precisión variables clave como la escorrentía, la infiltración, la evapotranspiración y el almacenamiento de agua en el perfil del suelo. En particular, la correcta identificación de los tipos de suelo es fundamental para la definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), ya que determina cómo se comportará el agua en función de las características físicas del terreno.

Tradicionalmente, los estudios de suelo en Chile se apoyan en la información proporcionada por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), entidad que ha elaborado estudios agrológicos a nivel regional. Estos documentos entregan datos físicos, químicos y fisicoquímicos del suelo, incluyendo parámetros como la textura, densidad aparente, profundidad de estratos, y contenido de carbono orgánico. Sin embargo, en la presente investigación se constató una baja

cobertura de esta información para la cuenca del río Maule Longitudinal. Según los datos espaciales extraídos mediante la calculadora de parámetros de ArcMap, la cuenca tiene una superficie aproximada de 5.940.106.406 m<sup>2</sup>, pero la información de suelos proveniente de CIREN cubre apenas 253.353.200 m<sup>2</sup>, lo que representa un 4.26% del área total de la cuenca. Esta situación se visualiza en la Figura 3.3, que muestra la escasa cobertura de la base CIREN en la zona de estudio.



**Figura 3.3: Disponibilidad de información de tipo de suelo de CIREN en la cuenca en estudio**

Ante esta limitación, se optó por utilizar la base de datos CLSoilMaps (Dinamarca *et al.*, 2023), desarrollada para representar con mayor resolución y cobertura las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos en Chile. Esta base provee mapas raster con resolución espacial de 100 metros, modelados mediante técnicas de mapeo digital del suelo (*Digital Soil Mapping, DSM*) con algoritmos de Random Forest y validados con más de 4000 observaciones. CLSoilMaps entrega 14 atributos edáficos distribuidos en seis estratos de profundidad (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 y 100–200 cm), los cuales incluyen: porcentaje de arcilla, arena y limo; densidad aparente; capacidad de campo (FC); punto de marchitez permanente (PWP); capacidad de agua disponible (AWC); conductividad hidráulica saturada (Ksat); y parámetros de la curva de retención de humedad, como  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$  y Npar.

Se descargaron los archivos raster (.tif) correspondientes a cada parámetro de suelo. Posteriormente, se ajustaron espacialmente a la cuenca del Maule Longitudinal utilizando ArcMap. La Tabla 3.3 presenta los parámetros considerados.

Tabla 3.3: Parámetros del suelo extraídas de CLSoilMaps

Parámetro	Descripción	Unidad
<i>Bulk density</i> (Bulkd)	Densidad aparente de la fracción fina	g/cm <sup>3</sup>
<i>Clay</i>	Contenido de arcilla	%
<i>Sand</i>	Contenido de arena	%
<i>Silt</i>	Contenido de limo	%
<i>Field Capacity</i> (FC)	Capacidad de campo a 330 kPa	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
<i>Permanent Wilting Point</i> (PWP)	Punto de marchitez permanente a 15000 kPa	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
<i>Available Water Capacity</i> (AWC)	Capacidad de agua disponible expresada como 100*(FC – PMP)	mm
<i>Available Moisture</i> (AvMoist)	Humedad disponible como FC-PMP	mm
$\Theta_r$	Contenido de agua residual	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
$\Theta_s$	Contenido de agua a saturación	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
$\alpha$	Parámetro de forma “alfa”	1/cm <sup>3</sup>
Npar	Parámetro de forma “n”	-
<i>Soil Hydraulic Conductivity</i> (Ksat)	Conductividad hidráulica saturada	cm/día

Para evaluar las relaciones lineales entre las variables edáficas derivadas de CLSoilMaps y reducir la redundancia de información, se realizó un análisis de correlación utilizando el coeficiente de Pearson. Este análisis se llevó a cabo en RStudio, donde se cargaron los archivos ráster recortados de cada parámetro de suelo en formato *.tif*, previamente ajustados a los límites de la cuenca del río Maule. Los datos fueron integrados en un único *dataframe*, eliminando las filas con valores faltantes (NA), lo que permitió generar una matriz de correlación completa. Esta matriz tuvo como objetivo identificar asociaciones entre variables y detectar posibles redundancias, con miras a la selección de aquellas más relevantes para la simulación hidrológica posterior en SWAT.

Luego, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés), empleando el mismo conjunto de datos utilizado en el análisis de correlación. Esta técnica estadística transforma variables potencialmente correlacionadas en un conjunto de componentes principales ortogonales, con el propósito de reducir la dimensionalidad, identificar patrones en los datos y facilitar la agrupación de variables con comportamientos similares. Además, se utilizó como herramienta para

seleccionar aquellas variables más representativas para las siguientes etapas del análisis, como la clasificación mediante agrupamiento.

En el marco del PCA, se analizaron las contribuciones de cada componente principal (PC), los porcentajes de varianza explicada y las cargas asociadas a cada variable, con el fin de interpretar su influencia relativa dentro de cada componente.

Con base en las variables seleccionadas, se desarrolló un análisis de agrupamiento mediante el algoritmo K-Means. Este método estadístico permite agrupar observaciones según la similitud de sus características, en este caso propiedades texturales o hidráulicas, contribuyendo a la identificación de zonas con comportamientos edáficos e hidrológicos semejantes, relevantes para la adecuada parametrización del modelo SWAT. La calidad del agrupamiento fue evaluada mediante el índice de *Silhouette*, que cuantifica el grado de pertenencia de cada observación a su grupo asignado. Valores cercanos a 1 indican una clasificación robusta, mientras que valores próximos a cero o negativos reflejan ambigüedad o errores de asignación (Zornoza *et al.*, 2008).

Finalmente, se implementó un código en R para aplicar el procedimiento en todos los estratos, con el objetivo de identificar patrones de similitud vertical. Esto permitió consolidar las unidades en tipos de suelo homogéneos. Se optó por conservar únicamente aquellos suelos cuya cobertura alcanzaba al menos el 1 % de la cuenca (aproximadamente 5700 hectáreas). Las unidades que no cumplían con este umbral fueron reasignadas al tipo dominante más cercano mediante un análisis de proximidad espacial. Del mismo modo, los vacíos correspondientes a cuerpos de agua fueron asociados al suelo predominante más próximo.

Para ingresar los tipos de suelos en ArcSWAT, primero fue necesario extraer la información de cada tipo de suelo a lo largo de todos los estratos de profundidad definidos. Para cada uno, se especificó el espesor del estrato, la densidad aparente (BulkD), la capacidad de agua disponible (SOL\_AWC), la conductividad hidráulica saturada (SOL\_K) y las fracciones texturales de arena, limo y arcilla (%Arena, %Limo y %Arcilla), todos obtenidos desde la base de datos CLSoilMaps. Además, se determinó el grupo hidrológico y la textura de cada suelo utilizando la calculadora de suelos de *Agricultural Technology Center Pvt. Ltd.* Este procedimiento se repitió para cada uno de los 19 tipos de suelo definidos mediante la metodología descrita previamente. Una vez generada la base completa,

se elaboró una tabla de correspondencia para asociar y reclasificar los tipos de suelo creados a los códigos requeridos por ArcSWAT. Finalmente, los suelos fueron incorporados al modelo reemplazando la base de datos por defecto de SWAT con la base creada en este estudio, garantizando así que las simulaciones utilizaran parámetros representativos de las condiciones reales de la cuenca.

### 3.3.3 Información fluviométrica

Para el proceso de calibración y validación del modelo hidrológico, se seleccionaron seis estaciones fluviométricas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA). Aunque la red hidrométrica en la cuenca del río Maule cuenta con más puntos de monitoreo, muchas estaciones fueron descartadas por ubicarse en sectores influenciados por infraestructuras hidráulicas como embalses, lagunas, centrales hidroeléctricas de pasada o bocatomas. Estas estructuras alteran significativamente el régimen natural del caudal, impidiendo que las series registradas reflejen fielmente las condiciones hidrológicas del tramo. Por esta razón, no resultan adecuadas para su uso en la calibración del modelo.

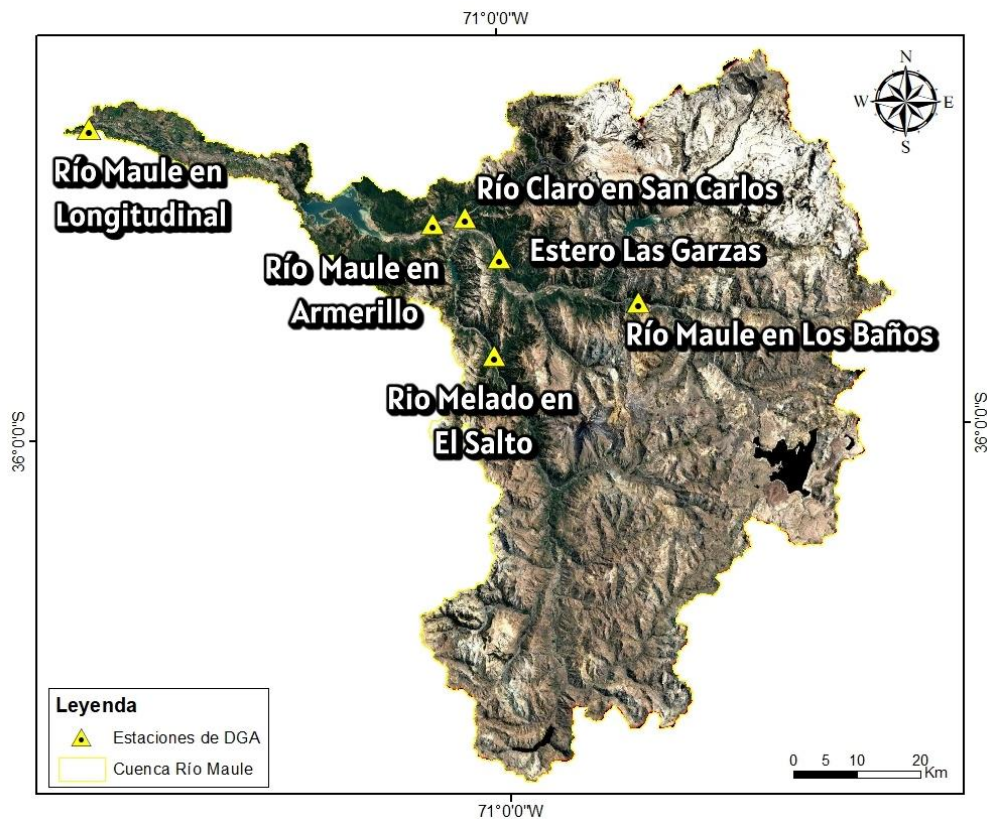


Figura 3.4: Estaciones fluviométricas utilizadas en el estudio

Las seis estaciones consideradas fueron: Río Maule en Longitudinal (Código BNA: 07322001-7), Río Maule en Armerillo (07321002-K), Río Claro en San Carlos (07320003-2), Estero Las Garzas (07308001-0), Río Melado en El Salto (07317005-2) y Río Maule en Los Baños (07303000-5) (Figura 3.4). De estas estaciones se extrajeron registros diarios de caudal correspondientes al periodo comprendido entre los años 2000 y 2024. Al analizar la disponibilidad de datos, se observó que todas contaban con una cobertura superior al 77% a lo largo del periodo, lo cual permitió avanzar con confianza en los análisis. No obstante, se identificó una ausencia generalizada de información en los primeros años (2000–2003), con excepción de la estación Río Maule en Longitudinal, por lo que dicho intervalo fue excluido de los procesos de calibración y validación.

Dado que el caudal representa directamente la respuesta del modelo, no se consideró necesario aplicar técnicas de completación o imputación de datos. En consecuencia, se trabajó únicamente con las series observadas disponibles. El catastro completo de estaciones utilizadas en este estudio, junto con su cobertura de datos y ubicación geográfica, se presenta en el Anexo 3.3.

#### **3.3.4 Extracciones de agua**

El modelo SWAT permite incorporar extracciones de agua de forma mensual a nivel de subcuenca, lo cual resulta fundamental para representar correctamente la demanda hídrica en la cuenca modelada. Para ello, fue necesario identificar y caracterizar los derechos de aprovechamiento de aguas registrados oficialmente, información que fue obtenida desde la plataforma de la Dirección General de Aguas (DGA), específicamente desde la sección "Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA". Esta base de datos incluye derechos originales constituidos, derechos catastrados, y solicitudes aprobadas que abarcan traslados, cambios de punto de captación y abastecimiento, así como transferencias informadas por los titulares, conforme al artículo 122 del Código de Aguas. La información fue recopilada con fecha de corte al 30 de junio de 2025. El archivo descargado contiene la localización geográfica (coordenadas) de cada derecho, lo que permitió determinar su ubicación dentro de las subcuencas definidas por el modelo SWAT. Adicionalmente, se consideró la naturaleza del origen del recurso según la clasificación entregada por la DGA, distinguiéndose entre derechos de agua superficial, superficial y corriente, y subterránea. Para efectos de modelación, estas categorías se agruparon en dos tipos principales: superficial y subterránea, ya

que su ingreso al modelo debe realizarse por vías distintas, ajustadas a las especificaciones de captación que representa cada tipo.

### **3.3.5 Caudales afluentes de embalses**

Para representar adecuadamente la intervención de la Laguna del Maule, Laguna La Invernada, embalse El Melado y embalse Colbún en el modelo hidrológico, fue necesario incorporar los caudales afluentes desde estas infraestructuras. Estos datos fueron obtenidos desde el portal del Coordinador Eléctrico Nacional, entidad que desde la unificación del Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) gestiona el sistema eléctrico nacional. La información utilizada corresponde a la sección “Estadística de Caudales – Cálculos de Potencia” disponible su sitio web, considerando registros anuales del caudal afluente y turbinado, fundamentales para caracterizar la dinámica de los afluentes de los embalses dentro de la cuenca modelada.

### **3.3.6 Análisis de consistencia**

Para asegurar la calidad y confiabilidad de los datos hidrológicos utilizados en la modelación, se realizó un análisis de consistencia sobre las series de caudales medios diarios correspondientes a las estaciones fluviométricas seleccionadas. Una serie se considera consistente cuando sus datos mantienen una relación proporcional y estable a lo largo del tiempo en comparación con una serie de referencia considerada representativa del comportamiento general de la cuenca (Chang & Lee, 1974). Para esta verificación, se empleó el método de la curva de doble masa acumulada, técnica ampliamente utilizada para identificar cambios en la relación entre estaciones debido a errores sistemáticos, modificaciones en las condiciones de medición o alteraciones en el régimen hidrológico.

Como serie patrón se seleccionó la estación “Río Maule en Longitudinal” (Código BNA: 07322001-7), ya que presenta una cobertura de datos del 94.22% durante el período de análisis, lo que la convierte en un punto de referencia robusto dentro del sistema hidrológico de la cuenca. A partir de esta estación, se compararon las tendencias acumuladas con el resto de las estaciones para detectar posibles inconsistencias. Los resultados obtenidos de este análisis, junto con los gráficos correspondientes de las curvas de doble masa para cada estación, se presentan en el Anexo 3.3.1.

### 3.4 Softwares de modelación

#### 3.4.1 ArcSWAT

ArcSWAT corresponde a una interfaz gráfica desarrollada para integrar el modelo SWAT dentro del entorno de trabajo de ArcGIS, facilitando la preparación de datos geoespaciales y la configuración de simulaciones hidrológicas. A través de esta herramienta es posible llevar a cabo la delimitación automática de cuencas, generar redes de drenaje, definir subcuencas y construir Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en función de la combinación entre uso del suelo, tipos de suelo y pendiente.

Para su funcionamiento, ArcSWAT requiere diversos datos de entrada que representan las características fisiográficas y climáticas del área de estudio. Entre estos se incluyen un Modelo Digital de Elevación (DEM), mapas de uso del suelo y tipos de suelo, así como registros climáticos diarios de temperatura y precipitación, los cuales permiten simular de forma detallada los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca modelada.

Con el objetivo de evaluar el impacto que generan los cambios de uso de suelo sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Maule en Longitudinal, se implementaron tres modelos SWAT independientes. Todos ellos compartieron una configuración común en cuanto a topografía, delimitación de cuenca y red de drenaje (a partir del mismo Modelo Digital de Elevación), además de utilizar la misma caracterización edáfica y base meteorológica. La principal diferencia entre los modelos correspondió al mapa de uso de suelo empleado en cada uno, correspondiente a los años 1998, 2010 y 2020, como se detalla en la sección 3.3.2.2.

A partir del DEM y la configuración común, se subdividió la cuenca en 78 subcuencas. No obstante, el número de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) varió en función del nivel de detalle y la distribución espacial de los usos de suelo en cada año. En concreto, el modelo asociado al año 1998 generó 612 HRU, el correspondiente a 2010 generó 656 HRU, mientras que el modelo para el año 2020 generó 689 HRU. Estas variaciones responden a las diferencias en la heterogeneidad espacial de los mapas de uso de suelo utilizados: a medida que el mapa incorpora una mayor diversidad de

coberturas o fragmentación del territorio, se incrementan las combinaciones únicas de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente que determinan la conformación de las HRU.

Cada uno de los tres modelos fue simulado de forma individual dentro de la interfaz de ArcSWAT, y tras la ejecución se extrajeron las carpetas “TxtInOut” correspondientes, las cuales contienen los archivos de entrada y salida necesarios para introducir dinámicamente los cambios de uso de suelo en el tiempo. Este procesamiento fue realizado mediante la herramienta desarrollada por Nguyen (2020), la cual permite modificar la cobertura del suelo en el modelo mediante dos métodos: interpolando linealmente entre los años disponibles o manteniendo constante el uso de suelo durante cada intervalo. Con los usos de suelo procesados, se continuó con la etapa de calibración y validación del modelo, como se describe en la sección siguiente.

### **3.5 Evolución espacio temporal del uso de suelo**

Para incorporar de manera adecuada la evolución espacio temporal del uso de suelo en la cuenca del río Maule entre los años 1998, 2010 y 2020, se empleó una herramienta desarrollada por Nguyen (2020), la cual permite trabajar con múltiples escenarios de cobertura en modelos SWAT. Esta herramienta, implementada en lenguaje R, facilita la compilación y procesamiento de los archivos contenidos en las carpetas “TxtInOut” generadas por cada modelo estático previamente simulado para los distintos años considerados. A partir de dicha información, se identifican y gestionan las HRU que han sido modificadas o creadas entre un año y otro, y se genera un conjunto de archivos consistentes que permiten representar la evolución del paisaje de forma dinámica en el tiempo.

Una de las principales ventajas de esta herramienta es que ofrece dos enfoques para representar temporalmente los cambios en la cobertura del suelo. Por un lado, permite aplicar una interpolación lineal de las fracciones de HRU entre años conocidos, lo cual permite modelar transiciones progresivas en el uso del territorio, como procesos de urbanización o expansión agrícola gradual. Por otro lado, también es posible optar por una representación discreta, en la cual el uso de suelo se mantiene constante hasta el año en que se dispone de nueva información, simulando así los cambios como eventos abruptos.

En el presente estudio, se implementaron ambas metodologías con el fin de evaluar cómo varía la respuesta hidrológica de la cuenca bajo dos supuestos distintos de evolución territorial: una trayectoria gradual y continua entre 1998, 2010 y 2020, y una alternativa en la que los cambios se consideran instantáneos entre esos hitos temporales. Esta comparación permite explorar la sensibilidad del modelo frente a la representación de los cambios de uso de suelo y su efecto sobre las variables hidrológicas simuladas.

### 3.6 Calibración y validación

La calibración y validación del modelo se realizó utilizando el software SWAT-CUP en su versión *Premium* (versión 6.2), ajustando los parámetros mediante el método de optimización SPE.

#### 3.6.1 SWAT-CUP

Para la calibración del modelo SWAT implementado en esta investigación, se utilizó el software SWAT-CUP Premium en su versión 6.2, una herramienta diseñada específicamente para ajustar, validar y analizar la sensibilidad e incertidumbre en modelos hidrológicos generados con SWAT.

En particular, se empleó el método de estimación de parámetros conocido como SPE (*SWAT Parameter Estimator*), que consiste en ajustar iterativamente los parámetros definidos dentro de un rango establecido, con el objetivo de minimizar la discrepancia entre las series observadas y simuladas. Además del ajuste automático, este proceso proporciona indicadores útiles como el 95% de incertidumbre de predicción (95PPU), el p-factor (que indica el porcentaje de observaciones cubiertas por el rango simulado) y el r-factor (que mide el ancho relativo del intervalo de predicción).

La calibración se enfocó en parámetros que afectan el comportamiento hidrológico de la cuenca, como los vinculados al escurrimiento, la infiltración, la capacidad de retención de agua y la transmisión subterránea, los cuales fueron definidos a nivel de subcuenca o HRU según su influencia en el sistema. Para guiar el proceso, se consideraron criterios metodológicos propuestos por Abbaspour *et al.* (2015), quienes documentan recomendaciones para la calibración de caudales y la selección de parámetros adecuados en diversos escenarios de modelación, los cuales fueron

esenciales junto a otros parámetros por presentar relación física con los sugeridos por Abbaspour. La Tabla 3.5 presenta el detalle de los parámetros considerados en el proceso de calibración.

**Tabla 3.5: Parámetros calibrados en SWAT-CUP-Premium**

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango de variación</b>	<b>Escala de aplicación</b>
T-LAPS	Gradiente térmico adiabático	mm/1000 m	-8 a -4	Cuenca
P-LAPS	Gradiente de precipitación	°C/1000 m	0 a 100	
TIMP	Coefficiente de atenuación térmica de la nieve	-	0 a 1	
SMFMN	Mínima tasa de derretimiento de nieve	mm/°C- día	0 a 10	
SMFMX	Máxima tasa de derretimiento de nieve	mm/°C- día	0 a 10	
SMTMP	Temperatura de derretimiento de nieve	°C	-5 a 5	
SFTMP	Temperatura de caída de nieve	°C	-5 a 5	
SURLAG	Retraso de superficie	días	1 a 12	
GW_REVAP	Capacidad de evaporación subterránea	-	0.02 a 0.2	Subcuenca
REVAPMN	Umbral de profundidad en el acuífero superficial para que ocurra percolación al acuífero profundo	mm	0 a 1000	
RCHRG_DP	Fracción que percola en el acuífero profundo	-	0.01 a 0.75	
GW_DELAY	Tiempo de retardo del agua subterránea	días	0 a 500	
GWQMN	Profundidad de agua en el acuífero	mm	0 a 5000	
ALPHA_BF	Coefficiente de recesión del flujo base	días	0 a 1	Subcuenca
GWHT	Altura inicial del nivel freático	m	0 a 25	
DEEPST	Profundidad inicial del agua en el acuífero profundo	mm	0 a 10000	

SHALLST	Profundidad inicial del agua en el acuífero superficial	mm	0 a 5000	
GW_SPYLD	Rendimiento específico del acuífero superficial	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0 a 0.4	
ALPHA_BF_D	Factor alfa de escorrentía base para el acuífero profundo	días	0 a 1	
SLSUBBSN	Longitud promedio de la pendiente	m	10 a 150	HRU
HRU_SLP	Pendiente promedio del área de la HRU	%	0 a 1	
OV_N	Coefficiente de Manning	-	0.2 a 0.8	
CN2	Curva número	-	35 a 98	
ESCO	Coefficiente de evaporación del suelo	-	0 a 1	
EPCO	Factor de compensación para la absorción de agua por las plantas	-	0 a 1	
CANMX	Máximo almacenamiento del dosel	mm	0 a 100	
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada	mm/hr	0 a 208	Capa de suelo
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible	mm agua/ mm suelo	0.08 a 0.16	

### 3.6.2 Periodos de calibración y validación

Se trabajó exclusivamente con series de caudales observados diarios, considerando todos los valores disponibles, excluyendo únicamente aquellos clasificados como NA. Las estaciones utilizadas corresponden a las seis ya mencionadas en el apartado 3.3.3.

Para la segmentación temporal del análisis, se definieron dos periodos diferenciados: uno para la calibración y otro para la validación. Estos fueron seleccionados procurando que el promedio y la desviación estándar de los caudales fueran similares entre ambos, considerando además la duración de cada intervalo.

Se aplicó un Test t de Welch para muestras independientes, con el objetivo de evaluar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los caudales medios diarios registrados durante el periodo de calibración (2010–2016) y el de validación (2017–2019). Los resultados de la comparación de medias se encuentran en el Anexo 3.3.

El periodo de calibración abarca desde el año 2010 hasta 2016, mientras que el periodo de validación considera los años 2017 a 2019. La duración del periodo de validación se encuentra limitada por la disponibilidad de datos climáticos (precipitación y temperatura), los cuales solo se encuentran disponibles hasta abril del año 2020.

En la Tabla 3.4 el resumen estadístico de los caudales observados diarios correspondientes a los periodos definidos.

**Tabla 3.4: Análisis estadístico para datos diarios en estaciones trabajadas**

Estación	Media		Desviación Estándar	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Río Melado en El Salto	63.18	39.56	76.03	67.41
Río Maule en Los Baños	36.44	40.09	40.00	55.00
Estero Las Garzas	2.15	2.28	2.60	2.49
Río Maule en Armerillo	11.23	10.63	26.15	29.13
Río Claro en San Carlos	15.73	13.67	7.98	5.67
Río Maule en Longitudinal	95.74	88.90	110.0	105.0

### 3.6.3 Parámetros Estadísticos

Para evaluar el desempeño del modelo calibrado, se utilizaron cinco indicadores estadísticos, basados principalmente en las recomendaciones metodológicas de Moriasi *et al.* (2007) y Gupta *et al.* (2009), quienes proponen el uso combinado de métricas cuantitativas y herramientas gráficas para calificar la calidad de las simulaciones hidrológicas.

Los estadísticos aplicados fueron: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS), la proporción del error cuadrático medio respecto a la desviación estándar observada (RSR), y el índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE). Estos permiten evaluar distintos aspectos del ajuste entre caudales observados y simulados, como la correlación, el sesgo promedio, la variabilidad relativa y la eficiencia general del modelo.

**Coefficiente de determinación ( $R^2$ ):** Cuantifica la proporción de la varianza de los datos observados explicada por el modelo. Su valor varía entre 0 y 1, siendo óptimo mientras más se aproxime a 1.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right)^2 \quad (3.1)$$

**Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE):** mide qué tan bien los valores simulados reproducen los valores observados, comparando los errores de predicción con la variabilidad natural de los datos. Un valor cercano a 1 indica un ajuste excelente.

$$NSE = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \right) \quad (3.2)$$

**Percent Bias (PBIAS):** expresa la tendencia sistemática del modelo a sobrestimar o subestimar los valores observados. Un valor de PBIAS igual a 0 indica ausencia de sesgo.

$$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \quad (3.3)$$

**Root Mean Square Error to Standard Deviation Ratio (RSR):** corresponde a la razón entre el error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar de los datos observados. A menor valor, mayor calidad del ajuste.

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (3.4)$$

**Kling-Gupta Efficiency (KGE):** fue propuesto por Gupta *et al.* (2009) e integra en un solo valor la correlación lineal ( $r$ ), la relación entre desviaciones estándar ( $\alpha$ ) y la razón entre promedios ( $\beta$ ). Permite una evaluación más equilibrada que el NSE.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (3.5)$$

Finalmente, la Tabla 3.6 resume los rangos de desempeño aceptados para cada uno de estos indicadores, clasificando el ajuste del modelo como muy bueno, bueno, satisfactorio o insatisfactorio, según los criterios propuestos por Moriasi *et al.* (2007). Adicionalmente, se considera el criterio de Van Liew *et al.* (2005), que sugiere valores de PBIAS con desempeño bueno menor a  $\pm 20\%$  y satisfactorio entre  $\pm 20\%$  y  $\pm 40\%$ .

**Tabla 3.4: Rango de desempeño de indicadores de bondad de ajuste**

Desempeño	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	RSR	KGE
<b>Muy bueno</b>	> 0.75	> 0.75	< $\pm 10\%$	< 0.50	> 0.75
<b>Bueno</b>	0.60 - 0.70	0.65 - 0.75	$\pm 10\%$ - $\pm 15\%$	0.50 - 0.60	0.60 - 0.75
<b>Satisfactorio</b>	0.50 - 0.60	0.50 - 0.65	$\pm 15\%$ - $\pm 25\%$	0.60 - 0.70	0.40 - 0.60
<b>Insatisfactorio</b>	< 0.50	< 0.50	> $\pm 25\%$	> 0.70	< 0.40

Fuente: Moriasi *et al.* (2007)

### 3.7 Comparación de resultados entre cambio dinámico y estacionario de uso de suelo

Para cumplir con el tercer objetivo específico, se compararon los resultados obtenidos a partir de los escenarios de modelación que utilizan enfoques estacionario y dinámico de cambio de uso de suelo. Esta comparación se abordó desde dos enfoques complementarios:

- **Análisis estadístico:** se aplicaron pruebas de hipótesis como el test de Student para muestras pareadas, Kolmogorov-Smirnov y Chi cuadrado, con el fin de identificar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los caudales diarios simulados por ambos enfoques, a

nivel de cada estación hidrométrica, con un umbral definido de *p-value* menor a 0.05 para diferencias significativas.

- **Evaluación del desempeño del modelo:** se comparó la capacidad de reproducción de los caudales bajo cada escenario mediante los estadísticos previamente obtenidos. Adicionalmente, se consideraron aspectos cualitativos como la eficiencia computacional y la coherencia en la distribución espacial de los caudales simulados.

### 3.8 Conclusiones

En este capítulo se expusieron los métodos y materiales utilizados para el desarrollo del estudio, incluyendo la descripción del área de estudio, las fuentes de información y los softwares aplicados. Se destaca la construcción de la base de datos de suelos mediante técnicas de análisis multivariado (PCA, K-Means e índice de Silhouette), lo que permitió una caracterización más representativa de la cuenca del Río Maule en Longitudinal. Además, se detalló la calibración y validación del modelo SWAT con SWAT-CUP, y el enfoque adoptado para comparar escenarios de cambio de uso de suelo estacionario y dinámico mediante indicadores estadísticos y pruebas de hipótesis.

## 4 CAPÍTULO 4: RESULTADOS

### 4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos a partir del desarrollo metodológico expuesto en el capítulo anterior. En primera instancia, se describen los tipos de suelo generados mediante la combinación de información edáfica y herramientas estadísticas. Posteriormente, se exponen los resultados de calibración y validación hidrológica del modelo en su versión diaria, utilizando la herramienta SWAT-CUP Premium. Para ello, se evalúa el desempeño del modelo bajo dos enfoques distintos de representación del uso del suelo; el primero con interpolación temporal entre los años disponibles, y el segundo con el uso estacionario de la cobertura en los años sin información.

### 4.2 Tipos de suelo

El análisis de correlación inicial, gracias a su matriz de correlación (Figura 4.1) permitió identificar relaciones lineales significativas entre variables edáficas clave para el comportamiento hidrológico de la cuenca del Maule. Se observó que la capacidad de campo (FC), la humedad media ( $AvMoist$ ), la capacidad de agua disponible (AWC) y la porosidad total ( $\Theta_s$ ) presentan correlaciones positivas fuertes entre sí (valores cercanos a 0.4–0.6), reflejando su estrecha vinculación con la capacidad de retención hídrica. En sentido opuesto, la densidad aparente (BulkD) mostró correlaciones negativas con estas variables (hasta -0.55), indicando que suelos más compactos tienden a retener menos agua. También se detectaron correlaciones positivas entre el contenido de arcilla, el punto de marchitez permanente (PWP) y la humedad residual ( $\Theta_r$ ), lo que confirma que las texturas finas influyen en la retención de humedad a bajos niveles de disponibilidad. El contenido de arena, por su parte, presentó correlaciones negativas con la mayoría de las variables asociadas a la retención de agua, coherente con el comportamiento esperado en suelos arenosos.

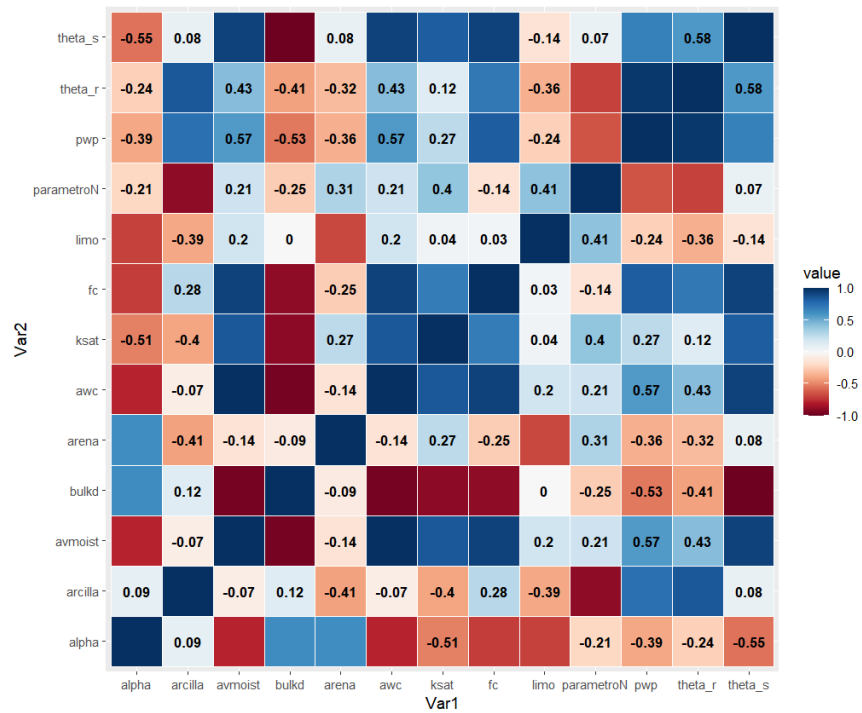


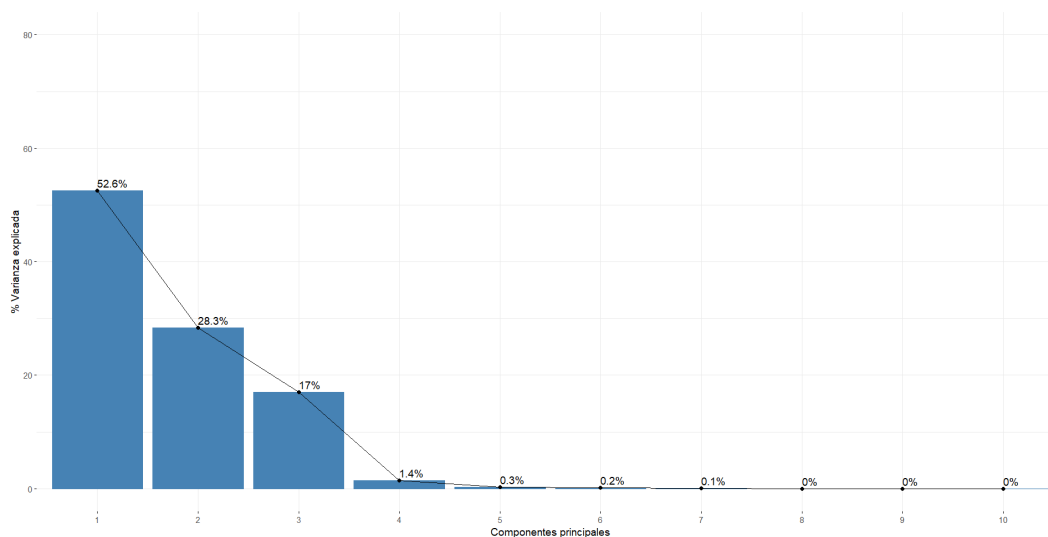
Figura 4.1: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el estrato de 0 a 5 cm

Posteriormente, el Análisis de Componentes Principales (PCA) permitió identificar las variables más representativas de la variabilidad edáfica. La Tabla 4.1 muestra las contribuciones de cada variable a los cinco primeros componentes principales para el primer estrato (0–5 cm). En PC1 destacan FC (14.34 %), AvMoist y AWC (ambas con 13.8 %) y  $\theta_s$  (13.28 %), todas ellas relacionadas con la capacidad de retención de agua. En PC2, el contenido de arcilla (25.86 %), el parámetro n (24.39 %) y la humedad residual (16.03 %) dominan el componente, reflejando propiedades texturales y estructurales. PC3 está liderado por %Arena (38.68 %) y %Limo (34.39 %), asociándose a la granulometría.

**Tabla 4.1: Resultados de contribuciones de cada variable para cada Componente Principal (PC) para el primer estrato de 0 a 5 cm**

Parámetro	Componente Principal 1 (PC1) (%)	Componente Principal 2 (PC2) (%)	Componente Principal 3 (PC3) (%)	Componente Principal 4 (PC4) (%)	Componente Principal 5 (PC5) (%)
Arena	0.62	2.61	38.68	0.47	11.04
Limo	0.1	6.1	34.39	2.36	1.77
$\alpha$	8.13	1.69	16.37	0.01	17.91
KSat	8.77	6.34	4.21	29.23	40.62
$\theta_s$	13.28	0.08	3.63	2.75	0.04
BulkD	12.84	1.74	2.3	1.92	1.1
Arcilla	0.34	25.86	0.25	7.64	6.3
$\theta_r$	5.78	16.03	0.12	4.28	3.45
Npar	0	24.39	0.03	50.46	13.21
PWP	8.19	11.85	0	0.69	0.33
AvMoist	13.8	1.42	0	0.08	1.89
AWC	13.8	1.42	0	0.08	1.88
FC	14.34	0.48	0	0.03	0.47

La Figura 4.2 confirma que los tres primeros componentes explican el 97.9 % de la variabilidad total: PC1 con un 52.6 %, PC2 con un 28.3 % y PC3 con un 17 %. Esto indica que la estructura de variabilidad de los datos se concentra en pocos ejes, lo que facilita la reducción de dimensionalidad sin pérdida significativa de información.



**Figura 4.2: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 0 a 5 cm**

En la Tabla 4.2, las cargas de cada variable permiten interpretar el significado físico de los componentes principales. En el Componente Principal 1 (PC1), destacan cargas positivas en FC, AWC, AvMoist y  $\theta_s$ , y negativa en BulkD, lo que representa un gradiente asociado a la capacidad de retención de agua vs. compactación del suelo. En el PC2, la arcilla,  $\theta_r$ , y PWP presentan cargas negativas, mientras que el parámetro n es positivo, diferenciando suelos arcillosos con alta retención residual de suelos más porosos y con mejor conductividad. En PC3, la arena y  $\alpha$  muestran cargas negativas y el limo positiva, reflejando un eje de granulometría, que distingue texturas gruesas (arenosas) de intermedias (limosas).

**Tabla 4.2: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 0 a 5 cm**

<b>Parámetro</b>	<b>Componente Principal 1 (PC1)</b>	<b>Componente Principal 2 (PC2)</b>	<b>Componente Principal 3 (PC3)</b>
Alpha	-0.285	-0.130	-0.404
Arcilla	0.0584	-0.508	0.0502
Arena	-0.078	0.161	-0.621
AvMoist	0.371	0.119	0.005
AWC	0.371	0.119	0.005
BulkD	-0.35	-0.131	0.15
FC	0.378	-0.069	0.0048
KSat	0.296	0.251	-0.205
Limo	0.0323	0.246	0.58
Npar	-0.004	0.49	-0.017
PWP	0.286	-0.344	0.0022
$\theta_r$	0.24	-0.4	-0.035
$\theta_s$	0.36	0.027	-0.19

A modo de síntesis, la Tabla 4.3 resume las variables dominantes (con contribución superior al 10%) en cada componente, junto con su carga y el porcentaje de varianza explicado.

Tabla 4.3: Resumen para PC1 (a), PC2 (b) y PC3 (c) en el estrato de 0 a 5 cm

(a)

% Varianza	Parámetro	Contribución al PC1	Carga
52.60%	FC	14.34%	0.379
	AvMoist	13.80%	0.371
	AWC	13.80%	0.371
	$\theta_s$	13.28%	0.364
	BulkD	12.84%	-0.358

(b)

% Varianza	Parámetro	Contribución al PC2	Carga
28.30%	Arcilla	25.86%	-0.508
	Npar	24.39%	0.494
	$\theta_r$	16.03%	-0.400
	PWP	11.85%	-0.344

(c)

% Varianza	Parámetro	Contribución al PC3	Carga
17%	Arena	38.68%	-0.622
	Limo	34.39%	0.586
	$\alpha$	16.37%	-0.405

La interpretación física de los componentes principales permitió comprender mejor los patrones que rigen la variabilidad de las propiedades edáficas en la cuenca. El primer componente principal (PC1), que explica un 52.6% de la varianza total, está conformado principalmente por variables asociadas a la capacidad de retención de agua del suelo, como AWC, FC, AvMoist y  $\theta_s$ , y presenta una relación inversa con la densidad aparente (BulkD). Esta configuración sugiere que el PC1 representa una dimensión que contrasta suelos con alta porosidad y buena capacidad hídrica frente a suelos más compactos y menos retenedores de agua. El segundo componente (PC2), que explica el 28.3% de la

varianza, se encuentra dominado por parámetros como el contenido de arcilla, PWP y  $\theta_r$ , así como el parámetro  $n$ , lo que permite interpretar esta dimensión como un reflejo de la relación entre textura fina y retención de humedad residual en suelos arcillosos. Por su parte, el tercer componente (PC3), con un 17% de varianza explicada, está influenciado por la proporción relativa de arena y limo, además del parámetro  $\alpha$ , lo cual representa principalmente la estructura granulométrica de los suelos, distinguiendo entre suelos más arenosos y limosos.

Con base en este análisis, se seleccionaron las variables más relevantes para cada componente y estrato. La Tabla 4.4 presenta un resumen de las variables seleccionadas, su interpretación física y su uso en el posterior análisis de agrupamiento. Si bien no varían mucho las variables escogidas y la interpretación física de cada componente principal entre los estratos, se exponen las tablas tipo resumen para cada estrato en el Anexo 4.2.

**Tabla 4.4: Variables relevantes, interpretación física y variable escogida por cada componente para el primer estrato de 0 a 5 cm**

<b>PC</b>	<b>% Varianza</b>	<b>Variables Relevantes</b>	<b>Interpretación Física</b>	<b>Variables escogidas para clustering</b>
PC1	52.60%	FC(+), AvMoist(+), AWC(+), $\theta_s$ (+), BulkD (-)	Capacidad hídrica vs. compactación: Suelos con alta retención de agua (porosidad) vs. suelos densos.	AWC
PC2	28.30%	%Arcilla (-), Npar (+), $\theta_r$ (-), PWP (-)	Textura vs. porosidad: Arcillosos (alta retención de agua residual) vs. suelos con alto parámetro “n” (orgánicos/porosos).	% ARCILLA
PC3	17.00%	%Arena (-), %Limo (+), $\alpha$ (-)	Granulometría: Suelos arenosos vs. limosos.	% ARENA

Luego de revisar los seis estratos de profundidad de CLSoilMaps, se determinó que las variables más estables y representativas a lo largo del perfil eran: AWC, %Arcilla y %Arena. Estas tres variables

fueron seleccionadas para realizar un análisis de agrupamiento, el cual se llevó a cabo mediante el algoritmo K-Means. Este método estadístico permite agrupar observaciones en función de la similitud entre sus características, como el contenido textural o hidráulico, facilitando la identificación de zonas con comportamiento edáfico e hidrológico similar, lo cual resulta clave para una adecuada parametrización en modelos como SWAT. La calidad de los grupos formados fue evaluada utilizando el índice de *Silhouette*, el cual cuantifica qué tan bien se ajusta cada observación al grupo que le corresponde. Valores cercanos a 1 indican una clasificación clara y coherente, mientras que valores próximos a cero o negativos reflejan asignaciones ambiguas o incorrectas (Zornoza *et al.*, 2008).

Mediante un código en R, se logró generar 455 grupos, de los cuales se filtraron aquellos que representaran menos del 1% del área total de la cuenca (57 km<sup>2</sup>). Esto resultó en 19 tipos de suelo principales. Los restantes (436) se reasignaron a los 19 tipos dominantes mediante análisis de proximidad espacial. Los vacíos, correspondientes a cuerpos de agua, también fueron asociados a los suelos predominantes más cercanos. Los 19 tipos de suelos tenían los parámetros de AWC, %Arena, %Arcilla y, por ende, se pudo calcular el %Limo. Además, con el shape de suelos ya definido se pudo extraer los valores medios para cada suelo de BulkD y Ksat de la base de datos de CLSoilMaps. En la Figura 4.3 se puede observar la base de datos de tipos de suelos obtenida y en la Tabla 4.5 el área correspondiente a cada tipo.

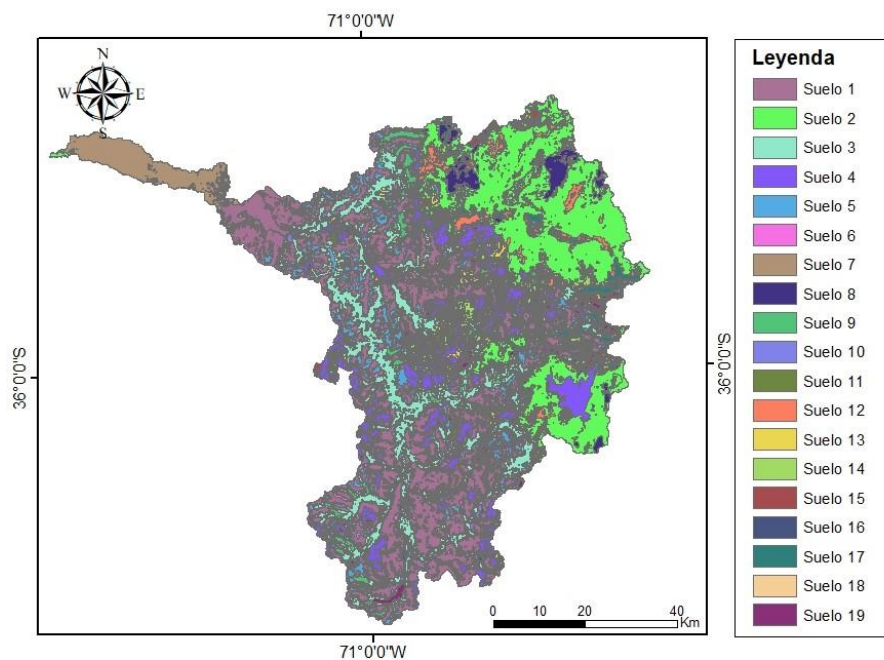


Figura 4.3: Tipos de suelo para la cuenca del Río Maule en Longitudinal

Tabla 4.5: Área de cubrimiento de cada tipo de suelo en porcentaje y en hectáreas

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Área total (%)</b>	<b>Área total (ha)</b>
Suelo 01	21.80	129691.24
Suelo 02	19.85	118043.75
Suelo 03	12.06	71744.13
Suelo 04	9.27	55155.31
Suelo 05	5.68	33771.72
Suelo 06	3.67	21849.43
Suelo 07	3.65	21682.63
Suelo 08	2.90	17253.17
Suelo 09	2.60	15454.86
Suelo 10	2.25	13390.73
Suelo 11	1.97	11727.99
Suelo 12	2.24	13342.24
Suelo 13	1.98	11758.95
Suelo 14	2.66	15835.71
Suelo 15	1.84	10922.02
Suelo 16	1.34	7996.78
Suelo 17	1.53	9078.30
Suelo 18	1.22	7277.01
Suelo 19	1.48	8803.31

El análisis de *clustering* con K-Means, aplicado a estas tres variables, produjo inicialmente 455 grupos, que fueron filtrados para conservar solo aquellos con más del 1 % de la superficie de la cuenca. El resultado final fueron 19 tipos de suelo, visualizados en la Figura 4.3. Los suelos 1 y 2 dominan gran parte del área baja y media, mientras que los de mayor contenido arenoso se concentran en áreas cercanas a cauces y zonas aluviales. La Tabla 4.5 muestra que el suelo 1 representa el 21.8 % del área (129.691 ha) y el suelo 2 el 19.85 % (118.043 ha), lo que significa que más del 40 % de la superficie de la cuenca está controlada por las propiedades de estos dos grupos.

### 4.3 Método 1: Modelación con usos de suelo estacionario

Se procesaron los datos de uso de suelo mediante la herramienta de Nguyen (2020), utilizando el método sin interpolación. Es decir, se mantuvo estacionaria la información de uso de suelo entre los años disponibles y sin cambios durante periodos intermedios (entre los años 1998, 2010 y 2020). Se generaron 777 HRU las cuales lograron combinar distintas características de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente.

#### 4.3.1 Resultados

Mediante SWAT-CUP-Premium se procedió a calibrar parámetros que regulan el flujo base y caudales peaks principalmente. Sin embargo, se calibraron parámetros que varían de la mano de ellos. Primero, fue necesario calibrar los parámetros de T-LAPS y P-LAPS para toda la cuenca, considerando bandas de elevación en algunas estaciones. Luego, fue necesario calibrar los parámetros de nieve, como TIMP, SMFMN, SMFMX, SMTMP y SFTMP. Teniendo calibrados los parámetros previamente mencionados para toda la cuenca, fue necesario comenzar a calibrar dependiendo de la necesidad de cada estación. Para calibrar los peaks, sobre o subestimados, fue necesario calibrar CN2, SOL\_AWC y ESCO; para el flujo base fue necesario calibrar GWQMN, GW\_REVAP y REVAPMN. De igual manera se calibraron parámetros extras a los recomendados por Abbaspour (2015), tales como: SURLAG, GW\_DELAY, RCHRG\_DP, ALPHA\_BF, GWHT, DEEPST, SHALLST, GW\_SPYLD, ALPHA\_BF\_D, SLSUBBSN, HRU\_SLP, OV\_N, EPCO, CANMW y SOL\_K. En el Anexo 4.3 se detalla los parámetros calibrados para cada modelo, según cada método. Los resultados de caudales observados vs. simulados obtenidos durante la calibración y validación del modelo se encuentran en los Anexos 4.4 y 4.5. En los siguientes apartados se presentan las métricas para todas las estaciones, pero los resultados gráficos solo de las estaciones Río Maule en Armerillo y Estero Las Garzas.

#### Calibración

Para el periodo 2010-2016 existe un total de 2556 días. Las estaciones fluviométricas utilizadas como puntos de calibración presentan un porcentaje de datos disponible que está entre 89% y 97% aproximadamente, esto se aprecia con exactitud en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Datos diarios disponibles por estación fluviométrica para el periodo de calibración

Estación fluviométrica	Cantidad de datos (2010-2016)	Porcentaje de datos (%)
Río Melado en El Salto	2436	95.31
Río Maule en Los Baños	2341	91.59
Estero Las Garzas	2392	93.58
Río Maule en Armerillo	2279	89.16
Río Claro en San Carlos	2488	97.34
Río Maule en Longitudinal	2476	96.87

En la Tabla 4.7 se puede observar el desempeño logrado por las estaciones en el periodo de calibración y con el método estacionario.

Tabla 4.7: Indicadores estadísticos para proceso de calibración con método estacionario

Estación fluviométrica	Indicador estadístico				
	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	RSR	KGE
Río Melado en El Salto	0.05	-0.11	11.3	1.06	0.12
Río Maule en Los Baños	0.07	-0.03	18.3	1.01	0.03
Estero Las Garzas	0.05	0.02	-12.2	0.99	0.00
Río Maule en Armerillo	0.00	-1.74	-212.2	1.66	-1.34
Río Claro en San Carlos	0.00	-0.15	14.5	1.07	-0.18
Río Maule en Longitudinal	0.00	-0.60	54.2	1.26	-0.27

Tal como se muestra en la Tabla 4.7, los resultados de la calibración diaria no fueron satisfactorios, a pesar de haber mostrado una leve mejora respecto a la modelación previa. En general, se observa un bajo desempeño del modelo en la mayoría de las estaciones. Por ejemplo, la estación Río Maule en Armerillo, ubicada aguas abajo de la confluencia de los principales ríos, presentó el peor ajuste con un PBIAS de -212.2%, indicando una fuerte subestimación del caudal base, junto con valores críticos en NSE (-1.74), KGE (-1.34) y RSR (1.66), que evidencian una representación deficiente del hidrograma. En contraste, la estación Estero Las Garzas tuvo el mejor desempeño relativo, con un PBIAS de -12.2%, un NSE levemente positivo (0.02) y un RSR de 0.99, aunque aún lejos de representar un buen ajuste.

El valor de PBIAS permitió identificar errores sistemáticos de sobre o subestimación en el flujo base, mientras que el NSE, RSR y KGE reflejan fallas tanto en la forma como en la magnitud del caudal simulado. La mayoría de los gráficos muestran una desconexión entre el caudal base observado y simulado, afectando también la reproducción de los picos. Esto podría explicarse por la influencia de embalses, extracciones y obras hidráulicas no representadas adecuadamente en el modelo, lo que resulta especialmente relevante en una cuenca con alta presión hídrica. Para visualizar esta diferencia, se comparan gráficamente los resultados entre Las Garzas y Armerillo, como ejemplos de la mejor y peor estación simulada, respectivamente (Figuras 4.4 y 4.5). Se puede observar que el Estero Las Garzas puede reproducir mejor la forma del hidrograma observado, pero con sobreestimación del caudal base, subestimación de los caudales *peaks* y un leve desplazamiento hacia la derecha. Por otro lado, Armerillo sobreestima el caudal observado totalmente y no capta bien los *peaks* del caudal.

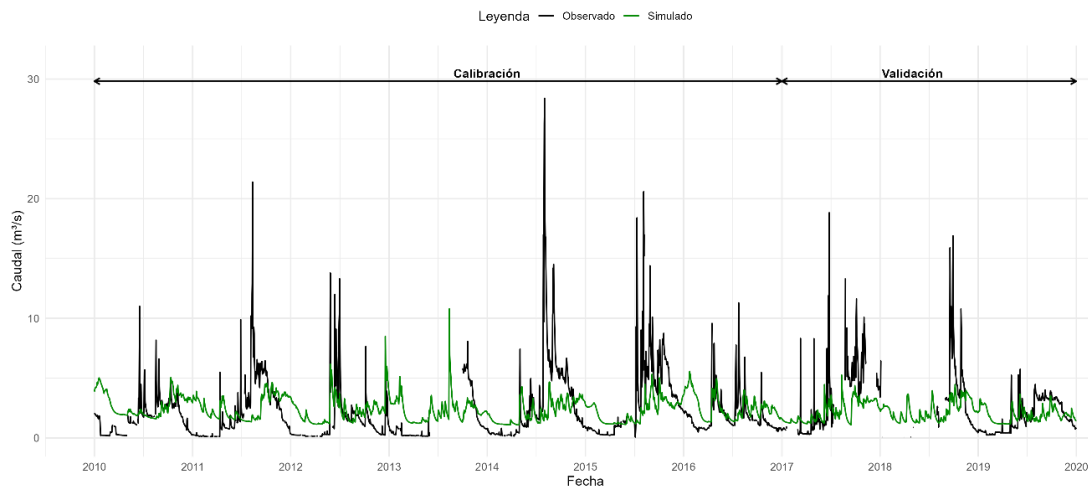


Figura 4.4: Resultados del período completo en estación Estero Las Garzas, método estacionario

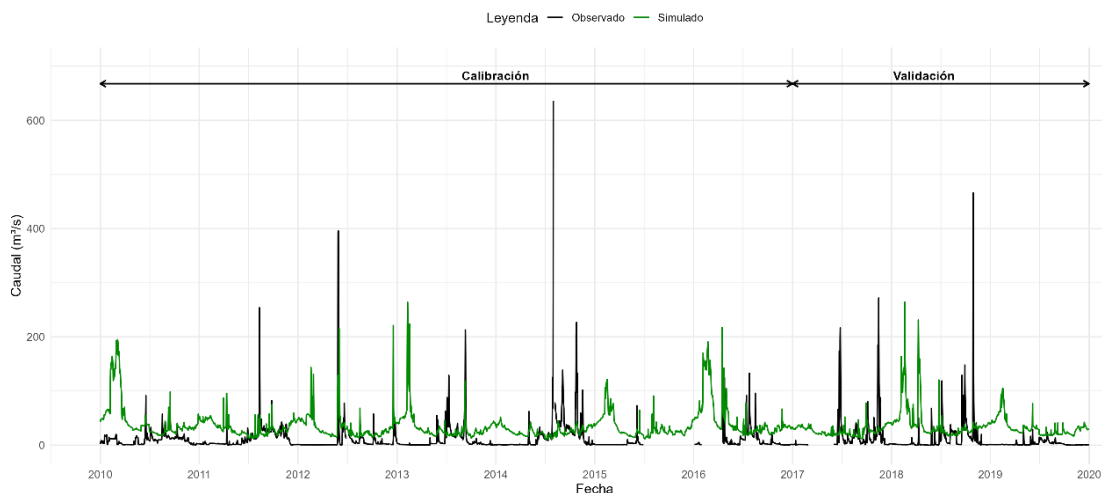


Figura 4.5: Resultados del período completo en estación Río Maule en Armerillo, método estacionario

## Validación

De manera similar a lo realizado en la calibración, en el Capítulo 3 se estableció el intervalo temporal destinado a la validación del modelo. Se optó por utilizar los años 2017 a 2019 como periodo de validación, con cantidad máxima de registros diarios para validar el modelo de 1095 días, considerando desde el 1 de enero de 2017 hasta el 31 de diciembre de 2019. Las estaciones fluviométricas utilizadas como puntos de calibración presentan un porcentaje de datos disponible que está entre 91% y 100% aproximadamente, esto se aprecia con exactitud en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8: Datos diarios disponibles por estación fluviométrica para el periodo de validación**

Estación fluviométrica	Cantidad de datos (2010-2016)	Porcentaje de datos (%)
Río Melado en El Salto	1095	100.00
Río Maule en Los Baños	1095	100.00
Estero Las Garzas	1085	99.09
Río Maule en Armerillo	1003	91.60
Río Claro en San Carlos	1033	94.34
Río Maule en Longitudinal	1071	97.80

En la Tabla 4.9 se puede observar el desempeño logrado por las estaciones en el periodo de validación y con el método estacionario.

**Tabla 4.9: Indicadores estadísticos para proceso de validación con método estacionario**

Estación fluviométrica	Indicador estadístico				
	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	RSR	KGE
Río Melado en El Salto	0.15	-0.21	-28.5	1.10	0.32
Río Maule en Los Baños	0.20	0.04	31.2	0.98	0.02
Estero Las Garzas	0.26	0.20	15.2	0.89	0.15
Río Maule en Armerillo	0.00	-1.42	-223.2	1.56	-1.43
Río Claro en San Carlos	0.06	0.04	2.3	0.98	0.00
Río Maule en Longitudinal	0.00	-0.60	54.0	1.27	-0.28

Durante el periodo de validación (2017–2019), se observa una leve mejora en algunas métricas respecto a la calibración, especialmente en el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el NSE, como es el caso del Estero Las Garzas (NSE = 0.20) y Río Maule en Los Baños (NSE = 0.04). Sin embargo, en general, los resultados siguen siendo insatisfactorios. El modelo continúa presentando altos niveles de sesgo en estaciones como Río Maule en Longitudinal (PBIAS = 54.0%) y Armerillo (PBIAS = -223.2%), lo que refleja una sobreestimación o subestimación significativa del caudal base. Además, el valor de KGE negativo o cercano a cero en varias estaciones indica una deficiente representación de la forma, variabilidad y magnitud del hidrograma. Esto se evidencia con mayor fuerza en las figuras 4.4 y 4.5 previamente presentados, los cuales siguen sin reproducir bien el comportamiento del caudal simulado con respecto al observado, manteniendo las diferencias gráficas de sobreestimación de caudal base y subestimación de caudales máximos. En resumen, aunque se evidencia una ligera mejora, el desempeño general del modelo aún está lejos de ser aceptable.

#### **4.4 Método 2: Modelación con interpolación temporal de los usos de suelo**

Se procesaron los datos de uso de suelo mediante la herramienta de Nguyen (2020), utilizando interpolación entre los años con información disponible. El código interpola linealmente la información disponible entre los años que existen datos de uso de suelo, asumiendo una evolución lineal entre los años con información.

##### **4.4.1 Resultados**

Al igual que con el método estacionario, se ajustaron los parámetros sensibles responsables de controlar caudales máximos y el flujo base. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para la calibración y luego los obtenidos para la validación, ambos con enfoque interpolado temporalmente.

##### **Calibración**

El total de datos utilizados en esta etapa fue el mismo indicado en el inciso 4.3.1.1. En la Tabla 4.10 se presentan los indicadores estadísticos obtenidos con el método dinámico de usos de suelo, con un desempeño que varía entre insatisfactorio y muy bueno. Las métricas muestran una mejora

significativa respecto a los resultados obtenidos en la calibración con el método estacionario, especialmente en estaciones como Estero Las Garzas (NSE = 0.58, KGE = 0.65, PBIAS = -2.6) y Río Melado en El Salto (NSE = 0.42, KGE = 0.47, PBIAS = 21.8). Estos valores reflejan una mejor representación del caudal simulado, tanto en su forma como en su magnitud y variabilidad.

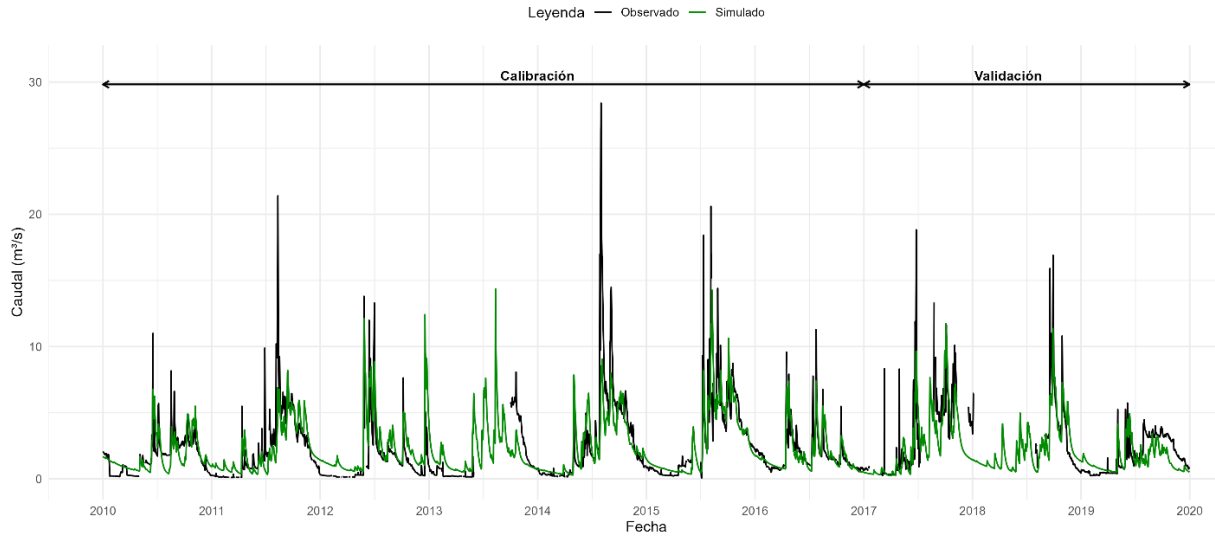
**Tabla 4.10: Indicadores estadísticos para proceso de calibración con método dinámico**

Estación fluviométrica	Indicador estadístico				
	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	RSR	KGE
Río Melado en El Salto	0.45	0.42	21.8	0.76	0.47
Río Maule en Los Baños	0.13	0.02	21.9	0.99	0.15
Estero Las Garzas	0.58	0.58	-2.6	0.65	0.65
Río Maule en Armerillo	0.22	-0.83	-181.7	1.35	-0.90
Río Claro en San Carlos	0.39	0.18	13.2	0.91	0.61
Río Maule en Longitudinal	0.13	-0.43	59.1	1.20	-0.04

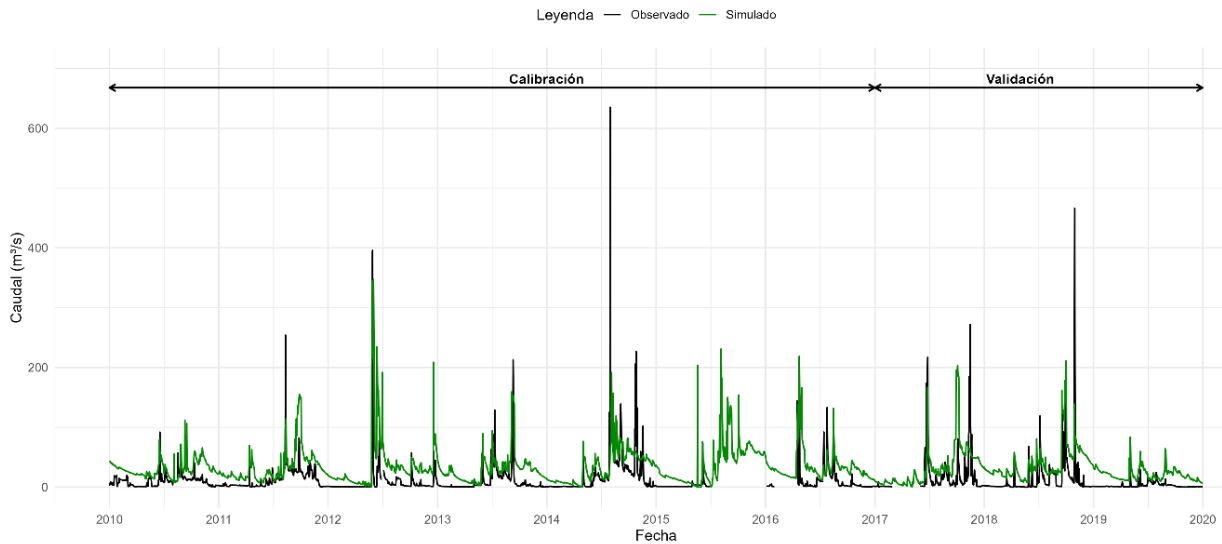
No obstante, persisten resultados deficientes en estaciones como Armerillo y Longitudinal, donde los valores negativos de NSE y KGE, junto con sesgos elevados, evidencian una capacidad limitada del modelo para representar adecuadamente los caudales en dichas zonas. En las Figuras 4.6 y 4.7 se presentan nuevamente las estaciones de Estero Las Garzas y Río Maule en Armerillo, esta vez bajo el enfoque dinámico. En comparación con las Figuras 4.4 y 4.5, correspondientes al método estacionario, se observan mejoras gráficas notorias.

En el caso de la estación Las Garzas, el modelo logra reproducir correctamente los caudales máximos, sin presentar desplazamiento, aunque se aprecia una ligera sobreestimación del caudal base. Por su parte, la estación de Armerillo muestra un mejor ajuste visual, reduciendo el desplazamiento detectado previamente; sin embargo, continúa sobreestimando el caudal base y presenta tanto subestimaciones como sobreestimaciones en algunos caudales máximos.

En síntesis, el uso del enfoque dinámico permitió mejorar la calibración del modelo en varias estaciones clave, aportando mayor solidez a la simulación hidrológica. Aun así, persisten sectores que requieren ajustes específicos o una representación más precisa de las condiciones hidrológicas locales.



**Figura 4.6: Resultados del período completo en estación Estero Las Garzas, método dinámico**



**Figura 4.7: Resultados del período completo en estación Río Maule en Armerillo, método dinámico**

## Validación

El total de datos utilizados para la validación con el método dinámico fue el mismo señalado en el inciso 4.2.2. En la Tabla 4.11 se presentan los indicadores estadísticos correspondientes a este proceso, donde se evidencia una mejora considerable respecto a la validación anterior. Si bien el desempeño general varía entre estaciones, en varios casos se lograron resultados satisfactorios o cercanos a estándares aceptables, destacando el avance en la representación del caudal simulado.

Tabla 4.11: Indicadores estadísticos para proceso de validación con método dinámico

Estación fluviométrica	Indicador estadístico				
	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	RSR	KGE
Río Melado en El Salto	0.57	0.41	-18.9	0.77	0.67
Río Maule en Los Baños	0.28	0.11	34.5	0.94	0.14
Estero Las Garzas	0.64	0.62	11.8	0.62	0.71
Río Maule en Armerillo	0.20	-0.64	-207.1	1.28	-1.14
Río Claro en San Carlos	0.46	0.21	0.5	0.89	0.63
Río Maule en Longitudinal	0.03	-0.68	59.7	1.30	-0.16

Particularmente, estaciones como Estero Las Garzas (NSE = 0.62, KGE = 0.71), Río Melado en El Salto (NSE = 0.41, KGE = 0.67) y Río Claro en San Carlos (NSE = 0.21, KGE = 0.63) presentaron un comportamiento muy favorable, con buena correlación entre caudales observados y simulados, además de un sesgo reducido, lo que indica una adecuada representación del hidrograma. Otras estaciones, como Los Baños, también mostraron mejoras relevantes, aunque sus métricas se mantuvieron levemente por debajo de los umbrales comúnmente aceptados. Por otro lado, en estaciones como Armerillo y Longitudinal, si bien persiste un desempeño deficiente, los valores actuales evidencian un acercamiento hacia resultados más estables.

Aunque los indicadores aún no alcanzan niveles satisfactorios, muestran mejoras respecto a la validación previa. En las Figuras 4.6 y 4.7 se observa que Estero Las Garzas y Río Maule en Armerillo, al igual que en el período de calibración, logran un ajuste visual más cercano al caudal observado gracias al método dinámico. En el caso de Las Garzas, se aprecia una leve sobreestimación del caudal base, mientras que Armerillo continúa sin reproducir correctamente el comportamiento del flujo.

En síntesis, el enfoque dinámico permitió mejorar la simulación del comportamiento hidrológico, entregando resultados robustos en varios puntos de control y dejando a otras estaciones muy próximas a alcanzar criterios aceptables, lo que refuerza la validez del enfoque adoptado.

4.5 Comparación de resultados

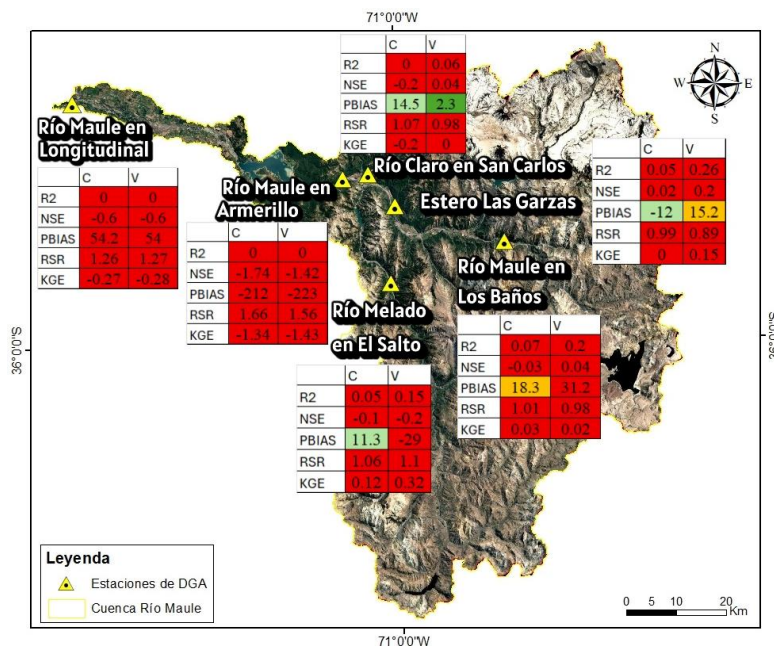


Figura 4.8: Distribución espacial de métricas obtenidas con método estacionario

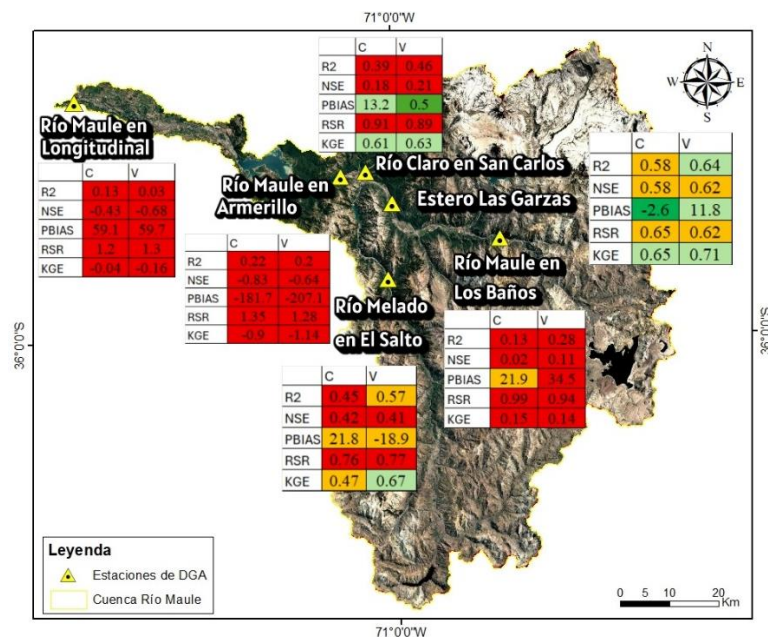


Figura 4.9: Distribución espacial de métricas obtenidas con método dinámico

Para visualizar de forma global el desempeño de ambos enfoques, se presentan las Figuras 4.8 y 4.9. En el escenario estacionario predominan valores deficientes (en rojo) en gran parte de la cuenca, especialmente aguas abajo, donde NSE y KGE son bajos y el sesgo (PBIAS) elevado. Solo algunas estaciones aguas arriba, menos intervenidas por embalses, muestran un comportamiento relativamente mejor.

Con el método dinámico se observa una mejora general, especialmente en estaciones no afectadas por embalses. Destaca Estero Las Garzas, que pasa de métricas deficientes a valores aceptables, con un ajuste visual notable entre las Figuras 4.4 y 4.6, se reduce casi por completo la sobreestimación previa, persiste solo una leve sobreestimación del caudal base, se reproducen correctamente los caudales máximos y desaparece el desplazamiento temporal. También Río Claro en San Carlos y Río Melado en El Salto presentan incrementos claros en NSE y KGE, además de sesgos reducidos, mientras que Armerillo y Longitudinal mantienen un desempeño limitado.

Para evaluar cuantitativamente el ajuste de los caudales simulados frente a los valores observados, se aplicó el Test T de Student para muestras pareadas (Tabla 4.12). Esta prueba permite contrastar si existen diferencias estadísticamente significativas en las medias de los caudales diarios simulados por cada modelo respecto a los observados, considerando que las fechas están emparejadas uno a uno. Cabe recordar que, en este análisis, p-valores inferiores a 0.05 indican diferencias estadísticamente significativas entre las medias de caudales simulados y observados, mientras que valores superiores a dicho umbral sugieren que no existen diferencias relevantes desde el punto de vista estadístico.

**Tabla 4.12 Resultados de Test T para distintos métodos en periodo de calibración y validación**

Estación	P-value Test T			
	Calibración		Validación	
	Método Dinámico	Método Estacionario	Método Dinámico	Método Estacionario
Río Melado en El Salto	0	0.003	0	0
Río Maule en Los Baños	0	0	0	0
Esteros Las Garzas	0.1321	0	0.052	0.002
Río Maule en Armerillo	0	0	0	0
Río Claro en San Carlos	0.02	0	0.6943	0.064
Río Maule en Longitudinal	0	0	0	0

Los resultados obtenidos confirman las observaciones previas, mostrando p-valores más altos con el enfoque dinámico en varias estaciones. En Río Claro en San Carlos ( $p = 0.6943$  en validación) y Estero Las Garzas ( $p = 0.1321$  en calibración y  $p = 0.052$  en validación) no se detectan diferencias significativas respecto a la media observada, superando ampliamente al modelo estacionario. Las pruebas adicionales de Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrado fueron descartadas debido a su

excesiva sensibilidad a la variabilidad y valores extremos de los caudales diarios, lo que las hacía poco representativas para este análisis.

Desde el punto de vista computacional, se debe señalar que la modelación con el método dinámico implicó un mayor esfuerzo de procesamiento y tiempos más extensos de ejecución, debido a la incorporación de múltiples archivos de uso de suelo interanuales y su integración en la estructura temporal de SWAT. Sin embargo, la mejora obtenida en el ajuste —particularmente para estaciones sensibles al cambio de cobertura— justifica este costo computacional adicional.

En consecuencia, si bien el método estacionario puede ser más sencillo y eficiente en términos operativos, el modelo dinámico demuestra una mayor capacidad de reproducción del comportamiento medio observado, especialmente en estaciones afectadas por transformaciones del paisaje. Esta evidencia sugiere que, para estudios enfocados en la proyección de impactos antrópicos o climáticos sobre la escorrentía, la incorporación de usos de suelo variables en el tiempo se vuelve un factor determinante para la fidelidad del modelo.

#### **4.6 Conclusiones**

En resumen, este capítulo presentó la construcción de los tipos de suelo mediante técnicas estadísticas, así como la calibración y validación del modelo SWAT bajo dos enfoques de representación del uso del suelo. Los resultados indican que el enfoque dinámico, si bien más exigente computacionalmente, entregó un mejor ajuste en múltiples estaciones, tanto en métricas hidrológicas como en las pruebas estadísticas aplicadas, destacando su mayor capacidad para reproducir el comportamiento real de los caudales diarios en escenarios de cambio de cobertura. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar la evolución temporal del paisaje en estudios de modelación hidrológica.

## 5 CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

La presente investigación abordó la evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Maule ante escenarios de cambio de uso de suelo, utilizando el modelo hidrológico SWAT y considerando dos enfoques distintos para el tratamiento de la cobertura terrestre: un método estacionario y otro dinámico basado en interpolación temporal. A partir de una construcción robusta de la base de datos edáfica, basada en el producto grillado de CLSoilMaps y técnicas estadísticas avanzadas como análisis de correlación, PCA y *clustering*, se generó una tipología de suelos representativa y coherente con las condiciones físicas de la cuenca. Este proceso fue fundamental para mejorar la parametrización del modelo, especialmente en una zona con alta heterogeneidad textural y funcional.

Los resultados obtenidos en la etapa de simulación mostraron que la calidad y resolución de los datos de entrada —en particular, la caracterización del suelo— influyen significativamente en la capacidad predictiva del modelo. Las variables edáficas seleccionadas, como la capacidad de agua disponible, el porcentaje de arcilla y el porcentaje de arena, capturaron aceptablemente los procesos relacionados con la retención hídrica, la infiltración y la escorrentía superficial en una estación sin influencia de obras hidráulicas, demostrando ser determinantes para el desempeño hidrológico simulado.

En cuanto a los escenarios de uso de suelo, el método dinámico permitió representar mejor las transiciones temporales del paisaje, reflejando una mayor coherencia con la realidad observada en estaciones sensibles a los cambios antrópicos. Las métricas hidrológicas —particularmente el NSE, KGE y el PBIAS— mostraron mejoras significativas en varias estaciones bajo este enfoque, destacando su utilidad para estudios prospectivos en contextos de transformación territorial. Asimismo, las pruebas estadísticas aplicadas —como el Test T de Student para muestras pareadas— evidenciaron que, en algunos casos, el modelo dinámico logró simular caudales sin diferencias significativas respecto a los datos observados, lo que refuerza su validez como herramienta de proyección.

No obstante, también se identificaron limitaciones importantes que condicionaron los resultados obtenidos. La cuenca del río Maule está fuertemente influenciada por la presencia de grandes embalses (Colbún y Maule) y diversas obras de regulación y desvío de caudales (embalses de Laguna La Invernada y Melado). Estas estructuras introducen una alteración artificial en la dinámica

hidrológica que resulta difícil de representar fielmente con SWAT, especialmente cuando no se dispone de datos completos sobre volúmenes almacenados, restituciones de caudal, o variaciones operacionales mensuales. En esta investigación, se trabajó con supuestos y aproximaciones respecto al volumen inicial de los embalses y su evolución temporal, lo cual pudo haber afectado la simulación del caudal base, particularmente en estaciones aguas abajo como Armerillo o Longitudinal, donde los desempeños fueron consistentemente bajos.

Otro elemento que dificultó la simulación precisa fueron las extracciones de agua registradas en la cuenca. Si bien se contó con una base de datos relativamente detallada de captaciones, estas solo consideraban el volumen extraído y no especificaban la restitución aguas abajo ni el destino final del recurso. En algunos casos, los volúmenes declarados parecían excesivos o incoherentes con la disponibilidad hídrica local, lo que pudo haber inducido sesgos en la simulación, especialmente en los periodos de estiaje. En este sentido, se destaca la necesidad de contar con información más completa y verificable sobre los usos consuntivos y no consuntivos del recurso hídrico, lo cual permitiría mejorar considerablemente la precisión del modelo.

Desde una perspectiva metodológica, el enfoque utilizado en esta investigación permitió evaluar de forma sistemática los efectos del cambio de uso de suelo sobre la escorrentía, integrando múltiples fuentes de datos y herramientas estadísticas. Además, la utilización de múltiples estaciones de control a lo largo de la cuenca permitió captar mejor las particularidades locales, aunque también reveló que ciertas zonas siguen representando un desafío para la modelación, debido a las intervenciones humanas o a la limitada calidad de los datos disponibles.

En términos generales, se puede concluir que el método dinámico de usos de suelo ofrece ventajas relevantes en contextos donde se desea capturar la evolución del paisaje y su impacto sobre la escorrentía. Sin embargo, su aplicación implica un mayor costo computacional. Por otro lado, el método estacionario, si bien más sencillo, puede resultar insuficiente en escenarios de alta variabilidad antrópica. En cualquier caso, ambos enfoques deben ser complementados con una base sólida de datos de entrada —especialmente edáficos y operacionales— para garantizar resultados confiables.

Finalmente, esta investigación contribuye al entendimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Maule bajo condiciones cambiantes, ofreciendo herramientas y evidencias para futuros estudios orientados a la gestión sostenible del recurso hídrico. Se reafirma la necesidad de incorporar información espacial y temporal de alta calidad, así como de avanzar hacia una mejor representación de los elementos artificiales en los modelos hidrológicos. En particular, se recomienda que futuros trabajos profundicen en la incorporación explícita de embalses, extracciones y obras hidráulicas, considerando sus efectos acumulativos y dinámicos sobre la disponibilidad hídrica, con el fin de lograr simulaciones más realistas y aplicables a la toma de decisiones territoriales.

**REFERENCIAS**

- Abbaspour, K., Vejdani, M., y Haghghat, S. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration und Uncertainty Programs. A user manual*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf)
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O’Connell, P.E., y Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological ‘SHE’ 1. History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87, 45–59. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O’Connell, P.E., y Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System, ‘SHE’ 2. Structure of physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87, 61–77. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90115-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90115-0)
- Aguayo, M., Stehr, A., & Link, O. (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal. *Revista de geografía Norte Grande*, (65), 197–214. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000300010>
- Azizi, S., Ilderomi, A. R., & Noori, H. (2021). Investigating the effects of land use change on flood hydrograph using HEC-HMS hydrologic model (case study: Ekbatan Dam). *Natural Hazards*, 109(1), 145–160. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04830-6>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Beven, K.J., Alver, A.C., y Morris, E.M. (1987). The Institute of Hydrology Distributed Model (HDM). Institute of Hydrology, Reino Unido.

- Blade, E., Sánchez, H., Dolz, J., Sanchez, M., Dominguez, R., Arganis, M., Carrizosa, E., Esquivel, G., y Juárez, J. (2014). Estimación del hidrograma de salida en una cuenca usando un modelo hidrológico distribuido y un modelo hidráulico bidimensional en volúmenes finitos. Proyecto de colaboración internacional Instituto Flumen - Instituto de Ingeniería de la UNAM. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/22709/informe%20propuesta%20de%20colaboraci%C3%B3n%20internacional%20v%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bobadilla, A. (2020). Evaluación de la respuesta hidrológica al cambio climático en la cuenca del río Maule mediante el modelo SWAT. [Memoria de Título, Universidad de Concepción].
- Boisier, J. P. (2023). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960–2021 in continental Chile (v2.5) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682>
- Bouma, J. (1989). Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, 9, 177–213. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8847-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8847-0_5)
- Bui, D. T., Nguyen, Q. T., & Le, T. T. (2019). A review of SWAT studies in Southeast Asia: Applications, challenges, and future directions. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104531. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104531>
- Busico, G., *et al.* (2020). SWAT Applications and Capabilities in Watershed Management. *International Journal of Creative Research Thoughts*.
- Chang, J. Y., & Lee, Y. H. (1974). Consistency and homogeneity of hydrologic data. *Water Resources Bulletin*, 10(6), 1224–1231.
- Coordinador Eléctrico Nacional. (2025). Estadísticas de caudales - Cálculos de potencia [Base de datos]. Recuperado de <https://www.coordinador.cl/reportes-y-estadisticas/>
- Dinamarca, D. I., Galleguillos, M., Seguel, O., & Faúndez, C. (2023). CLSoilMaps: A national soil gridded database of physical and hydraulic soil properties for Chile. *Scientific Data*, 10, 630. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02536-x>
- Dinamarca, P., Pino, D., Alfaro, C., & Muñoz, A. (2023). CLSoilMaps: Base de datos de propiedades físicas e hidráulicas del suelo para Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7652978>

- Dirección General de Aguas (DGA). (2004) *Diagnostico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Maule*. Chile. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Maule.pdf>
- Dirección General de Aguas (DGA). (2025). Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en la DGA [Base de datos]. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Recuperado de <https://snia.mop.gob.cl/sad/derechosAprovechamiento>
- Escenarios Hídricos. (n.d.). Cuenca del río Maule. Recuperado de <https://escenarioshidricos.cl/nuestro-trabajo/cuenca-del-rio-maule/>
- Escenarios Hídricos 2030. (2022). Usos del agua en Chile: Medir para gestionar.
- Fralleone, G. (2017, junio 20). Mind Map on Hidrología [Mapa mental]. GoConqr. <https://www.goconqr.com/mapamental/9368328/hidrologia>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on soil physics: 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99.
- Heo, S., Kim, N., Park, Y. S., Kim, J., Kim, S., Ahn, J., Kim, K., & Lim, K. (2008). Evaluation of Effects on SWAT Simulated Hydrology and Sediment Behaviors of SWAT Watershed Delineation using SWAT ArcView GIS Extension Patch. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24, 147–155.
- Janjić, J., & Tadić, L. (2023). Fields of Application of SWAT Hydrological Model—A Review. *Earth*.
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>

- Kim, J., Choi, J., Choi, C., & Park, S. (2013). Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. *The Science of the Total Environment*, 452–453, 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.005>
- Kiros, G., Shetty, A., & Nandagiri, L. (2015). Performance evaluation of SWAT model for land use and land cover changes in semi-arid climatic conditions: a review. *Hydrology: Current Research*, 6(3), 7.
- Lozano-Parra, J. (2018). Recursos hídricos. Disponibilidad, variabilidad y gestión. *Revista de Geografía Norte Grande*, (71), 5–8.
- Martínez-Retureta, Aguayo, M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverría, C., *et al.* (2020). Effect of Land Use/Cover Change on the Hydrological Response of a Southern Center Basin of Chile. *Water*, 12.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Región del Maule. Recuperado de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Maule.pdf>
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. In G. E. Fogg (Ed.), *The state and movement of water in living organisms* (pp. 205–234). Academic Press.
- Muñoz, E., & Navarro, P. (2011). Análisis del Déficit Hídrico en la Agricultura de la Región del Maule. RIAT.
- Nguyen, H. (2020). *landuseChangeTool for SWAT models* [Software]. GitHub. <https://github.com/nguyenhuyong/landuseChangeTool>
- Organización Meteorológica Mundial (2009). *Guide to hydrological practices - Volumen II Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices*. [https://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/guide/english/168\\_Vol\\_II\\_en.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/guide/english/168_Vol_II_en.pdf)
- Palacios-Cabrera, T., Valdes-Abellan, J., Jodar-Abellan, A., & Rodrigo-Comino, J. (2022). Land-use changes and precipitation cycles to understand hydrodynamic responses in semiarid Mediterranean karstic watersheds. *The Science of the Total Environment*, 819, 153182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153182>

- Pizarro, R., Sanguesa, C., Arumi, J. L., Iroumé, A., García, P., Vallejos, C., Mendoza, R., *et al.* (2019). Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile. UNESCO, PHI–VIII/Documento Técnico N°41, América Latina y El Caribe.
- Plissock, P. (2020). Escenarios Hídricos 2030. Análisis del estado actual de los ecosistemas en Maipo y Maule.
- Plissock, P., Folchi, M., Aliste, E., Cea, D., & Simonetti, J. A. (2020). Chile mega-fire 2017: An analysis of social representation of forest plantation territory. *Applied Geography*, 119, 102226.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- Proyecto FONDECYT #1212032. (2024). Escenarios De Inundaciones Fluviales En Un Contexto De Cambio Climático Y De Uso De Suelo En Cuencas Hidrográficas Del Centro-sur De Chile: Aportes Para Una Planificación Urbana Sostenible
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Saxton, K. E. (1982). Estimating soil water characteristics. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316–1320. <https://doi.org/10.13031/2013.33720>
- Rezaei, S. A., Gilkes, R. J., & Andrews, S. S. (2006). A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma*, 136(1–2), 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.002>
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
- Serpa, D., Nunes, J. P., & Giertz, S. (2024). Continental-scale hydrological modeling in Africa using SWAT+: A case study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(1), 117–133. <https://doi.org/10.5194/hess-28-117-2024>
- Soil Conservation Service. (1972). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. U.S. Department of Agriculture.

- The Coder School. (n.d.). Advanced Machine Learning Techniques: K-Means Clustering Algorithm [Imagen en línea]. The Coder School. <https://www.thecoderschool.com/blog/advanced-machine-learning-techniques-k-means-clustering-algorithm/>
- United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service (USDA-ARS). (n.d.). Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Recuperado de <https://www.ars.usda.gov>
- UNESCO. (2019). *Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile* (PHI–VIII/Documento Técnico N°41, América Latina y El Caribe).
- USACE. (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Wang, Y., Shao, J., Su, C., Cui, Y., y Zhang, Q. (2019). The Application of Improved SWAT Model to Hydrological Cycle Study in Karst Area of South China. *Sustainability*, 11(18), 5024. <https://doi.org/10.3390/su11185024>.
- Zornoza, R., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Gómez, I., & Arcenegui, V. (2008). Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(11), 2721–2731. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.07.018>
- Zornoza, R., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Gómez, I., Arcenegui, V., & Mataix-Beneyto, J. (2008). Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), 1923–1930. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.011>

## ANEXOS

### Anexo 1.1: Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.

ODS-13 : Acción por el clima.

<b>Vinculación</b>
<p>Este estudio se vincula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por Naciones Unidas, en particular con el ODS 6: Agua limpia y saneamiento y el ODS 13: Acción por el clima.</p> <p>Respecto al ODS 6, la evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Maule, mediante la modelación hidrológica con SWAT, entrega información fundamental para fortalecer la gestión integrada del recurso. Los resultados contribuyen a una planificación más eficiente del uso del agua en un territorio con fuerte presión agrícola y alta variabilidad climática, apoyando la toma de decisiones en torno a la conservación, asignación y uso sustentable del recurso hídrico.</p> <p>En cuanto al ODS 13, este trabajo aborda cómo los cambios en la cobertura y uso del suelo inciden en los procesos hidrológicos de la cuenca. Al analizar escenarios de transformación territorial, se generan insumos relevantes para anticipar y mitigar los impactos asociados al cambio climático, mejorando la capacidad de adaptación frente a condiciones futuras inciertas. De este modo, la investigación aporta una herramienta técnica para avanzar hacia una gestión más resiliente y sostenible de los recursos hídricos en la Región del Maule.</p>

### Anexo 3.3.1: Fuentes de información – Catastro de información fluviométrica

**Tabla A. 1: Catastro de información para cada estación en la cuenca en estudio. a) porcentaje de información para los años 2000-2008, b) porcentaje de información para los años 2009-2017, c) porcentaje de información para los años 2018-2024 y porcentaje total, d) leyenda**

a)

	NOMBRE ESTACIÓN	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
1	Río Melado en El Salto	0%	0%	0%	70%	100%	100%	100%	100%	100%
2	Río Maule en Los Baños	0%	0%	17%	92%	100%	100%	61%	96%	76%
3	Estero Las Garzas	0%	0%	29%	100%	100%	100%	49%	100%	96%
4	Río Maule en Armerillo	0%	27%	94%	99%	100%	100%	49%	99%	100%
5	Río Claro en San Carlos	0%	0%	17%	99%	100%	100%	63%	100%	100%
6	Río Maule en Longitudinal	98%	100%	90%	98%	100%	98%	98%	98%	98%

b)

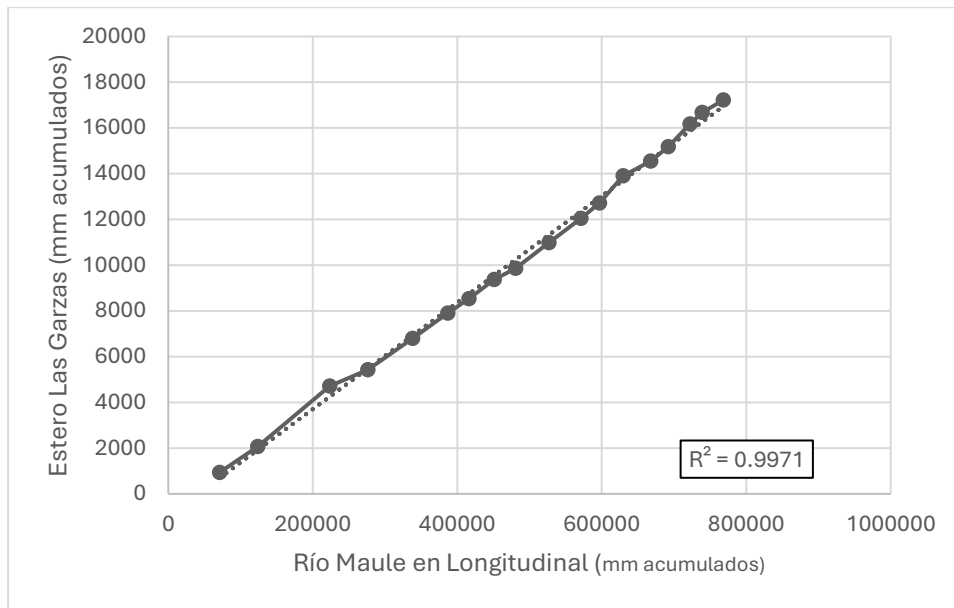
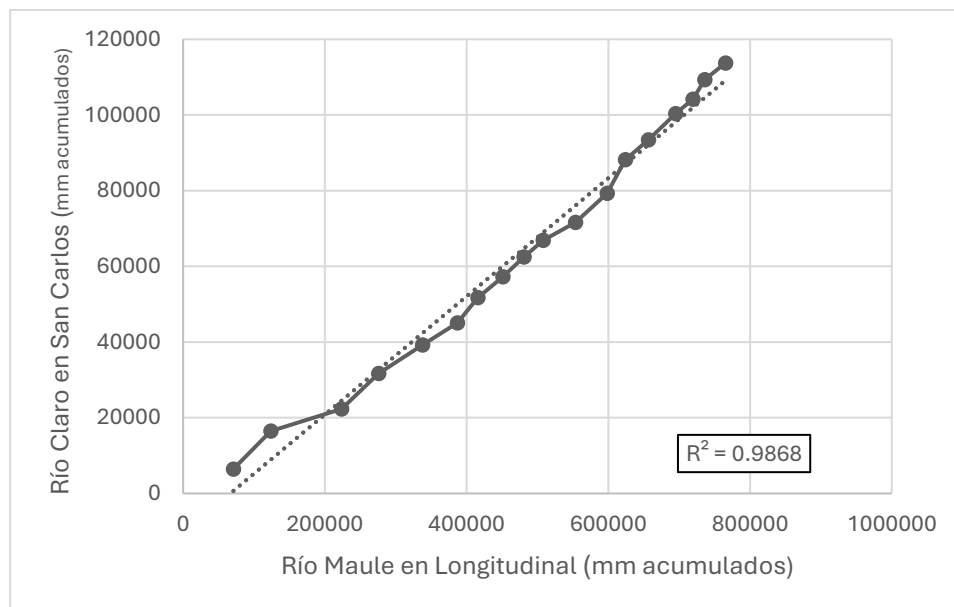
	NOMBRE ESTACIÓN	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1	Río Melado en El Salto	100%	98%	100%	97%	89%	89%	100%	100%	100%
2	Río Maule en Los Baños	72%	93%	80%	96%	83%	86%	100%	100%	100%
3	Estero Las Garzas	96%	100%	99%	98%	66%	99%	92%	99%	99%
4	Río Maule en Armerillo	100%	100%	100%	97%	100%	98%	49%	75%	74%
5	Río Claro en San Carlos	100%	100%	100%	99%	100%	98%	90%	92%	83%
6	Río Maule en Longitudinal	100%	99%	95%	94%	100%	97%	91%	98%	96%

c)

	NOMBRE ESTACIÓN	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Porcentaje de información total
1	Río Melado en El Salto	100%	100%	99%	100%	100%	74%	0%	80.75%
2	Río Maule en Los Baños	100%	100%	100%	100%	100%	47%	25%	77.19%
3	Estero Las Garzas	98%	100%	99%	100%	100%	74%	0%	79.79%
4	Río Maule en Armerillo	100%	100%	100%	100%	100%	41%	16%	81.06%
5	Río Claro en San Carlos	100%	100%	99%	100%	100%	43%	25%	79.68%
6	Río Maule en Longitudinal	100%	96%	99%	93%	100%	95%	25%	94.22%

d)

Leyenda		0%
		]0%,50%[
		[50%,100%[
		100%

**Anexo 3.3.1: Fuentes de información – Análisis de Consistencia****Figura A. 1: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Estero Las Garzas****Figura A. 2: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Río Claro en San Carlos**

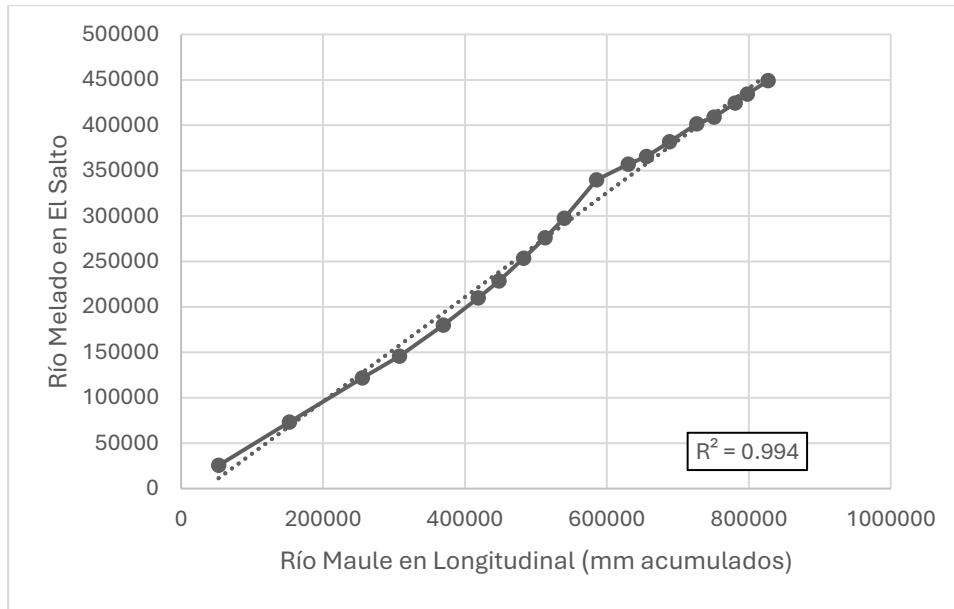


Figura A. 3: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Río Melado en El Salto

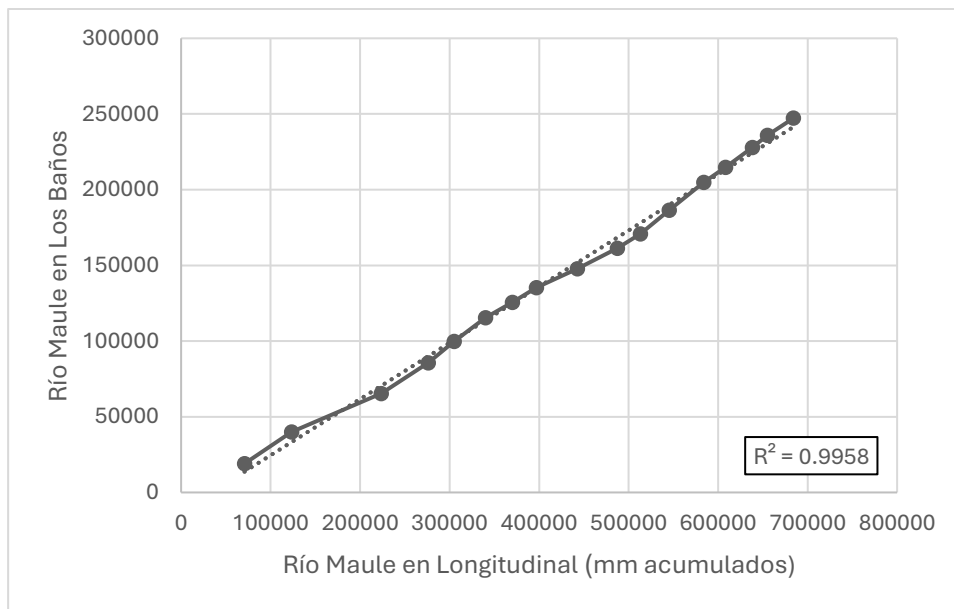
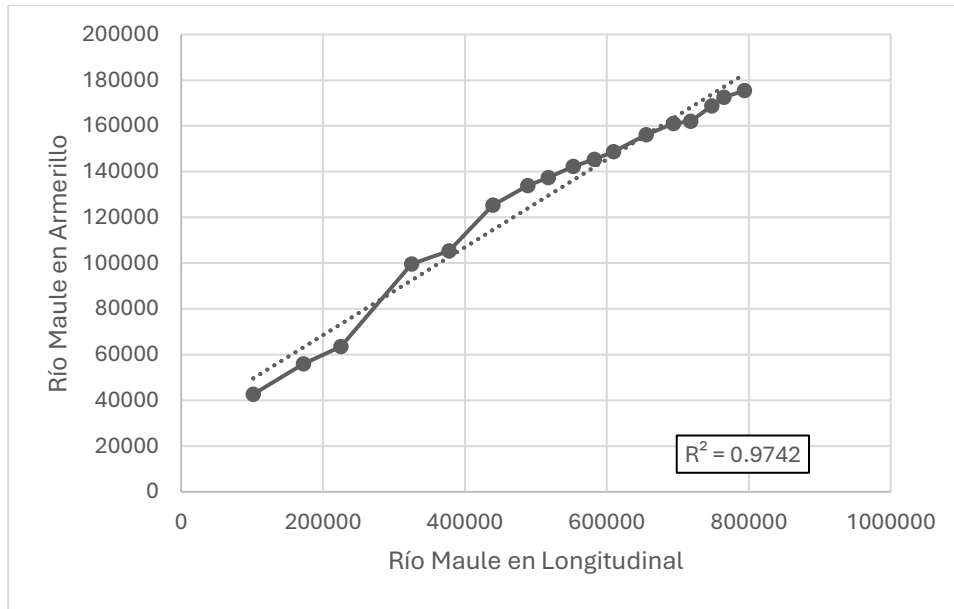


Figura A. 4: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Río Maule en Los Baños



**Figura A. 5: Curva de doble masa para estación Río Maule en Longitudinal (patrón) y Río Maule en Armerillo**

## Anexo 3.3.2: Periodos de calibración y validación – Comparación de medias

Tabla A. 2: Análisis de diferencias significativas entre período de calibración y validación

Estación	Media calibra	Media validaci	Desviación estándar	Desviación estándar	"n" calibra	"n" validación	t	gl	p-value	¿Diferencia significativa?
Río Melado en El Salto	63.18	39.56	76.03	67.41	2436	1095	9.248	2357	0	Sí
Río Maule en Los Baños	36.44	40.09	40	55	2341	1095	-1.97	1655	0.05	No
Estero Las Garzas	2.15	2.28	2.6	2.49	2392	1085	-1.41	2180	0.15966	No
Río Maule en Armerillo	11.23	10.63	26.15	29.13	2279	1003	0.56	1742	0.57524	No
Río Claro en San Carlos	15.73	13.67	7.98	5.67	2488	1033	8.65	2676	0	Sí
Río Maule en Longitudinal	95.74	88.9	110	105	2476	1071	1.756	2121	0.07932	No

Anexo 4.3: Análisis de Correlación

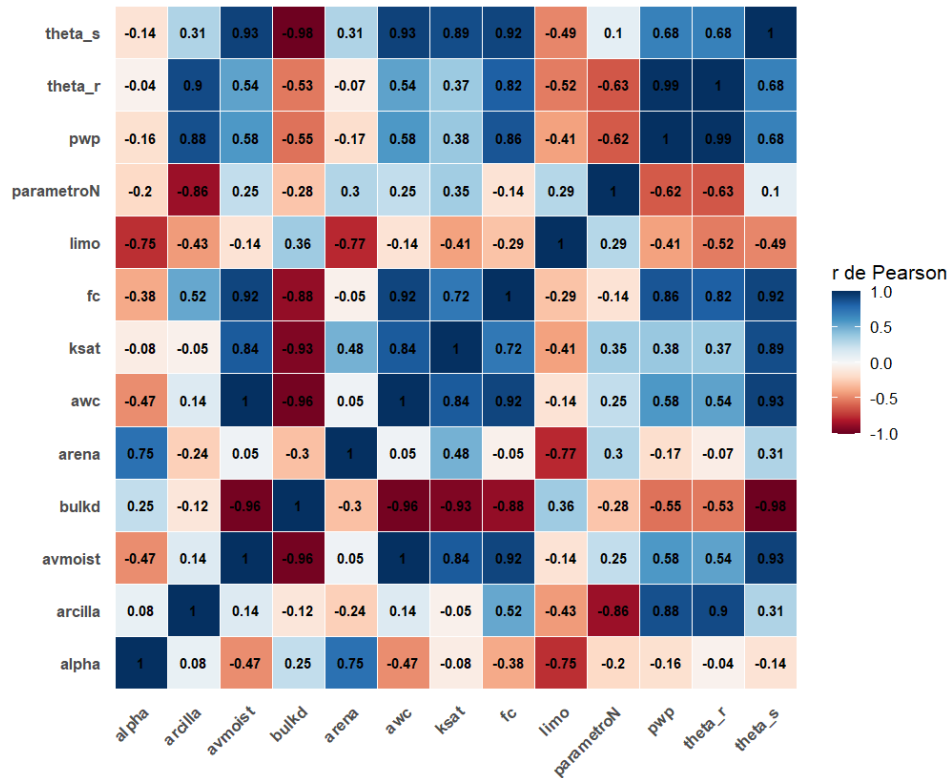


Figura A. 6: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 5 a 15 cm

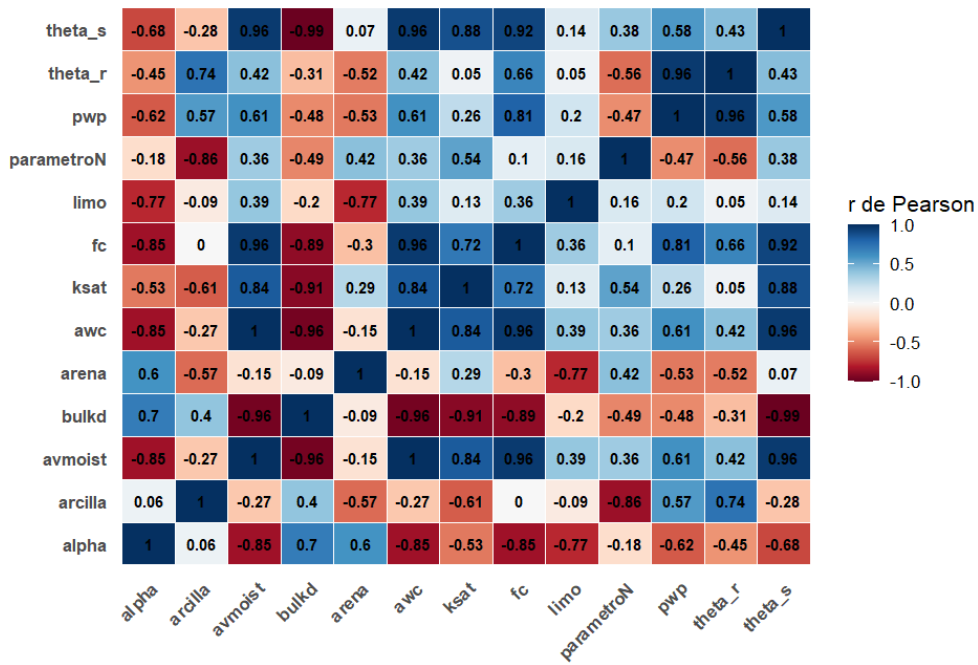


Figura A. 7: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 15 a 30 cm

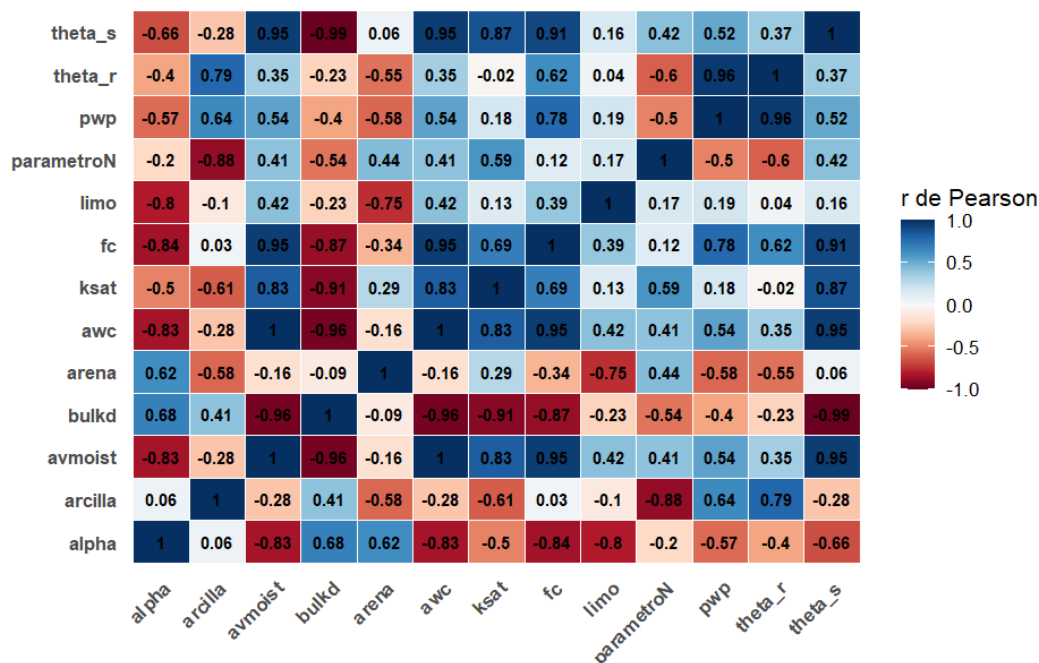


Figura A. 8: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 30 a 60 cm

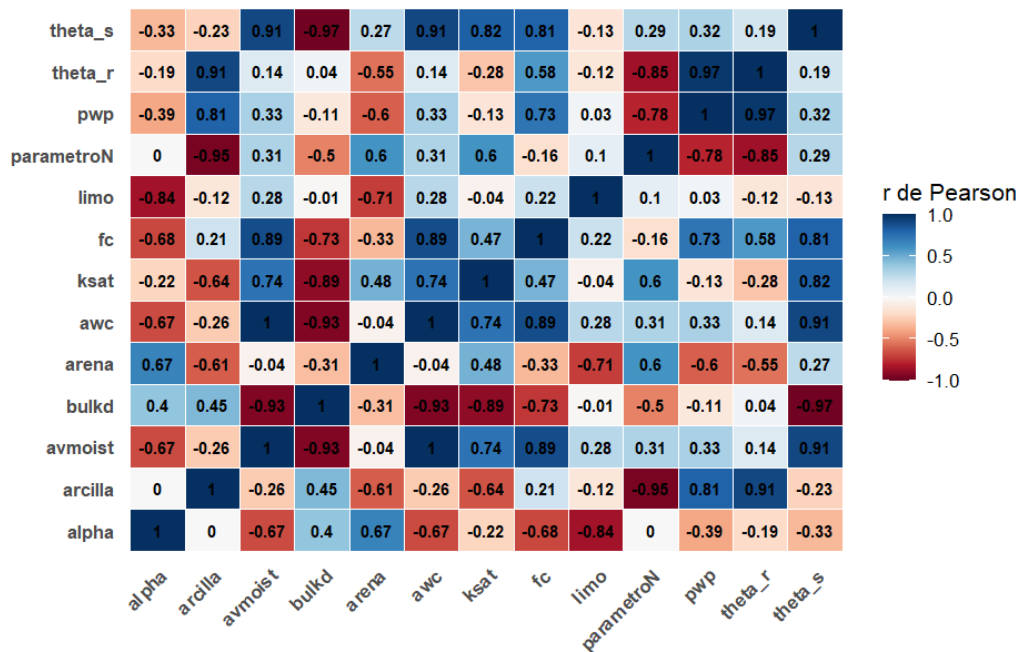


Figura A. 9: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 60 a 100 cm

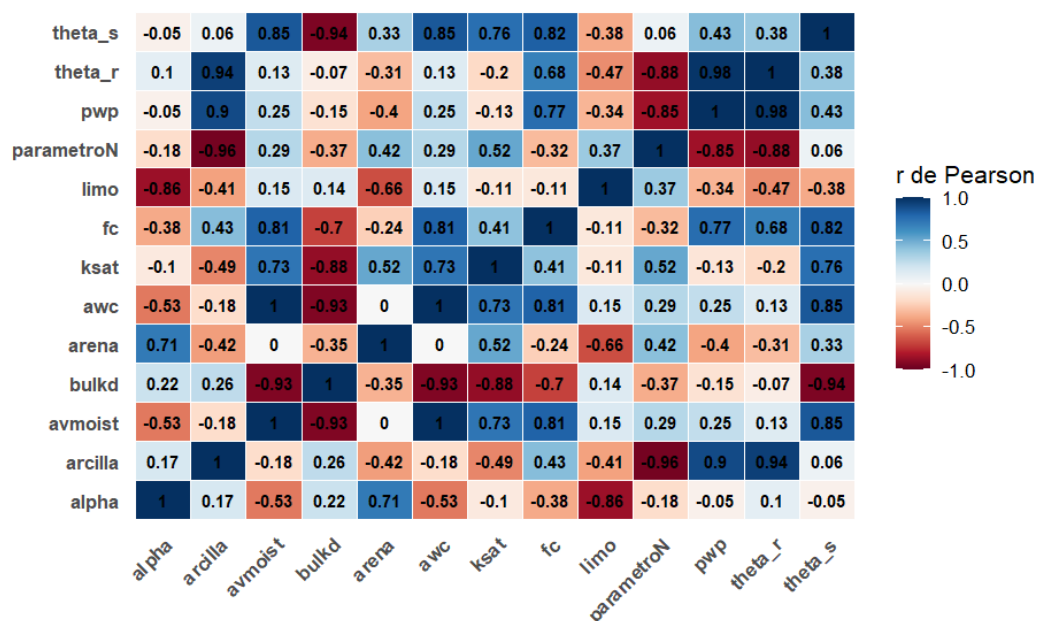


Figura A. 10: Matriz de correlación entre variables estudiadas en el parámetro de 100 a 200 cm

Tabla A. 3: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 5 a 15 cm

Parámetro	PC1 (%)	PC2 (%)	PC3 (%)
Arena	0.29	1.97	34.05
Limo	2.81	3.44	25.77
$\alpha$	0.73	2.92	31.28
KSat	9.49	6.29	2.66
$\Theta_s$	13.72	0.85	0.76
BulkD	12.49	3.98	0.22
Arcilla	3.23	23.44	0.28
$\Theta_r$	9.33	10.73	0.06
Npar	0.1	29.21	0.22
PWP	9.65	9.48	0.94
AvMoist	12.14	3.81	1.19
AWC	12.14	3.81	1.19
FC	13.88	0.06	1.36

**Tabla A. 4: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 15 a 30 cm**

<b>Parámetro</b>	<b>PC1 (%)</b>	<b>PC2 (%)</b>	<b>PC3 (%)</b>
Arena	0.79	15.58	20.39
Limo	2.52	0.99	44.93
$\alpha$	10.67	1.01	10.07
KSat	8.98	6.66	1.46
$\theta_s$	12.41	0.9	3.87
BulkD	12.33	2.22	1.43
Arcilla	0.43	23.88	2.53
$\theta_r$	3.54	16.03	6.99
Npar	1.11	19.2	3.75
PWP	6.45	12.26	4
AvMoist	13.71	0.26	0.01
AWC	13.71	0.26	0.01
FC	13.34	0.75	0.58

**Tabla A. 5: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 30 a 60 cm**

<b>Parámetro</b>	<b>PC1 (%)</b>	<b>PC2 (%)</b>	<b>PC3 (%)</b>
Arena	0.84	15.25	19.5
Limo	2.97	0.83	44.25
$\alpha$	10.63	1.21	10.73
KSat	9.09	6.11	2.04
$\theta_s$	12.58	0.68	4.63
BulkD	12.59	1.97	1.7
Arcilla	0.57	22.65	2.48
$\theta_r$	2.55	17.25	7.08
Npar	1.67	18.41	2.82
PWP	5.2	14.13	4
AvMoist	13.99	0.2	0.02
AWC	13.99	0.2	0.02
FC	13.33	1.13	0.72

**Tabla A. 6: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 60 a 100 cm**

<b>Parámetro</b>	<b>PC1 (%)</b>	<b>PC2 (%)</b>	<b>PC3 (%)</b>
Arena	0.03	14.29	14.86
Limo	0.97	1.08	41.11
$\alpha$	6.62	3.73	19.23
KSat	11.36	4.09	1.24
$\theta_s$	14.53	0.01	6.32
BulkD	15.57	0.89	1.61
Arcilla	1.86	17.31	3.12
$\theta_r$	0.1	18.1	6.41
Npar	2.31	16.25	2.43
PWP	1.18	18.29	3.09
AvMoist	16.63	0.15	0.05
AWC	16.64	0.15	0.05
FC	12.18	5.67	0.5

**Tabla A. 7: Resultados de contribuciones de cada variable para PC1, PC2 y PC3, en el estrato de 100 a 200 cm**

<b>Parámetro</b>	<b>PC1 (%)</b>	<b>PC2 (%)</b>	<b>PC3 (%)</b>
Arena	0.17	4.08	28.82
Limo	0.14	3.27	30.25
$\alpha$	2.24	0.48	30.28
KSat	10.65	5.17	2.73
$\theta_s$	16.62	0.09	3.17
BulkD	16.58	1.47	0.99
Arcilla	0	21.68	0.02
$\theta_r$	1.82	19.48	0.23
Npar	0.26	20.79	0
PWP	3.11	18.02	0.09
AvMoist	17.04	0.61	1.28
AWC	17.04	0.61	1.28
FC	14.35	4.25	0.85

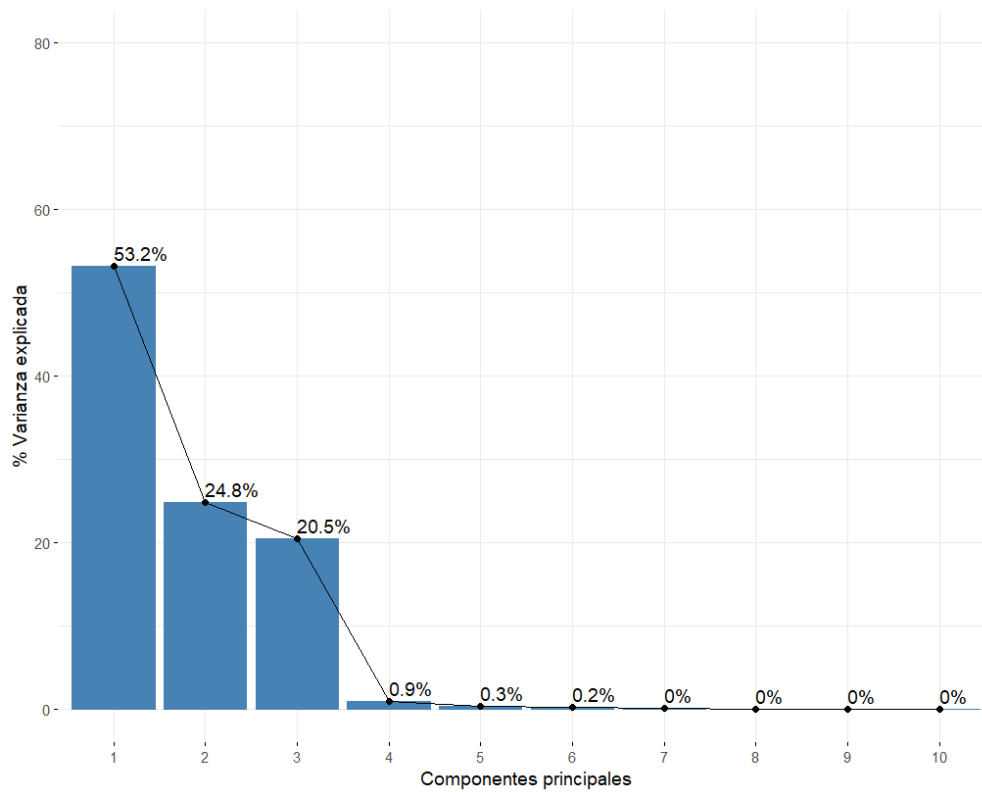


Figura A. 11: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 5 a 15 cm

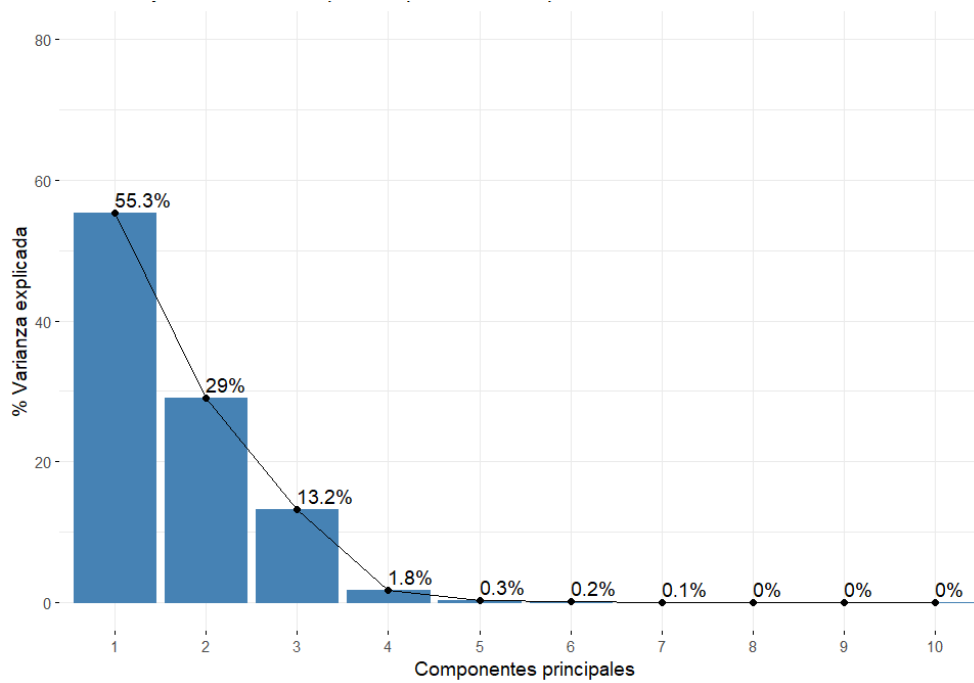


Figura A. 12: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 15 a 30 cm

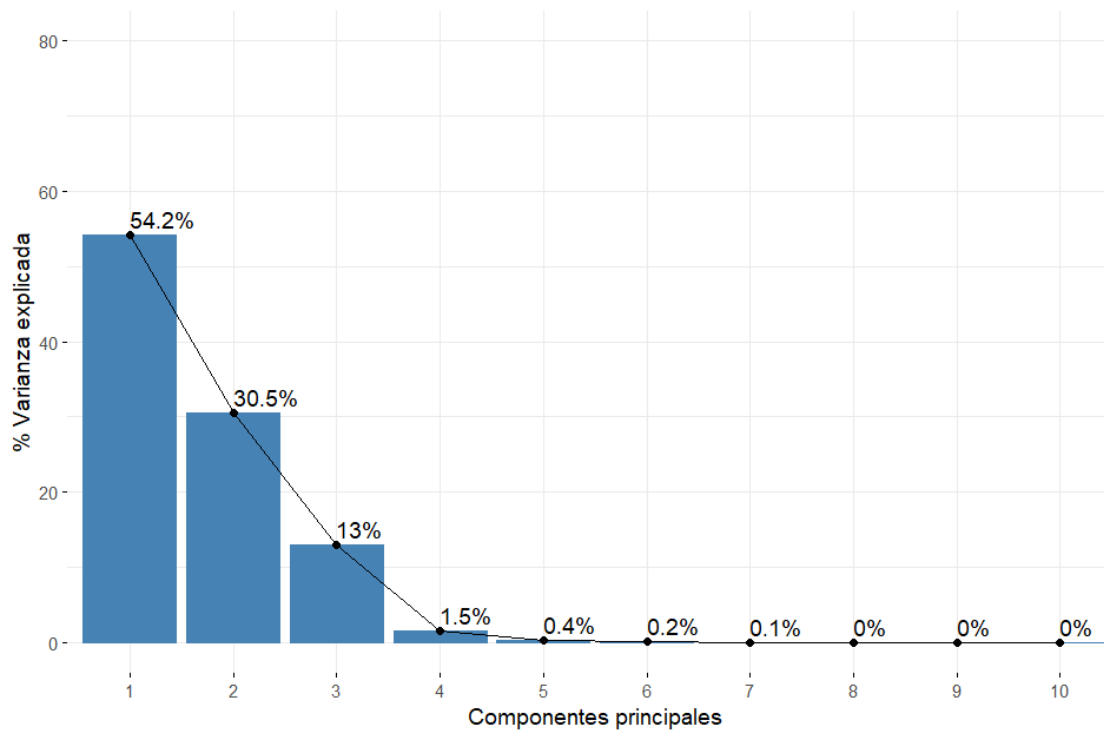


Figura A. 13: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 30 a 60 cm

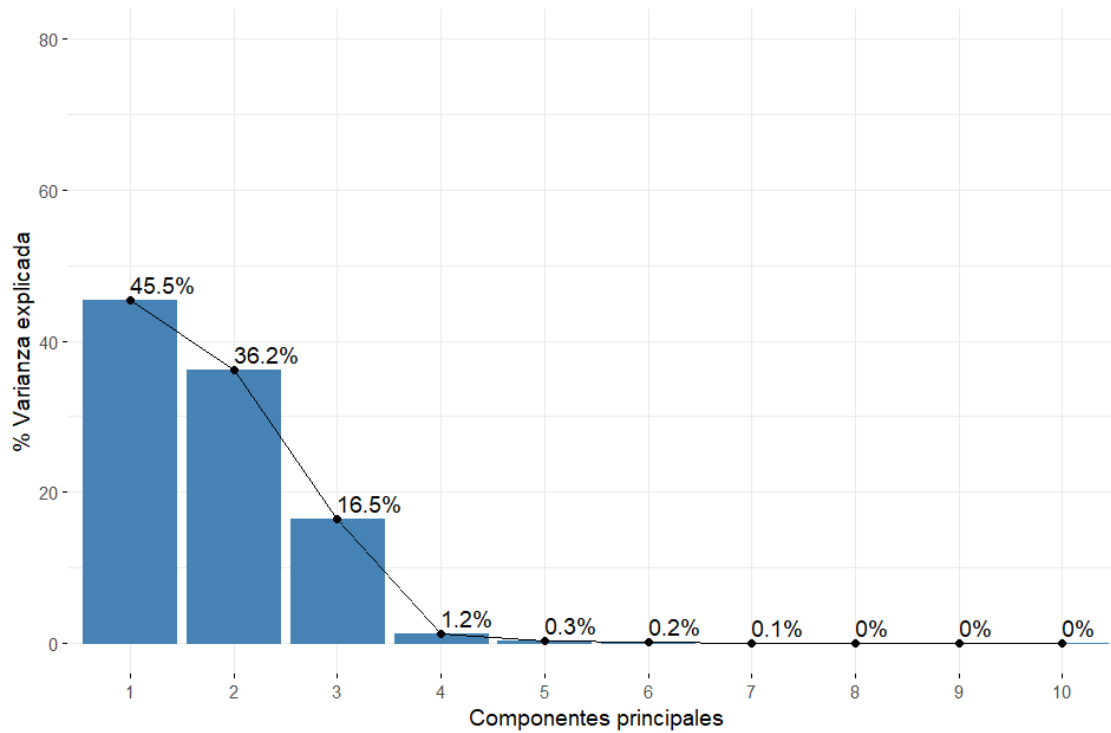


Figura A. 14: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 60 a 100 cm

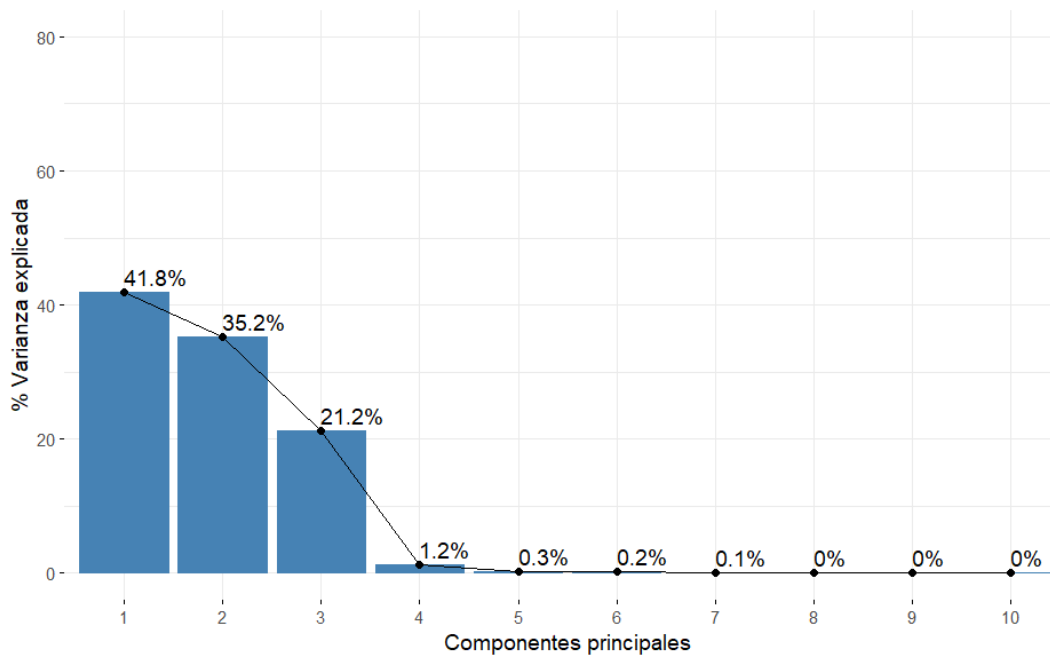


Figura A. 15: Porcentaje de varianza de cada componente principal para el estrato de 100 a 200 cm

Tabla A. 8: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 5 a 15 cm

Parámetro	PC1	PC2	PC3
Alpha	-0.085	-0.17	-0.56
Arcilla	0.18	-0.48	0.05
Arena	0.054	0.14	-0.58
AvMoist	0.348	0.195	0.109
AWC	0.348	0.195	0.109
BulkD	-0.353	-0.199	0.047
FC	0.372	-0.024	0.11
KSat	0.308	0.25	-0.16
Limo	-0.16	0.185	0.50
Npar	-0.031	0.54	-0.04
PWP	0.31	-0.3	0.024
$\theta_r$	0.305	-0.327	0.0244
$\theta_s$	0.37	0.092	-0.087

Tabla A. 9: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 15 a 30 cm

Parámetro	PC1	PC2	PC3
Alpha	-0.326	0.100	-0.317
Arcilla	-0.065	-0.488	-0.158
Arena	-0.088	0.394	-0.451
AvMoist	0.370	0.051	-0.007
AWC	0.370	0.051	-0.007
BulkD	-0.351	-0.149	0.119
FC	0.365	-0.086	-0.076
KSat	0.299	0.258	-0.120
Limo	0.158	-0.099	0.670
Npar	0.105	0.438	0.193
PWP	0.253	-0.350	-0.199
$\theta_r$	0.188	-0.400	-0.264
$\theta_s$	0.352	0.095	-0.196

Tabla A. 10: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 30 a 60 cm

Parámetro	PC1	PC2	PC3
Alpha	-0.326	0.109	-0.327
Arcilla	-0.075	-0.47	-0.157
Arena	-0.09	0.390	-0.441
AvMoist	0.374	0.044	-0.0144
AWC	0.374	0.044	-0.0144
BulkD	-0.354	-0.140	0.130
FC	0.365	-0.106	-0.084
KSat	0.301	0.247	-0.142
Limo	0.172	-0.091	0.665
Npar	0.129	0.429	0.168
PWP	0.228	-0.375	-0.200
$\theta_r$	0.159	-0.415	-0.266
$\theta_s$	0.354	0.082	-0.215

Tabla A. 11: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 60 a 100 cm

Parámetro	PC1	PC2	PC3
Alpha	-0.257	-0.193	0.438
Arcilla	-0.136	0.416	0.176
Arena	0.018	-0.377	0.385
AvMoist	0.407	0.038	-0.022
AWC	0.407	0.038	-0.022
BulkD	-0.394	0.094	-0.126
FC	0.349	0.238	0.070
KSat	0.337	-0.202	0.111
Limo	0.098	0.104	-0.641
Npar	0.152	-0.403	-0.155
PWP	0.108	0.427	0.175
$\theta_r$	0.031	0.425	0.253
$\theta_s$	0.381	-0.108	0.251

Tabla A. 12: Cargas para cada variable en cada componente en el primer estrato de 100 a 200

Parámetro	PC1	PC2	PC3
Alpha	-0.149	0.069	0.550
Arcilla	-0.003	0.465	0.012
Arena	0.040	-0.202	0.536
AvMoist	0.412	-0.078	-0.113
AWC	0.412	-0.078	-0.113
BulkD	-0.407	0.121	-0.099
FC	0.378	0.206	-0.092
KSat	0.326	-0.227	0.165
Limo	-0.037	-0.18	-0.549
Npar	0.050	-0.456	-0.004
PWP	0.176	0.424	-0.029
$\theta_r$	0.134	0.044	0.047
$\theta_s$	0.407	0.029	0.178

Tabla A. 13: Resumen de variables escogidas para el estrato de 5 a 15 cm

PC	% Varianza	Variables Relevantes	Interpretación Física	Variables escogidas para clustering
PC1	53.20%	FC(+), AvMoist(+), AWC(+), $\Theta_s$ (+), BulkD (-)	Capacidad hídrica vs. compactación: Suelos con alta retención de agua (porosidad) vs. suelos densos.	AWC
PC2	24.80%	%Arcilla (-), Npar (+), $\Theta_r$ (-)	Textura vs. porosidad: Arcillosos (alta retención de agua residual) vs. suelos con alto parámetro “n” (orgánicos/porosos).	% ARCILLA
PC3	20.50%	%Arena (-), %Limo (+), $\alpha$ (-)	Granulometría: Suelos arenosos vs. limosos.	% ARENA

Tabla A. 14: Resumen de variables escogidas para el estrato de 15 a 30 cm

PC	% Varianza	Variables Relevantes	Interpretación Física	Variables escogidas para clustering
PC1	55.30%	FC(+), AvMoist(+), AWC(+), $\Theta_s$ (+), BulkD (-), $\alpha$ (-)	Capacidad hídrica vs. compactación: Suelos con alta retención de agua (avmoist, awc, theta_s) vs. suelos compactados o densos (bulkd alto).	AWC
PC2	29.00%	%Arcilla (-), Npar (+), $\Theta_r$ (-), PWP (-), %Arena (+)	Textura vs. porosidad: Arcillosos (alta retención de agua residual) vs. suelos con alto parámetro “n” (orgánicos/porosos) y más arena.	% ARCILLA
PC3	13.20%	%Arena (-), %Limo (+), $\alpha$ (-)	Granulometría: Suelos arenosos vs. limosos. $\alpha$ asociado a suelos gruesos.	% ARENA

Tabla A. 15: Resumen de variables escogidas para el estrato de 30 a 60 cm

PC	% Varianza	Variables Relevantes	Interpretación Física	Variables escogidas para clustering
PC1	54.20%	FC(+), AvMoist(+), AWC(+), $\theta_s$ (+), BulkD (-), $\alpha$ (-)	Dinámica hídrica vs. compactación: Suelos con alta retención de agua vs. suelos densos.	AWC
PC2	30.50%	%Arcilla (-), Npar (+), $\theta_r$ (-), PWP (-), %Arena (+)	Textura vs. porosidad: Suelos arcillosos vs. suelos con alto parámetro “n”.	% ARCILLA
PC3	13.00%	%Arena (-), %Limo (+), $\alpha$ (-)	Granulometría: Suelos arenosos vs. limosos.	% ARENA

Tabla A. 16: Resumen de variables escogidas para el estrato de 60 a 100 cm

PC	% Varianza	Variables Relevantes	Interpretación Física	Variables escogidas para clustering
PC1	45.50%	FC(+), AvMoist(+), AWC(+), $\theta_s$ (+), BulkD (-), KSat (+)	Capacidad hídrica vs. compactación: Suelos con alta porosidad vs. suelos densos.	AWC
PC2	36.20%	%Arcilla (+), Npar (-), $\theta_r$ (+), PWP (+), %Arena (-)	Textura vs. porosidad: Arcillosos vs. suelos con alto parámetro “n”	% ARCILLA o PWP
PC3	16.50%	%Arena (+), %Limo (-), $\alpha$ (+)	Granulometría: Suelos arenosos vs. limosos.	% ARENA

Tabla A. 17: Resumen de variables escogidas para el estrato de 60 a 100 cm

PC	% Varianza	Variables Relevantes	Interpretación Física	Variables escogidas para clustering
PC1	41.80%	FC(+), AvMoist(+), AWC(+), $\theta_s$ (+), BulkD (-), KSat (+)	Capacidad hídrica vs. compactación: Suelos con alta retención de agua (porosidad) vs. suelos densos.	AWC
PC2	35.20%	%Arcilla (+), Npar (-), $\theta_r$ (+), PWP (+)	Textura vs. porosidad: Arcillosos (alta retención de agua residual) vs. suelos con alto parámetro “n” (orgánicos/porosos).	% ARCILLA o PWP
PC3	21.20%	%Arena (+), %Limo (-), $\alpha$ (+)	Granulometría: Suelos arenosos vs. limosos.	% ARENA

## Anexo 4.4: Parámetros ajustados en la calibración de los modelos

Tabla A. 18: Estaciones fluviométricas y nombres trabajados

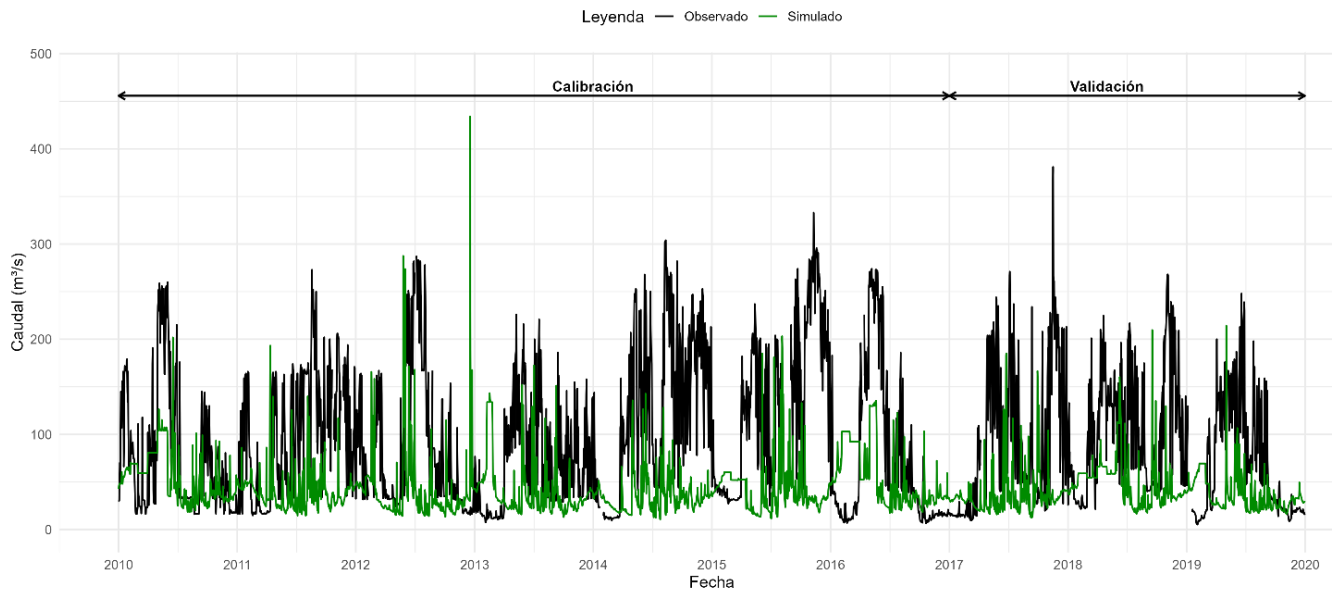
NOMBRE ESTACIÓN	Subcuenca asociada	Nombre trabajado
Río Melado en El Salto	45	q 45
Río Maule en Los Baños	34	q 34
Estero Las Garzas	26	q 26
Río Maule en Armerillo	12	q 12
Río Claro en San Carlos	9	q 9
Río Maule en Longitudinal	7	q 7

Tabla A. 19: parámetros ajustados en calibración diaria con método estacionario

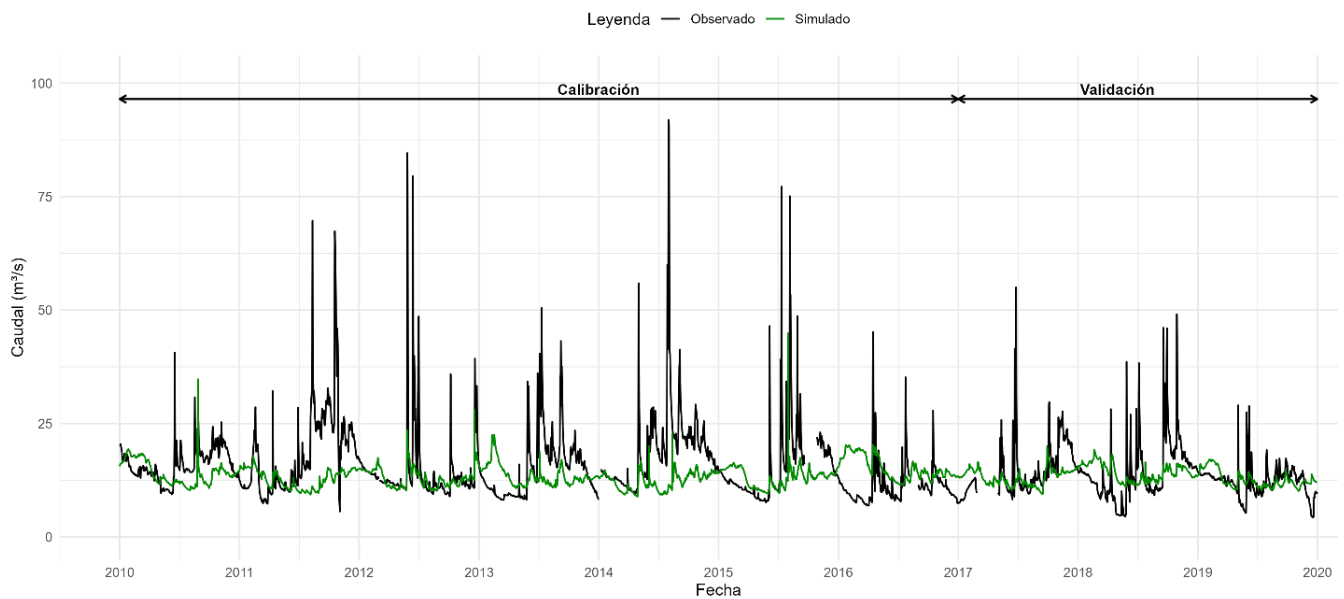
Calibración diaria método estacionario							
Parámetro	Tipo de cambio	Valor					
		q_7	q_9	q_12	q_26	q_34	q_45
T-LAPS	Variable	38.50					
P-LAPS	Variable	-7.98					
TIMP	Variable	0.83					
SMFMN	Variable	0.55					
SMFMX	Variable	2.65					
SMTMP	Variable	1.10					
SFTMP	Variable	6.90					
SURLAG	Variable	39.80					
GW_REVAP	Variable	0.03	0.02	0.18	0.20	-0.12	0.19
REVAPMN	Variable	371.50	0.17	363.75	121.50	632.50	209.38
RCHRG_DP	Variable	0.98	0.79	0.045	0.73	0.40	0.74
GW_DELAY	Variable	132.75	457.92	986.73	331.75	469.75	475.31
GWQMN	Variable	722.00	721.67	4921.79	2390.00	1930.00	684.38
ALPHA_BF	Variable	0.028	0.32	0.02	0.55	0.08	0.41
GWHT	Variable	19.18	3.10	3.12	2.36	18.58	22.95
DEEPST	Variable	9635.00	1158.33	5485.00	5625.00	9905.00	4918.75
SHALLST	Variable	907.50	4204.17	117.25	3672.50	4387.50	4228.12
GW_SPYLD	Variable	0.079	0.19	0.06	72.95	0.01	0.26
ALPHA_BF_D	Variable	180.63	0.02	0.18	0.007	0.57	0.76
SLSUBBSN	Relativo	-0.22	0.48	-0.43	0.11	-0.26	-0.48
HRU_SLP	Relativo	0.13	0.39	-0.41	0.13	-0.34	-0.37
OV_N	Relativo	-0.32	-0.41	0.03	-0.13	-0.18	-0.037
CN2	Relativo	0.34	-0.77	-0.52	-0.77	-0.12	-0.56
ESCO	Variable	0.75	0.87	0.85	0.93	0.99	0.059
EPCO	Variable	0.38	0.16	0.97	0.10	0.60	0.93
CANMX	Variable	5.25	56.42	79.75	72.95	40.05	84.06
SOL_K	Relativo	0.54	-0.72	-0.89	-0.70	-0.63	0.006
SOL_AWC	Relativo	0.57	-0.87	0.23	-0.57	-0.36	-0.46

Tabla A. 20: parámetros ajustados en calibración diaria con método dinámico

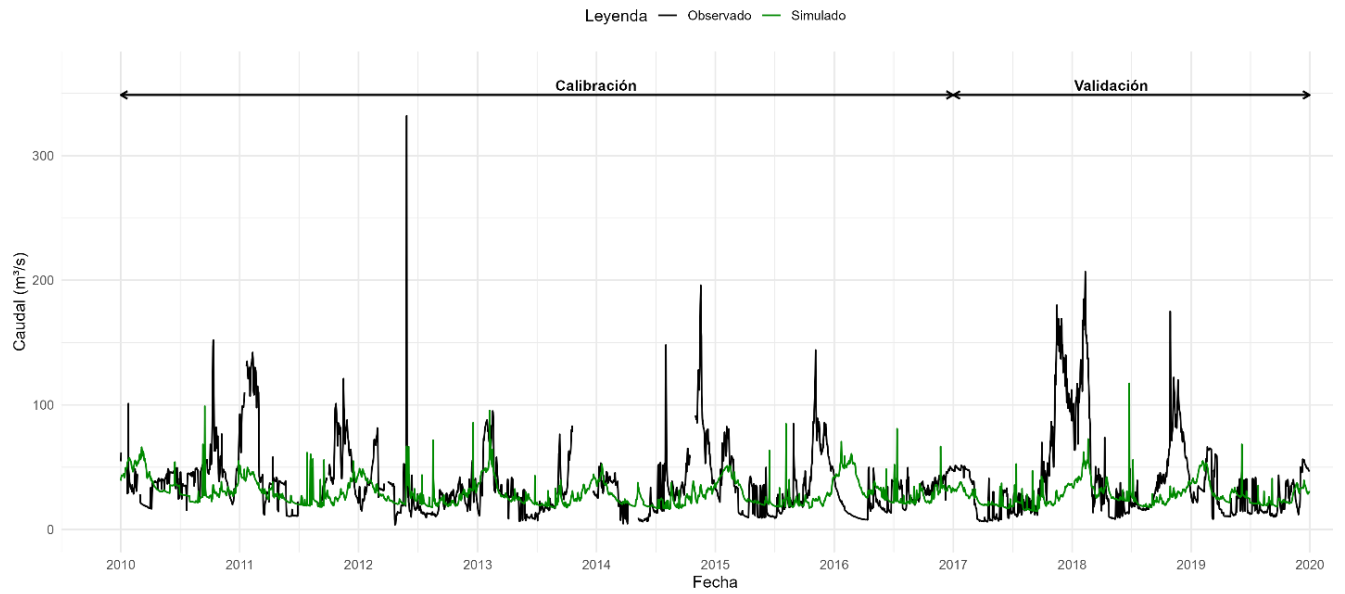
Calibración diaria método dinámico							
Parámetro	Tipo de cambio	Valor					
		q_7	q_9	q_12	q_26	q_34	q_45
T-LAPS	Variable	-7.96					
P-LAPS	Variable	41.50					
TIMP	Variable	0.85					
SMFMN	Variable	0.74					
SMFMX	Variable	1.00					
SMTMP	Variable	-6.83					
SFTMP	Variable	6.61					
SURLAG	Variable	31.28					
GW_REVAP	Variable	0.04	0.07	0.20	0.068	-0.32	0.60
REVAPMN	Variable	867.50	405.51	41.25	664.50	542.00	559.50
RCHRG_DP	Variable	0.11	0.33	0.04	0.93	0.52	0.90
GW_DELAY	Variable	130.75	326.95	802.66	119.75	402.23	85.75
GWQMN	Variable	422.00	1129.48	5829.25	3862.25	1520.00	1262.50
ALPHA_BF	Variable	0.08	0.35	0.05	0.15	0.10	0.834
GWHT	Variable	21.36	12.44	20.26	9.36	19.23	6.56
DEEPST	Variable	3645.00	1032.41	545.00	7635.00	9320.20	2165.00
SHALLST	Variable	4347.50	766.28	482.50	492.50	4624.00	4602.50
GW_SPYLD	Variable	0.16	0.08	0.12	0.24	0.01	0.40
ALPHA_BF_D	Variable	0.36	0.14	0.21	0.33	0.60	0.51
SLSUBBSN	Relativo	0.11	0.40	0.40	-0.28	-0.32	0.47
HRU_SLP	Relativo	-0.26	0.04	-0.43	0.01	-0.42	-0.14
OV_N	Relativo	0.47	0.04	-0.02	0.22	-0.09	0.33
CN2	Relativo	-0.49	-0.83	-0.81	-0.83	-0.23	-0.47
ESCO	Variable	0.92	0.99	0.84	0.52	0.82	0.14
EPCO	Variable	0.12	0.02	0.87	0.92	0.52	0.35
CANMX	Variable	1.35	86.12	7.15	64.85	40.05	37.75
SOL_K	Relativo	-0.77	-0.54	-0.89	-0.67	-0.52	-0.36
SOL_AWC	Relativo	-0.06	-0.46	0.64	-0.01	-0.40	0.21

**Anexo 4.5: Resultados calibración y validación método estacionario**

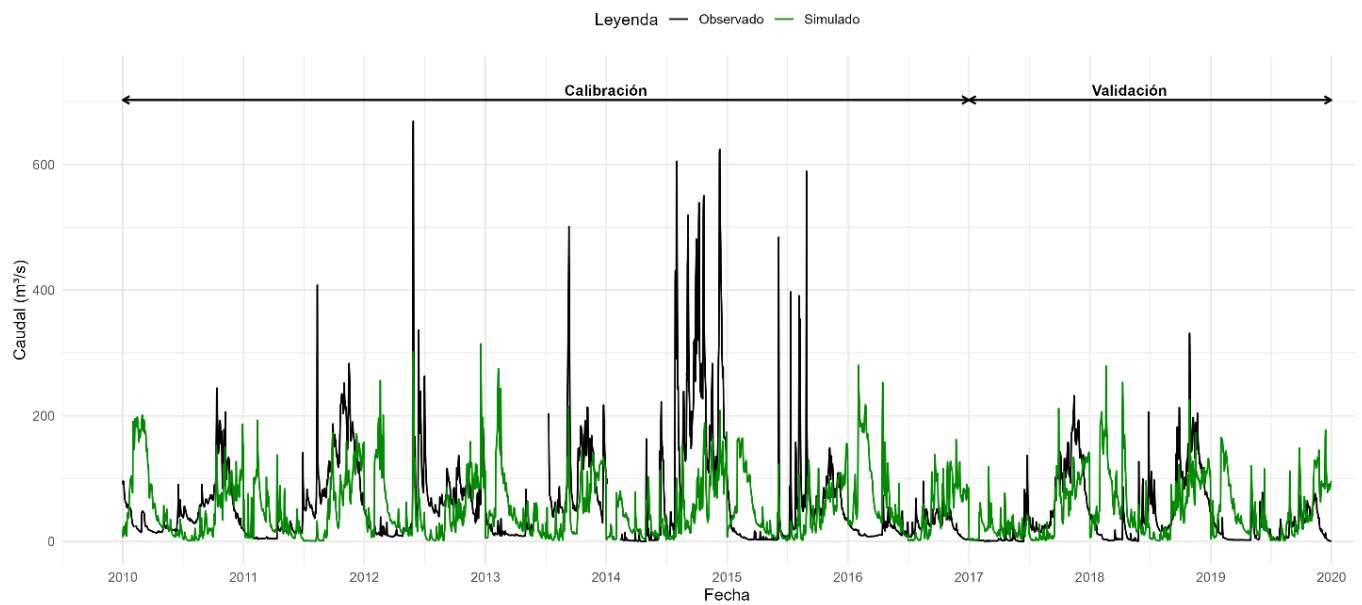
**Figura A. 16: Resultados de calibración y validación para estación Río Maule en Longitudinal, método estacionario**



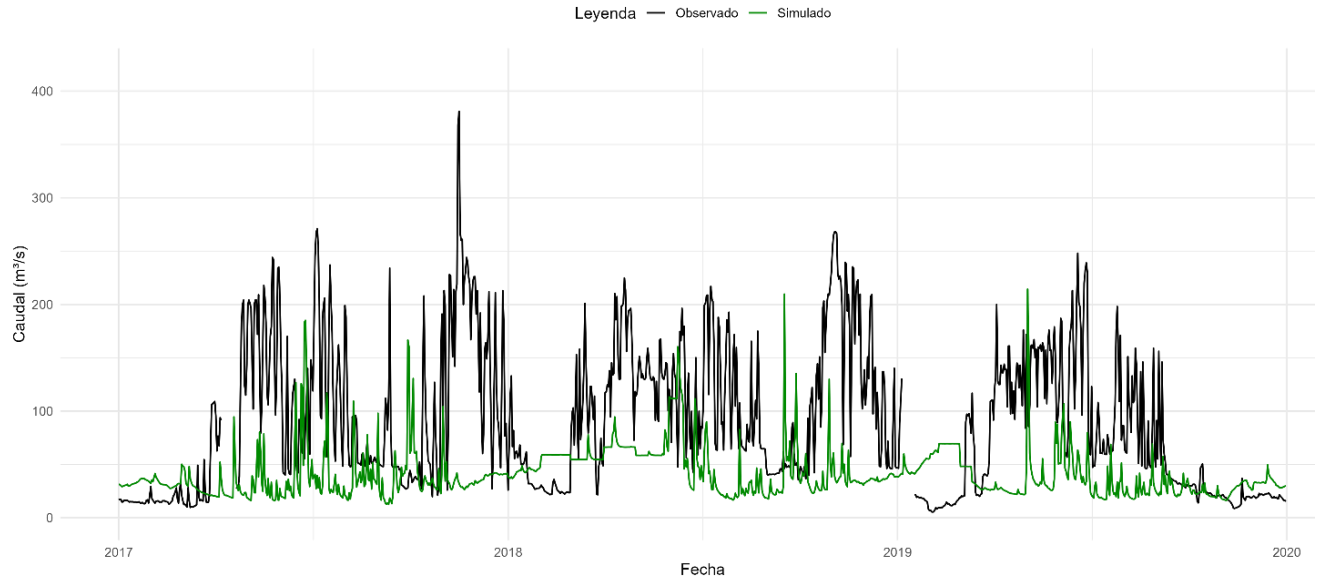
**Figura A. 17: Resultados de calibración y validación para estación Río Claro en San Carlos, método estacionario**



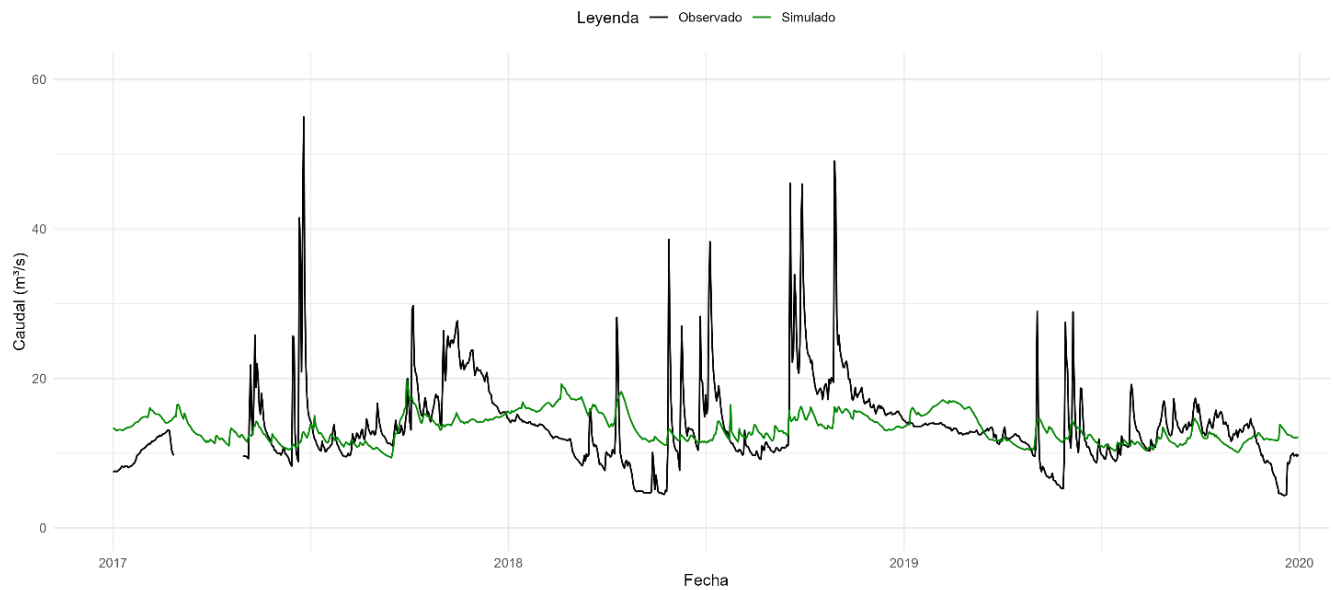
**Figura A. 18: Resultados de calibración y validación para estación Río Maule en Los Baños, método estacionario**



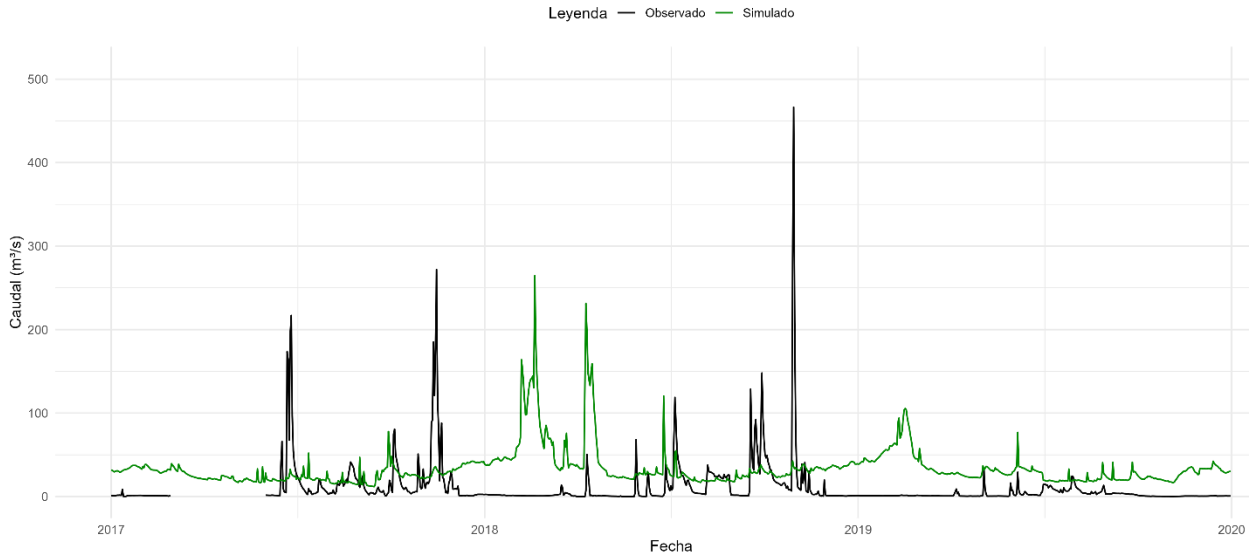
**Figura A. 19: Resultados de calibración y validación para estación Río Melado en El Salto, método estacionario**



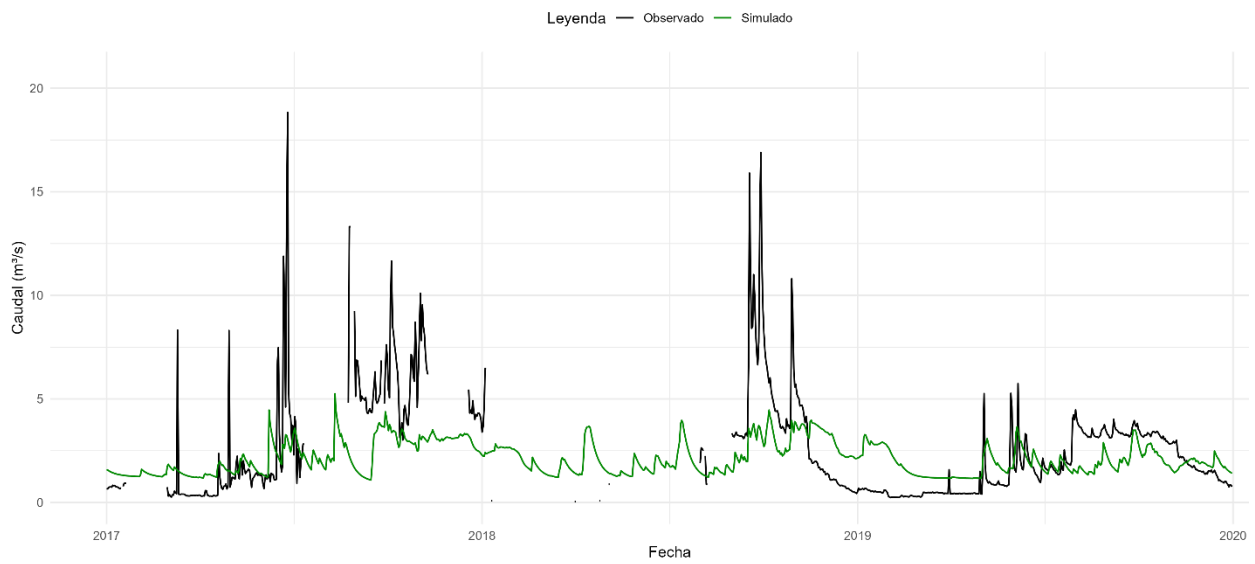
**Figura A. 20: Resultados de validación para estación Río Maule en Longitudinal, método estacionario**



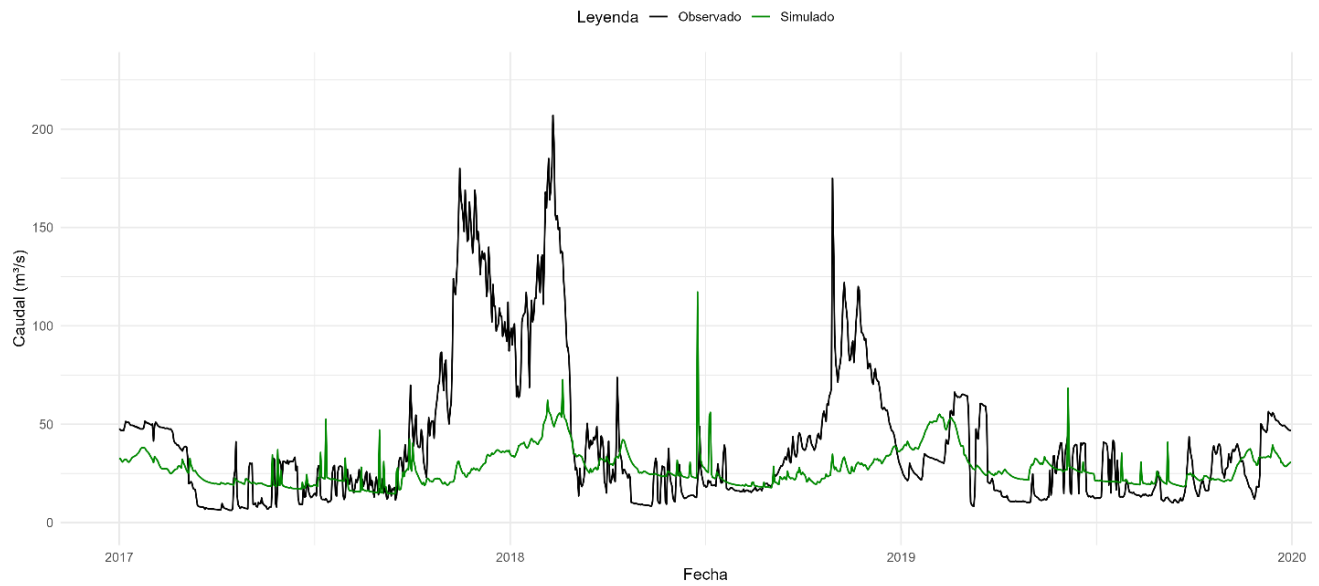
**Figura A. 21: Resultados de validación para estación Río Claro en San Carlos, método estacionario**



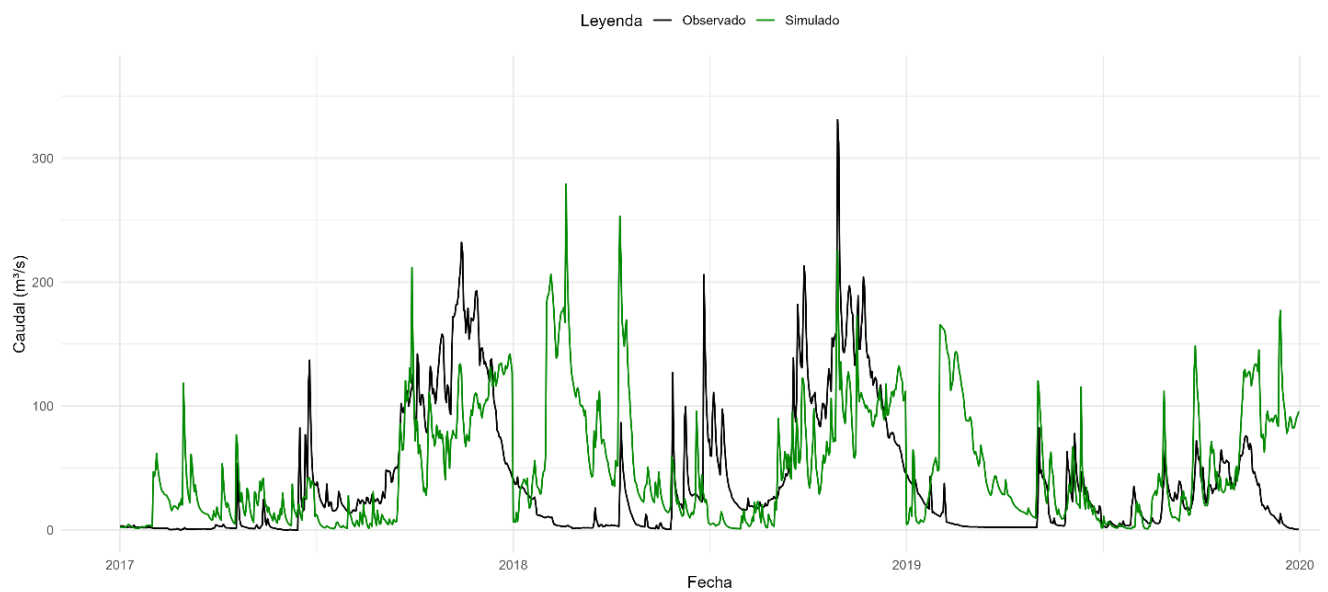
**Figura A. 22: Resultados de validación para estación Río Maule en Armerillo, método estacionario**



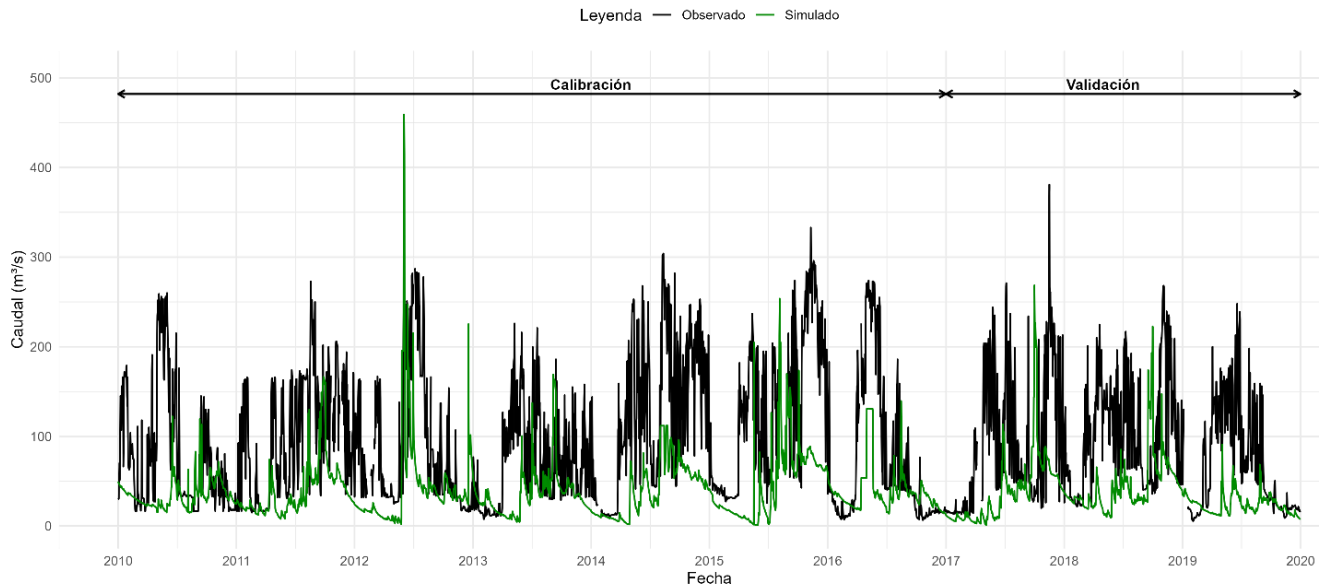
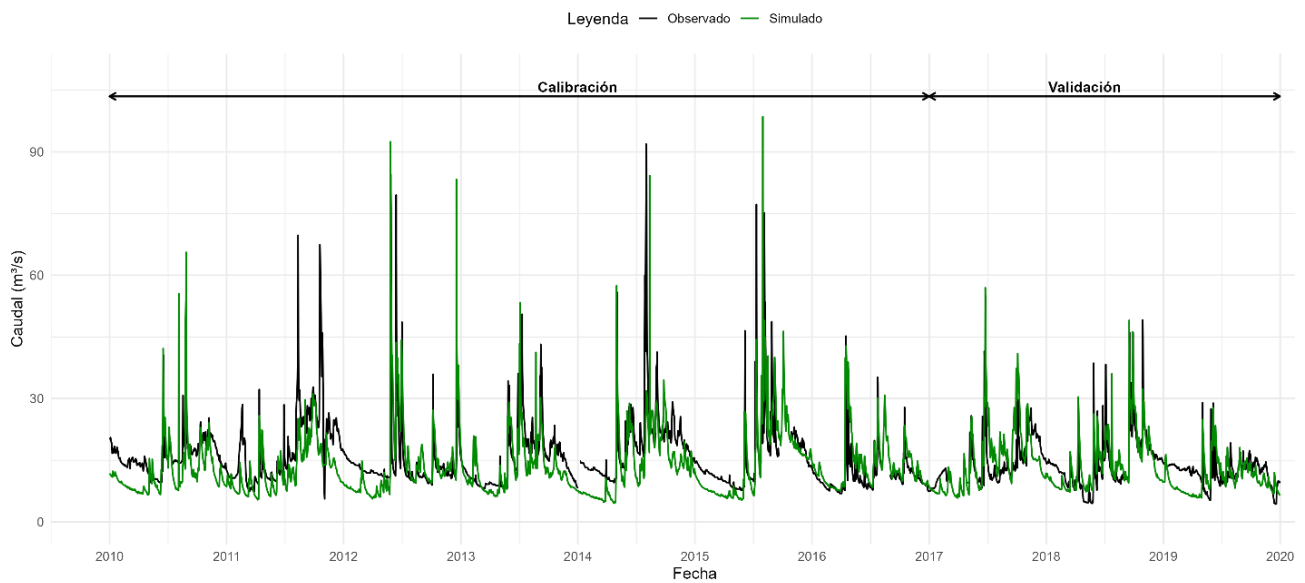
**Figura A. 23: Resultados de validación para estación Estero Las Garzas, método estacionario**

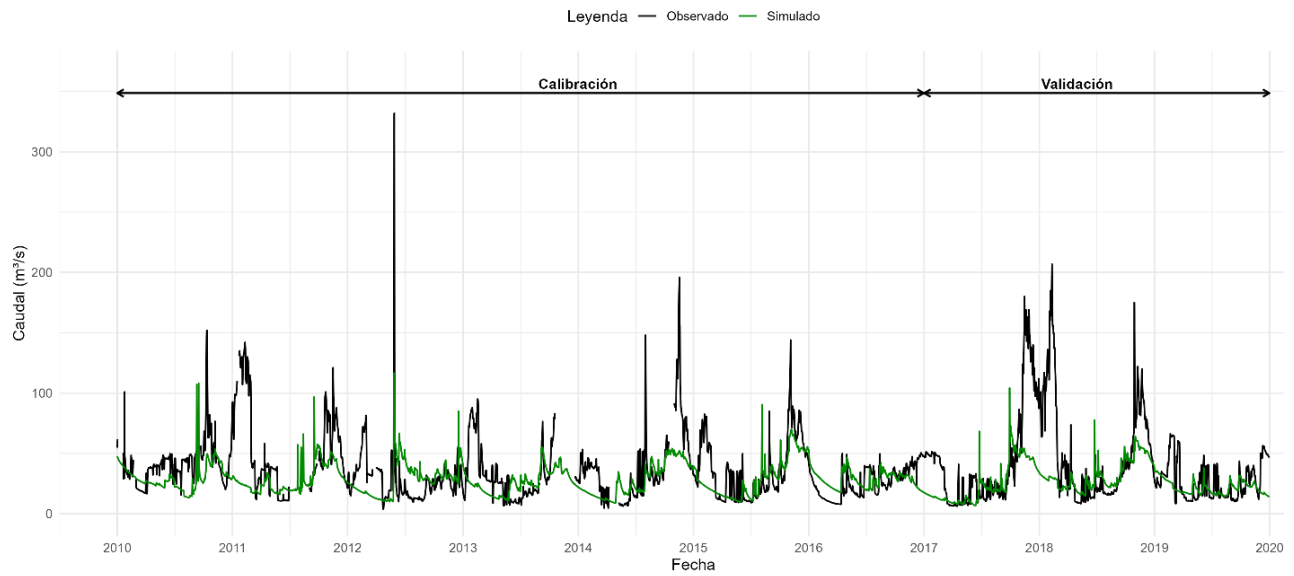


**Figura A. 24: Resultados de validación para estación Río Maule en Los Baños, método estacionario**

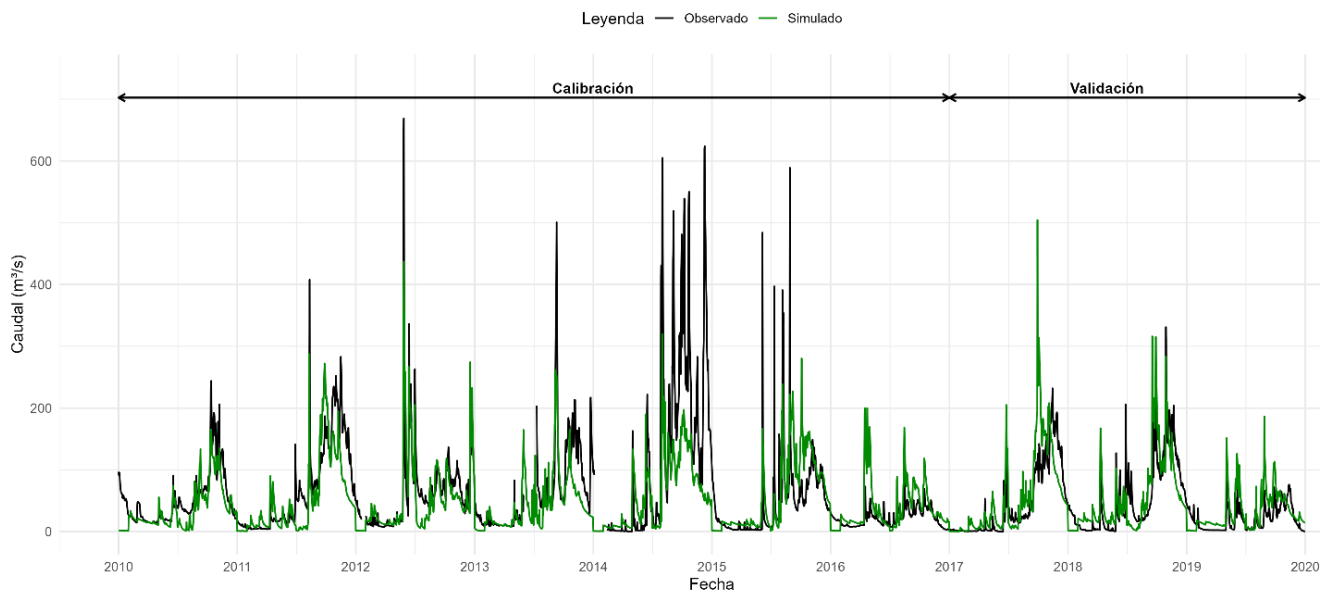


**Figura A. 25: Resultados de validación para estación Río Melado en El Salto, método estacionario**

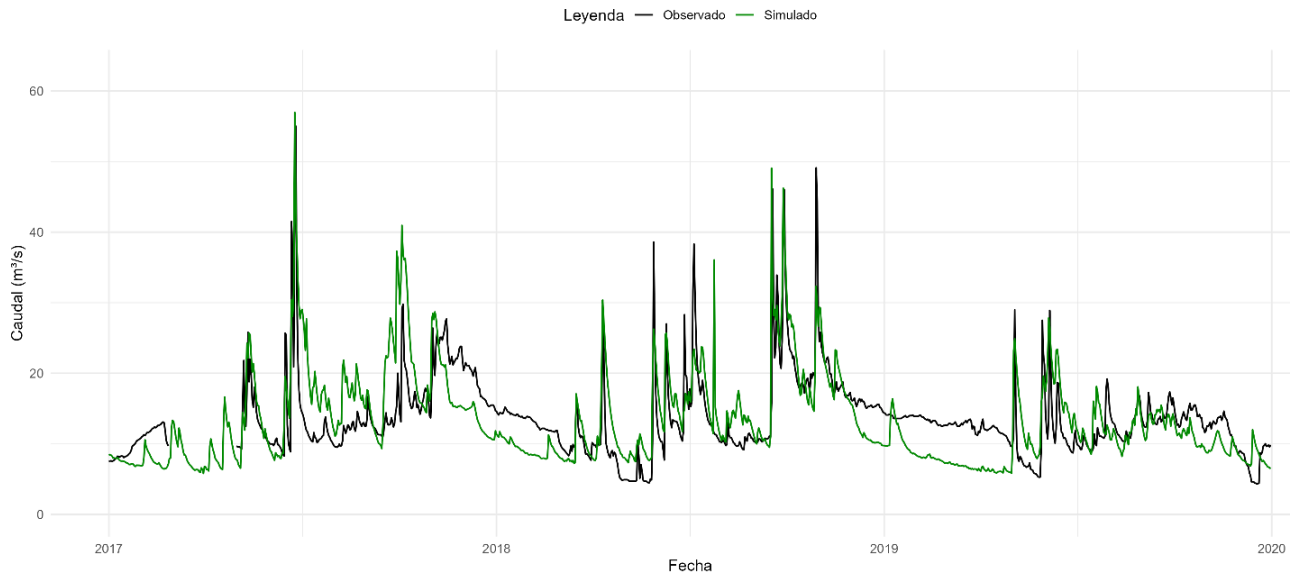
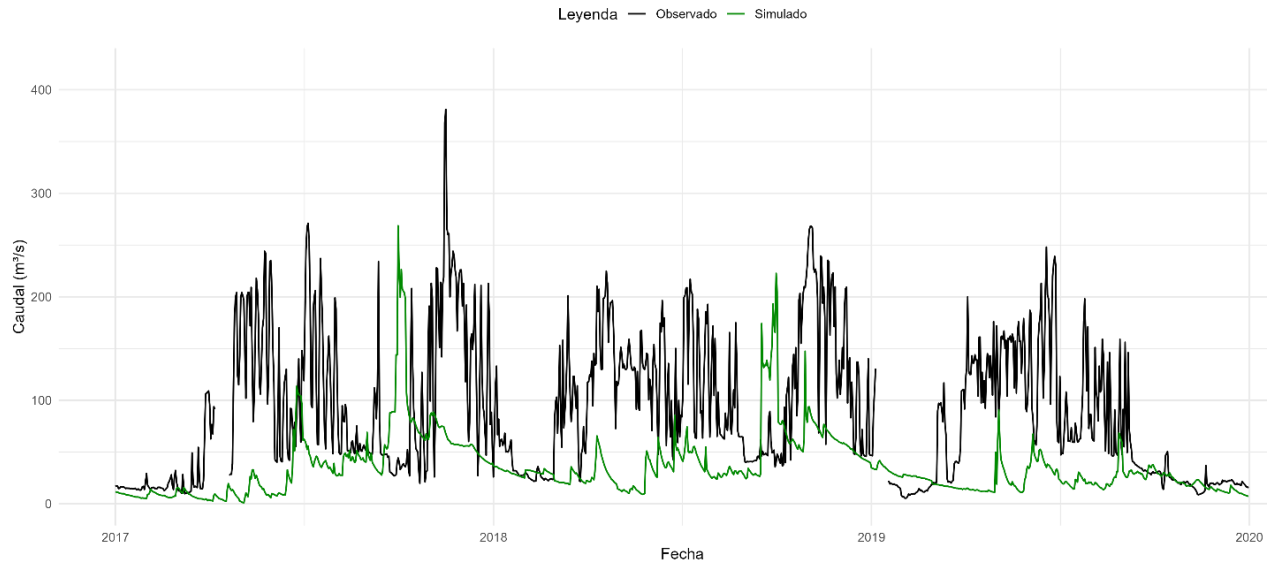
**Anexo 4.5: Resultados calibración y validación método estacionario****Figura A. 26: Resultados de calibración y validación para estación Río Maule en Longitudinal, método dinámico****Figura A. 27: Resultados de calibración y validación para estación Río Claro en San Carlos, método dinámico**

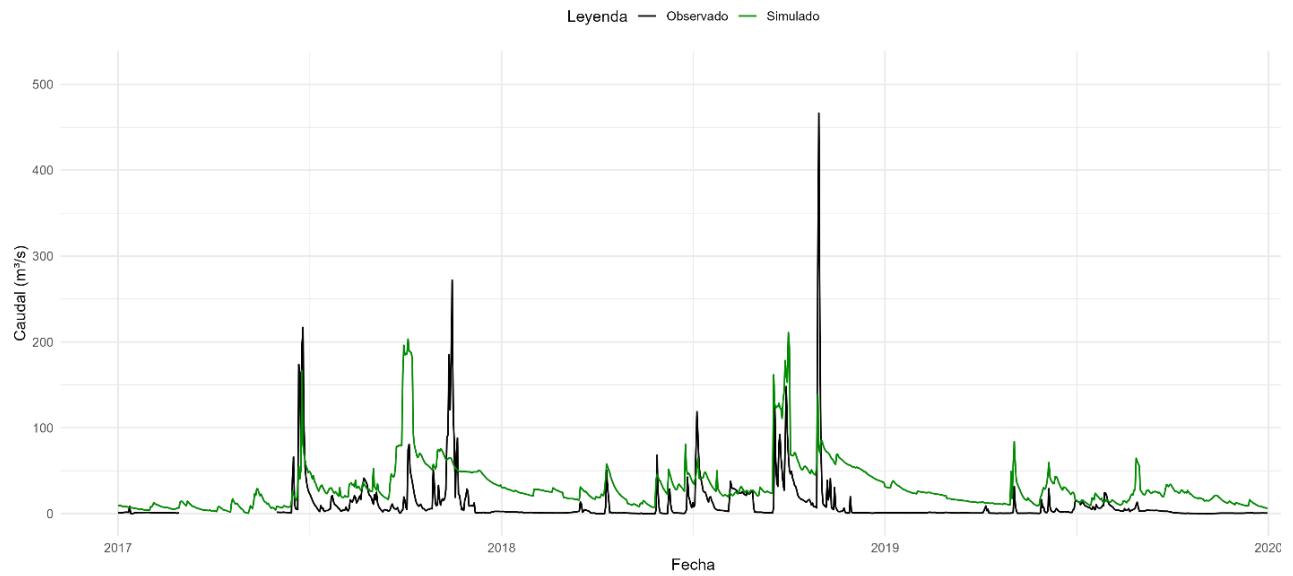


**Figura A. 28: Resultados de calibración y validación para estación Río Maule en Los Baños, método dinámico**

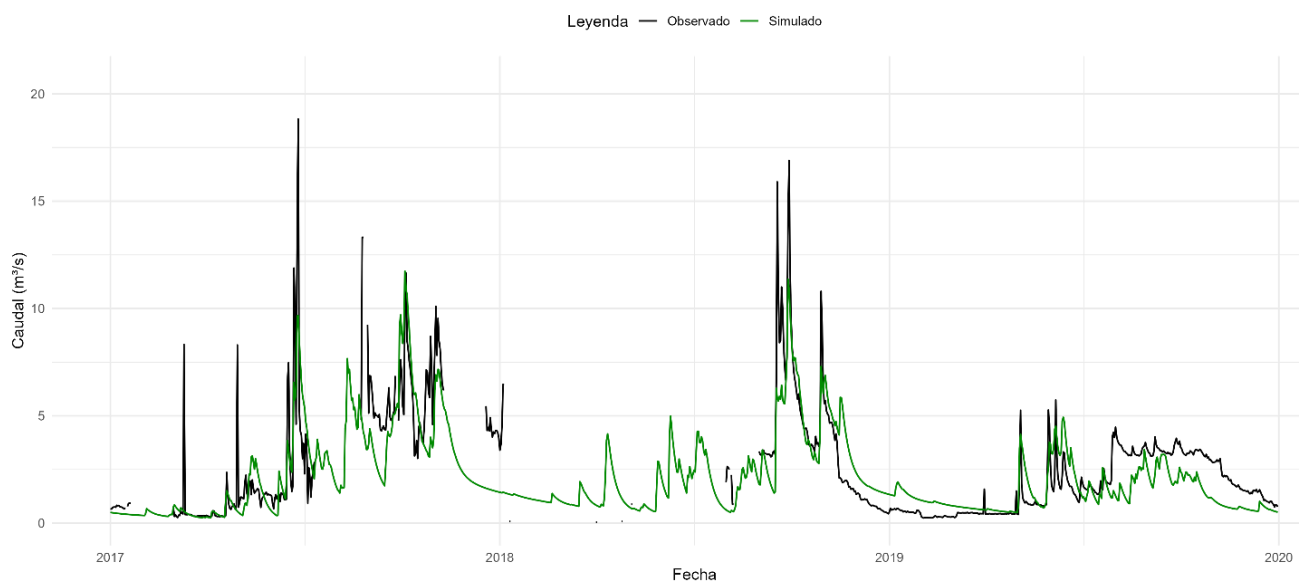


**Figura A. 29: Resultados de calibración y validación para estación Río Melado en El Salto, método dinámico**

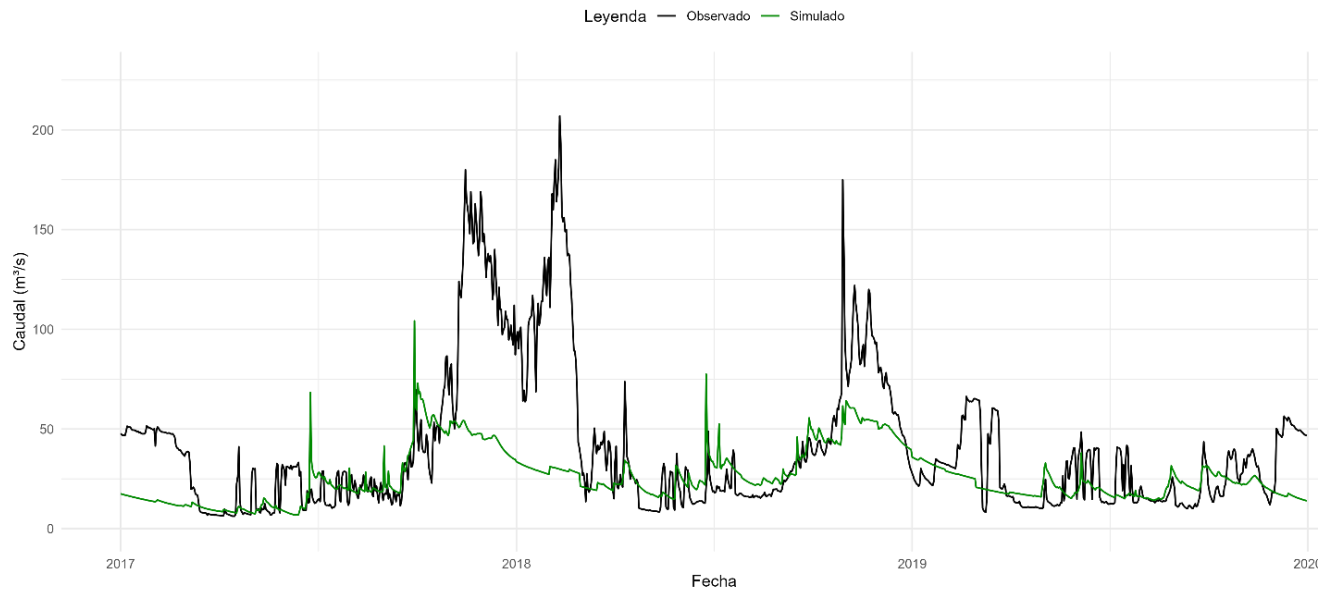




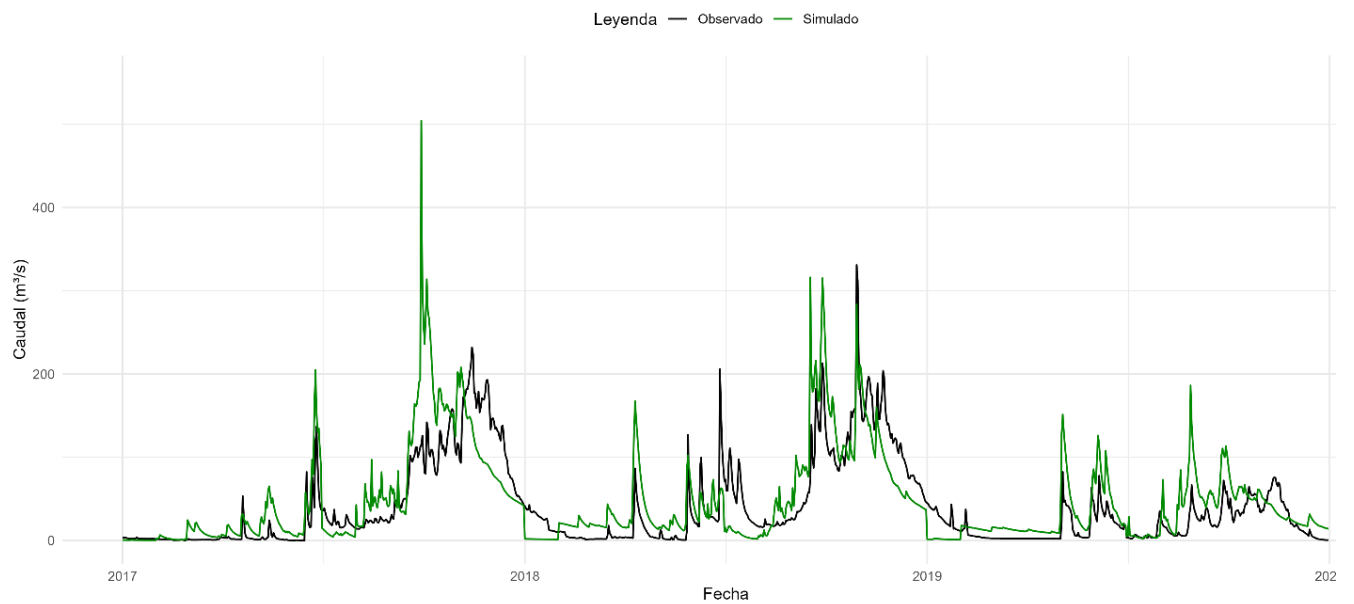
**Figura A. 32: Resultados de validación para estación Río Maule en Armerillo, método dinámico**



**Figura A. 33: Resultados de validación para estación Estero Las Garzas método dinámico**



**Figura A. 34: Resultados de validación para estación Río Maule en Los Baños, método dinámico**



**Figura A. 35: Resultados de validación para estación Río Melado en El Salto, método dinámico**

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

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Civil  
**Carrera** : Ingeniería Civil  
**Nombre del memorista** : Tomás Alejandro González Hernández  
**Título de la memoria** : Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Maule, ante escenarios de cambio de uso de suelo

**Fecha de la presentación oral** : Jueves 28 de agosto, 2025

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

**Resumen**

En los últimos años, la variabilidad climática y las transformaciones en el uso del suelo han ejercido una presión creciente sobre la disponibilidad de los recursos hídricos. Ante este escenario, la modelación hidrológica se ha convertido en una herramienta fundamental para comprender y proyectar el comportamiento de los caudales. Este estudio analiza la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Maule (Chile) frente a escenarios de cambio de uso de suelo, mediante la aplicación del modelo semidistribuido SWAT, calibrado y validado a escala diaria con la herramienta SWAT-CUP Premium. El periodo de calibración comprendió los años 2010 a 2016 y el de validación los años 2017 a 2019. Los datos de suelos, obtenidos de la base CLSoilMaps, fueron procesados y optimizados mediante análisis de correlación, componentes principales (PCA) y métodos de agrupamiento (K-Means y Silhouette). La información de usos de suelo se evaluó bajo dos enfoques: uno estacionario y otro dinámico, con interpolación temporal.

El desempeño del modelo, evaluado con indicadores como NSE, KGE,  $R^2$  y PBIAS, presentó resultados moderados, pero con mejoras consistentes al utilizar el enfoque dinámico frente al estacionario. Aunque el incremento en el ajuste fue limitado, la incorporación de variabilidad temporal en los usos de suelo y la calidad de los tipos de suelos generadas favorecieron una caracterización más realista de los procesos hidrológicos. Los resultados obtenidos constituyen un aporte para la planificación y gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Maule, así como una base de referencia para futuros trabajos orientados a mejorar la precisión y aplicabilidad de la modelación hidrológica bajo escenarios de cambio de uso de suelo.