



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental

**Análisis de la variación de la recarga en una Cuenca de montaña
Andina bajo escenarios de Cambio Climático**

Habilitación presentada para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Sebastián Ignacio Astudillo Opazo

Profesor Guía:

Dr. Víctor Manuel Parra Ramírez

CONCEPCIÓN (Chile), 2025

Análisis de la variación de la recarga en una Cuenca de montaña Andina bajo escenarios de Cambio Climático

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniero Ambiental

Alumno: Sebastián Ignacio Astudillo Opazo

Profesor guía: Víctor Manuel Parra Ramírez

CONCEPCIÓN (Chile), 2025

**“ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RECARGA EN UNA CUENCA DE MONTAÑA
ANDINA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO”**

Profesor Guía: Dr. Victor Parra Ramírez



Profesor Comisión: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza



Profesor Comisión: Dr. Alberto Araneda



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

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

Concepción, septiembre 2025

Índice

Contenido

1. Introducción	10
2. Hipótesis y Objetivos.....	12
2.1 Hipótesis de la investigación.....	12
2.2 Objetivo General.....	12
2.3 Objetivos Específicos	12
3. Antecedentes	13
3.1 Cambio Climático y la Crisis Hídrica en Chile	13
3.2 Acuíferos: Características y conceptos generales	15
3.3 Zonas de Alta Montaña y su Importancia en el Territorio Nacional	17
3.4 Modelación hidrológica	18
4. Área de estudio.....	20
5. Metodología	23
5.1 Recopilación de datos	23
5.3 Modelación hidrológica	25
5.3.1 Calibración y validación del modelo	27
5.3.2 Aplicación del modelo para escenario base y escenarios futuros de cambio climático	29
6. Resultados	32
6.1 Test de Mann-Kendall.....	32
6.2 Calibración y validación del modelo.....	34

6.3 Modelo HBV para escenario base	36
7. Discusión	42
7.1 Análisis de Tendencias.....	42
7.2 Modelación Hidrológica Para Escenario Base	43
7.3 Modelación Hidrológica Para Escenarios Futuros.....	44
7.4 Conclusiones y Recomendaciones	45
8. Bibliografía.....	47
9. Anexos.....	53

Índice de Figuras

Figura 1: Porcentaje de cambio en caudal medio anual para un escenario de aumento de temperatura de 2°C.....	11
Figura 2: Gráfico de anomalía porcentual de precipitación en Chile.....	14
Figura 3: Gráfico de anomalía en la temperatura media nacional.....	14
Figura 4. Tipo de porosidad. a) Porosidad Intergranular, b) porosidad secundaria por fracturas.	16
Figura 5: Área de estudio, Cuenca Río Perquillauquén En San Manuel.	21
Figura 6: Secuencias geológicas de la cuenca Río Perquillauquén en San Manuel.....	22
Figura 7: Ejemplo de aplicación del test de Mann-Kendall, para determinar la tendencia de precipitaciones.....	24
Figura 8: Diagrama conceptual del modelo HBV.	27
Figura 9: Proyección del cambio de temperatura.	30
Figura 10: Sectorización de proyecciones de precipitación y cambio porcentual de precipitaciones según sectorización.....	31

Figura 11: Polígono de la cuenca Río Perquilauquén en San Manuel sobre el área de sectorizaciones correspondiente a la guía del SEA (Zona K).	31
Figura 12: Gráfico de tendencias de Precipitaciones en Río Perquilauquén en San Manuel.....	33
Figura 13: Gráfico de tendencias de Temperatura en Río Perquilauquén en San Manuel.	33
Figura 14: Gráfico de caudales observados (azul) y simulados (rojo) en periodo de calibración (1990-2004).	34
Figura 15: Gráfico de caudales observados (azul) y simulados (rojo) en periodo de Validación (2005-2019).	36
Figura 16: Valores anuales de variables de la rutina respuesta para el modelo HBV, representadas en milímetros.	37
Figura 17: Valores de Q0 y Qp en comparación con la precipitación, para el periodo 1997-1999.	38
Figura 18: Valores de Q0 y Qp en comparación con la precipitación, para el periodo 2017-2019.....	38
Figura 19: Grafico de Boxplots de reducción porcentual de los escenarios futuros (M1 a M6) respecto al escenario base para las variables Q0 y Qp.....	39
Figura 20: Gráfico de dispersión anual para las variables Q0 y Qp para escenarios futuros vs escenario base.....	40
Figura 21: Gráfico de incertidumbre anual para Qp comparando la reducción porcentual de los escenarios futuros respecto al escenario base, Periodo 2035-2064.....	41
Figura 22: Gráfico de incertidumbre anual para Q0 comparando la reducción porcentual de los escenarios futuros respecto al escenario base, Periodo 2035-2064.....	41
Figura 23: Gráfico de reducción porcentual de las variables del modelo HBV para escenarios futuros, respecto el escenario base.....	42

Índice de Tablas

Tabla 1. Rango de los parámetros iniciales para el modelo HBV.....	28
Tabla 2. Criterio para el índice Nash-Sutcliffe (NSE).	29
Tabla 3. Variación de temperatura y precipitación para los escenarios futuros aplicados a la modelación.	32
Tabla 4. Parámetros óptimos para el modelo HBV.	35
Tabla 1 Anexo. Precipitaciones mensuales en base a datos diarios, aplicadas en modelo HBV53	
Tabla 2 anexo. Temperatura media Mensual en base a datos diarios, aplicadas al modelo HBV	54
Tabla 3 anexo. Caudales Observados mensuales en base a datos diarios, aplicados al modelo HBV	55

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, abuelos, padres, tíos, primos, hermanos, amigos, mi pareja y a mis profesores, por cada fragmento de apoyo que brindaron en este delicado proceso de habilitación profesional.

Un agradecimiento especial al Dr. Víctor Parra, quien no dudó en brindarme su apoyo, sus conocimientos y su compañía frente a mi formación académica y profesional.

En particular, agradecer a José H. Astudillo y María A. Opazo, mis padres, fundadores de mis valores y la incansable lucha por concretar mis sueños. Sin ellos no estaría forjando mi futuro profesional.

También dedicar este esfuerzo a mis difuntos, María Mercedes Arce, Juan Astudillo, Patricio Cancino, Teresa Torres, ángeles que guiaron y cuidaron mi camino frente a las dificultades de la vida.

Resumen

En Chile existe una creciente preocupación por los recursos hídricos, debido a que el país sufre más de una década de crisis hídrica, comprometiendo la disponibilidad del recurso en las poblaciones más vulnerables. Esto ha generado un mayor consumo de aguas subterráneas para abastecer a la población, como recurso complementario a los recursos superficiales. La superficie del país está constituida mayoritariamente por zonas montañosas, generando una diversidad de formaciones geológicas en el territorio, las cuales influyen en los procesos hidrológicos como es la recarga de los acuíferos. Este trabajo tiene como finalidad calcular la variación de la recarga en la cuenca del río Perquilauquén en San Manuel, bajo escenarios de cambio climático. En primer lugar, se realizó un test de Mann-Kendall para determinar la tendencia de las precipitaciones y temperaturas de la cuenca. En segundo lugar, se realizó una modelación hidrológica con el modelo HBV, considerando un periodo de 30 años [1990-2019] para calibrar y validar el modelo. Finalmente, se estimó la recarga para un escenario base del modelo y 6 escenarios de cambio climático. Los escenarios de cambio climático se basaron en la guía del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) “Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico”. La precipitación de la cuenca muestra un déficit considerable, sin embargo, la temperatura no mostró una tendencia significativa. Por otro lado, el modelo mostró un rendimiento satisfactorio con base en los indicadores NSE (Calibración=0.782; Validación=0.802) y TRMSE (Calibración=1.13; Validación=1.22). El modelo para el escenario base entregó un promedio anual de recarga (Q_p) de 440 mm y como resultado complementario, se obtuvo un promedio anual de escorrentía superficial (Q_0) de 3.11 m³/s. En los escenarios futuros se obtuvo un rango de reducción promedio para Q_p está entre 8,9 y 20,6%. Adicionalmente, para Q_0 se obtuvo un rango de reducción promedio entre 27,8% y 55,3%. No obstante, se obtuvieron porcentajes de reducción de hasta el 100% para Q_0 . Estos resultados indican que la escorrentía superficial (Q_0) es una variable crítica y más sensible que la recarga

(Q_p), ante la disminución de precipitaciones y el aumento de temperatura. A su vez, se pudo determinar que la recarga es una variable que no sufre una reducción importante para los escenarios proyectados.

1. Introducción

El agua es un recurso indispensable en nuestro planeta, siendo un pilar fundamental en la estructura de la vida y la sociedad en la que vivimos (Zaragoza, 2020). Este recurso se puede encontrar en distintas fuentes, como en el mar, ríos, lagos, glaciares, las nubes o en acuíferos. El agua dulce es nuestro pilar como sociedad humana, ya que todas nuestras actividades sociales y económicas dependen de su disponibilidad. A pesar de que el planeta está formado por grandes reservas de agua, la mayoría es agua de mar, y, por lo tanto, se requiere un proceso importante para poder usarla, ya sea para consumo o actividades económicas. Por otro lado, la mayor disponibilidad de agua dulce se encuentra principalmente en casquetes polares y acuíferos, dejando a las aguas superficiales como un recurso limitado y cada vez más escaso (Fernández, 2018).

El cambio climático es un fenómeno que nos mantiene en alerta, ya que en las últimas décadas se ha demostrado un incremento en la temperatura global, lo que implica un aumento en los procesos de transpiración y evapotranspiración en el ambiente. Por consecuencia, se diagnostican alteraciones en los patrones de la circulación atmosférica, intensidad y frecuencia de la precipitación. Como se aprecia en la Figura 1, el efecto del aumento de la temperatura global en la escorrentía es variable, por lo que estos cambios no son homogéneos y el impacto en el mundo se diversifica en cada región de nuestro planeta (Stehr et al. 2019).

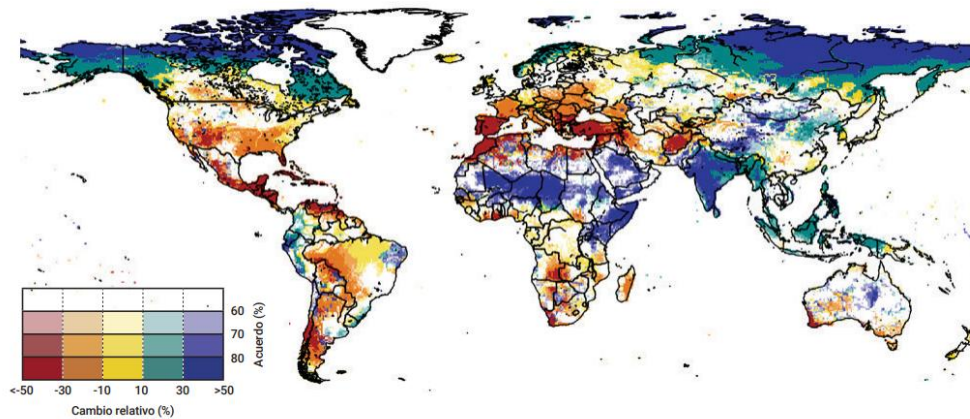


Figura 1: Porcentaje de cambio en caudal medio anual para un escenario de aumento de temperatura de 2°C. Fuente: Stehr et al. 2019.

Debido a las crecientes preocupaciones por el cambio climático, existe una evolución en metodologías e investigaciones hacia la seguridad y disponibilidad de los recursos hídricos, buscando alternativas eficientes para la gestión de los cuerpos de agua. Dentro de las estructuras que proveen una seguridad hídrica, las zonas de alta montaña se destacan por su rol frente al aporte y abastecimiento de los recursos hídricos, en particular hacia las zonas bajas. La distribución de los asentamientos urbanos está vinculada a la ocurrencia de grandes ríos (caudalosos), en donde el origen de estos comienza desde las zonas montañosas. Por lo tanto, en un entorno cambiante con crecimiento poblacional, se debe identificar la importancia que las montañas desempeñan en el suministro de agua, específicamente hacia las aguas de zonas más bajas. (Viviroli et al., 2007)

Las montañas son estructuras que cubren un 24% de la masa terrestre (Kapos et al., 2000), siendo un componente sumamente importante para el suministro de agua global, ya que por el efecto orográfico reciben mayor precipitación que las áreas de menor altitud. Adicionalmente, estas zonas experimentan menor evapotranspiración y contienen grandes reservas de agua debido a los grandes depósitos de aguas subterráneas y a la acumulación de nieve y hielo (Lauren & McKenzie, 2020). Si bien las estructuras montañosas ofrecen un amplio reservorio de

agua, las condiciones actuales de aumento de temperatura y disminución de precipitaciones son condiciones que afectan negativamente a la disponibilidad de agua. Sin embargo, el agua subterránea (agua en el subsuelo en la zona saturada) en entornos de alta montaña puede proporcionar resiliencia frente a los impactos hidrológicos del cambio climático en las regiones montañosas altas (Lauren & McKenzie, 2020).

La disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y la creciente dependencia del agua subterránea como fuente estratégica de abastecimiento son aspectos importantes que motivan esta investigación. Comprender el comportamiento de los acuíferos es esencial para mejorar la gestión de este recurso. En este contexto, es fundamental analizar cómo el cambio climático influye en la recarga de los acuíferos en una región montañosa del país, ya que permitirá anticipar escenarios de escasez y optimizar la gestión sostenible del agua subterránea.

2. Hipótesis y Objetivos

2.1 Hipótesis de la investigación

La disminución de la precipitación y aumento de la temperatura no generarán una reducción importante de la recarga de aguas subterráneas en la cuenca del río Perquilauquén.

2.2 Objetivo General

Evaluar la diferencia en el comportamiento de recarga en una cuenca de montaña andina, producto de la disminución de precipitaciones y aumento de temperatura por efecto del cambio climático.

2.3 Objetivos Específicos

- Determinar las tendencias de precipitación y temperatura producto del cambio climático.

- Estimar la recarga base en la cuenca del río Perquilauquén en San Manuel mediante el uso del modelo HBV.
- Estimar la variación de la recarga bajo escenarios futuros de cambio climático.

3. Antecedentes

3.1 Cambio Climático y la Crisis Hídrica en Chile

El contexto nacional frente al cambio climático es desfavorable en términos de disponibilidad hídrica, afectando a la población sensible de nuestro país, como, por ejemplo, los agricultores y la población rural. Existen estudios que demuestran las variaciones climáticas en Chile, siendo el Reporte Anual de la Evolución del Clima en Chile, en adelante, “RAECCh” (DGAC, 2025), un documento que presenta la condición actual de nuestro país en términos climáticos. Dentro de los objetivos del documento se destacan los cambios de precipitación y temperatura existentes en el país, los cuales se comparan en función de promedios históricos para determinar las condiciones actuales que enfrenta el territorio nacional.

En la Figura 2 se observan los superávit y déficit de precipitaciones anuales en Chile, demostrando que existe una tendencia que va en descenso. Con este año, se completan 18 años consecutivos con precipitaciones anuales menores respecto al promedio del período 1961-1990, lo que ha contribuido a consolidar la escasez hídrica que afecta al país. (RAECCh, 2025). Otra evidencia que caracteriza el cambio climático es el incremento en la temperatura media nacional (Figura 3).

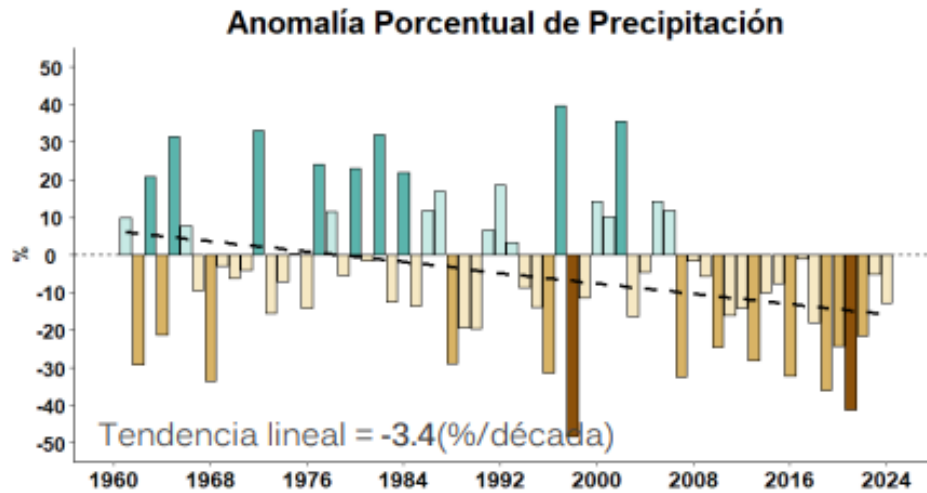


Figura 2: Gráfico de anomalía porcentual de precipitación en Chile. Fuente: Dirección Meteorológica de Chile, 2025.

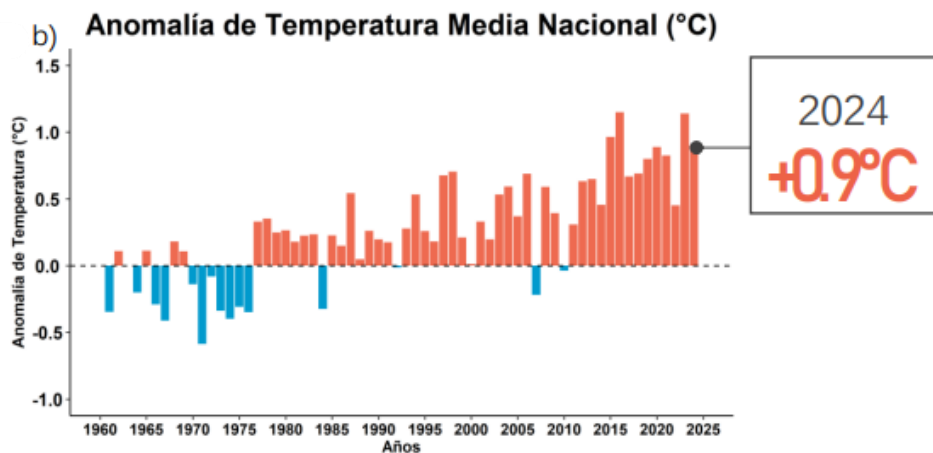


Figura 3: Gráfico de anomalía en la temperatura media nacional. Fuente: Dirección Meteorológica de Chile, 2025

En los últimos años Chile ha experimentado una prolongada sequía producto del déficit de precipitaciones. Esto ha desencadenado procesos críticos como la disminución de caudales, reservas de aguas en la cabecera de los ríos y el retroceso de glaciares. La falta de disponibilidad de este recurso ha provocado el desplazamiento de cultivos agrícolas hacia el sur, consecuencia que muestra el conflicto actual comprometido por la escasez hídrica (CR2, 2015). Un evento particular que refuerza este punto fue la sequía de 1998 que perjudicó al país. Esta sequía

desencadenó una perceptible crisis económica y social, tanto por el alza de los alimentos como por los racionamientos del agua de riego y de la energía eléctrica, los cuales afectaron a diversos sectores productivos y a la ciudadanía en general (Camus et al., 2023).

Debido a la falta de disponibilidad hídrica superficial, el uso de las aguas subterráneas ha tenido un importante aumento en el territorio nacional, incrementando la implementación de pozos en las zonas rurales. Un 47,2% de los habitantes de sectores rurales no tienen abastecimiento regular. De estos, un 58,8% se abastece desde pozos; un 25,8% desde ríos, esteros, canales o vertientes, y un 15,4% lo hace recurriendo a camiones aljibes. (Espinoza et al., 2020).

Considerando la evidente dependencia de las localidades rurales más vulnerables de abastecerse de agua potable, es necesario buscar las condiciones y características de las aguas subterráneas para conocer el estado actual que tienen estas grandes reservas de agua. Para esto se necesita comprender los procesos involucrados (recarga, almacenamiento y liberación), los cuales determinan cómo se comporta un acuífero de acuerdo con ciertas características en su estructura geológica, brindando un acercamiento a la sensibilidad que puede poseer frente a estas condiciones meteorológicas, debido a la diversidad de sus comportamientos físicos.

3.2 Acuíferos: Características y conceptos generales

El agua subterránea se encuentra almacenada en depósitos geológicos llamados acuíferos. Un acuífero es una Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad (Sánchez, 2012). Cada acuífero posee características propias del área en donde se ubica, configurando estructuras que se relacionan directamente con sus características físicas y su comportamiento. En los acuíferos existen los procesos de almacenamiento y liberación, los cuales dependen de sus características hidrogeológicas. Dentro de las características que definen a un acuífero, la estructura según su litología es una característica destacable, ya que según el tipo de litología se pueden clasificar en acuíferos

porosos, cársticos y/o fracturados. Cada tipo de acuífero tendrá características asociadas a la litología que lo compone, definiendo el comportamiento de la recarga y el movimiento del agua en el acuífero.

En el caso de las formaciones porosas se encuentran rocas como gravas, arenas o arcillas, en donde su permeabilidad depende de la porosidad intergranular (Figura 4.a). El espacio entre poros determina el flujo del agua hacia el acuífero, brindando una tendencia hacia una alta permeabilidad (Sánchez, 2012). Por otro lado, los acuíferos fracturados están formados por rocas consolidadas como areniscas, basaltos o granitos, mientras que los acuíferos cársticos están formados por rocas carstificadas como calizas, dolomías o yeso. (Werner, 1996). A pesar de que las formaciones de los acuíferos fracturados y carsicos son distintas, estos poseen comportamientos similares en la permeabilidad de los acuíferos, y su respectiva porosidad secundaria, caracterizándose por una porosidad por fisuración (Figura 4.b). El comportamiento de la porosidad frente a las formas intergranulares es menor, pero la permeabilidad sigue siendo variable dependiendo del tamaño y forma de la fractura (Werner, 1996).

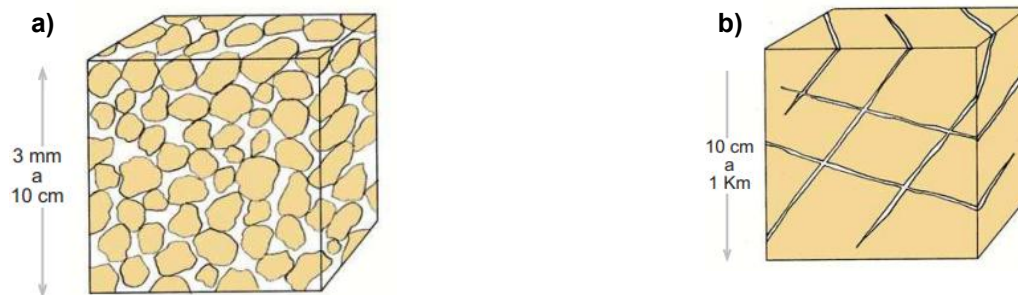


Figura 4. Tipo de porosidad. a) Porosidad Intergranular, b) porosidad secundaria por fracturas.

Fuente: (Sánchez, 2012)

Comprender la litología en los acuíferos es necesario para entender cómo ocurren los procesos de recarga y almacenamiento de aguas subterráneas. Determinando estas diferencias litológicas entre acuíferos entra en la dinámica de la capacidad de recarga en los acuíferos, ya que este fenómeno tiene una dependencia de la permeabilidad y porosidad que ofrece cada estructura.

La recarga se define como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde forma parte de las reservas subterráneas. La recarga se produce por infiltración de la precipitación, infiltración desde aguas superficiales, es decir, a través de ríos y lagos, o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos (Vélez et al. 2004).

3.3 Zonas de Alta Montaña y su Importancia en el Territorio Nacional

Las estructuras montañosas en Chile abarcan la mayoría del territorio nacional. El 63% de nuestro territorio está conformado por estas estructuras, siendo el segundo país con mayor superficie relativa de montañas. (MMA, 2018).

En la zona central de Chile, la precipitación es causada por sistemas frontales provenientes del Océano Pacífico. Al ingresar al continente, estos sistemas son desviados por la presencia de la Cordillera de los Andes, la cual constituye una importante barrera orográfica que regula el clima en Sudamérica (Garreaud et al., 2009). Debido a esto, la Cordillera de los Andes recibe una mayor precipitación constituyendo una zona activa de recarga de aguas subterráneas, principalmente producto de los procesos de infiltración y transporte que se producen en los valles, cauces y sistemas fracturados, existentes tanto en las zonas altas como en la precordillera (Carling *et al.*, 2012).

Entendiendo que las estructuras geológicas influyen en los procesos físicos del acuífero, la predominancia de zonas montañosas es un factor importante para entender el comportamiento de procesos como la recarga en los acuíferos del territorio, debido a las características geológicas que destacan a estas zonas. La Cordillera de los Andes, tiene como predominancia una extensa composición volcánica. La precordillera de los Andes comparte esta estructura, acompañada de formaciones sedimentarias. (DGA, 2004).

Es importante destacar el rol que tiene la Cordillera de los Andes para abastecer los recursos hídricos en el Valle Central, debido a la mayor precipitación que ocurre por el efecto orográfico.

Las zonas de montaña entregan esta agua a través del flujo de ríos a las áreas pobladas en elevaciones más bajas. (Markovich et al. 2019)

Una forma que explica la función de la Cordillera de los Andes en el abastecimiento hídrico es cómo los sistemas montañosos recargan los acuíferos de tierras bajas, a través de procesos de recarga en el frente montañoso (MFR: Mountain-Front Recharge) y recarga en bloque montañoso (MBR: Mountain-Block Recharge) (Wilson & Guan, 2004). MFR se define generalmente como toda el agua que entra en un acuífero de tierras bajas con su fuente en el bloque montañoso. MBR, un componente de MFR, es el flujo subterráneo de aguas subterráneas hacia el acuífero de tierras bajas que proviene directamente del bloque montañoso. Un bloque montañoso es un área de terreno topográficamente elevado y accidentado donde los suelos y sedimentos no consolidados son delgados o inexistentes, de modo que el subsuelo superficial está compuesto predominantemente de roca madre (Markovich et al. 2019). Por lo tanto, estos procesos se relacionan con las estructuras geológicas que predominan en la Cordillera de los Andes, ya que estas formaciones permiten el traspaso de los flujos desde los acuíferos de montaña hacia los del Valle Central.

3.4 Modelación hidrológica

Las metodologías para estimar la recarga en acuíferos son diversas, pero tienen un grado de complejidad. Esto se debe a que la recarga es un proceso que es difícil de observar y cuantificar. Las metodologías comúnmente usadas para determinar la recarga están normalmente sujetas a grandes incertidumbres y/o errores en las mediciones de ciertos parámetros o procesos. (Rivera et al. 2023). Sin embargo, se han diseñado herramientas para simplificar el comportamiento de las cuencas y los acuíferos, siendo la modelación un método eficaz para estudiar y entender la dinámica en los procesos físicos que ocurren en las cuencas o acuíferos. Los modelos numéricos son herramientas fundamentales para estudiar procesos hidrológicos y características del flujo en el subsuelo, permitiendo simular respuestas hidrológicas de la vegetación, los suelos y los

acuíferos ante influencias externas (Rivera et al. 2023). Los modelos hidrológicos conceptuales son ampliamente utilizados en las investigaciones, y su aplicación depende de la disponibilidad de recursos, información y tiempo para determinar cierto estudio en un acuífero. Existen modelos que representan la respuesta efectiva de una cuenca entera, sin caracterizar explícitamente la variabilidad espacial de la respuesta, es decir, los parámetros se consideran como homogéneos desde el punto de vista hidrológico (Ramírez, 2013). Los modelos hidrológicos conceptuales simulan de forma simplificada los procesos hidrológicos que ocurren en un sistema, pero, a pesar de ser una simplificación, los modelos agregados han demostrado proporcionar resultados fiables para diversos tipos de aplicaciones (Parra et al. 2018). Esta simplificación permite la obtención de los comportamientos y procesos físicos de una cuenca con información limitada, brindando un resultado igualmente válido respecto a los otros modelos. Dentro de estos procesos se encuentran la recarga de acuíferos, la escorrentía subsuperficial y la escorrentía superficial.

Citando a los investigadores Toledo y Galvis (2022), los modelos hidrológicos contienen dentro de sus componentes parámetros que se deben ajustar al lugar específico que se esté evaluando, comparando las observaciones con respecto a los resultados obtenidos del modelo, lo que se define como calibración, para posteriormente evaluar la confianza de los resultados, es decir, el rendimiento de éste, lo que llamamos validación.

Estos procesos son fundamentales a la hora de aplicar este modelo hidrológico en la investigación, ya que brindan robustez al procesamiento de los datos y la obtención de los resultados.

Cada modelo tiene su ventaja en comparación con otras metodologías que requieren inversiones costosas y aplicación de herramientas o infraestructuras que demandan un tiempo determinado. Por ende, utilizar modelos hidrológicos conceptuales/matemáticos para el estudio de diferentes procesos, como son los asociados a las aguas subterráneas, es fiable y validado por muchos investigadores.

4. Área de estudio

El Área de estudio corresponde a la cuenca del Río Perquillauquén (Figura 5). La cuenca de drenaje tiene un área aproximada de 502.4 km² y está ubicada entre la región del Maule y Ñuble (Lat. -36.38, Lon. -71.62). Su altitud varía entre los 2230 y 225 msnm, con una altitud media de 1100 msnm, distribuyéndose entre la precordillera y Cordillera de los Andes.

La precipitación media anual en la cuenca es de 1996 mm/año (Alvarez-Garreton et al., 2018). El régimen hídrico del río es predominantemente pluvial, con influencia nival en invierno. Además, existe un incremento en las precipitaciones en las cercanías de la cordillera, debido al efecto orográfico que produce la Cordillera de los Andes (Muñoz, 2015). Por otro lado, en la cuenca predomina geología asociada a formaciones volcanosedimentarias, seguidas de formaciones volcánicas y pequeñas secciones de formaciones sedimentarias (SERNAGEOMIN. 2003). La Figura 6 muestra la geología predominante en la cuenca.

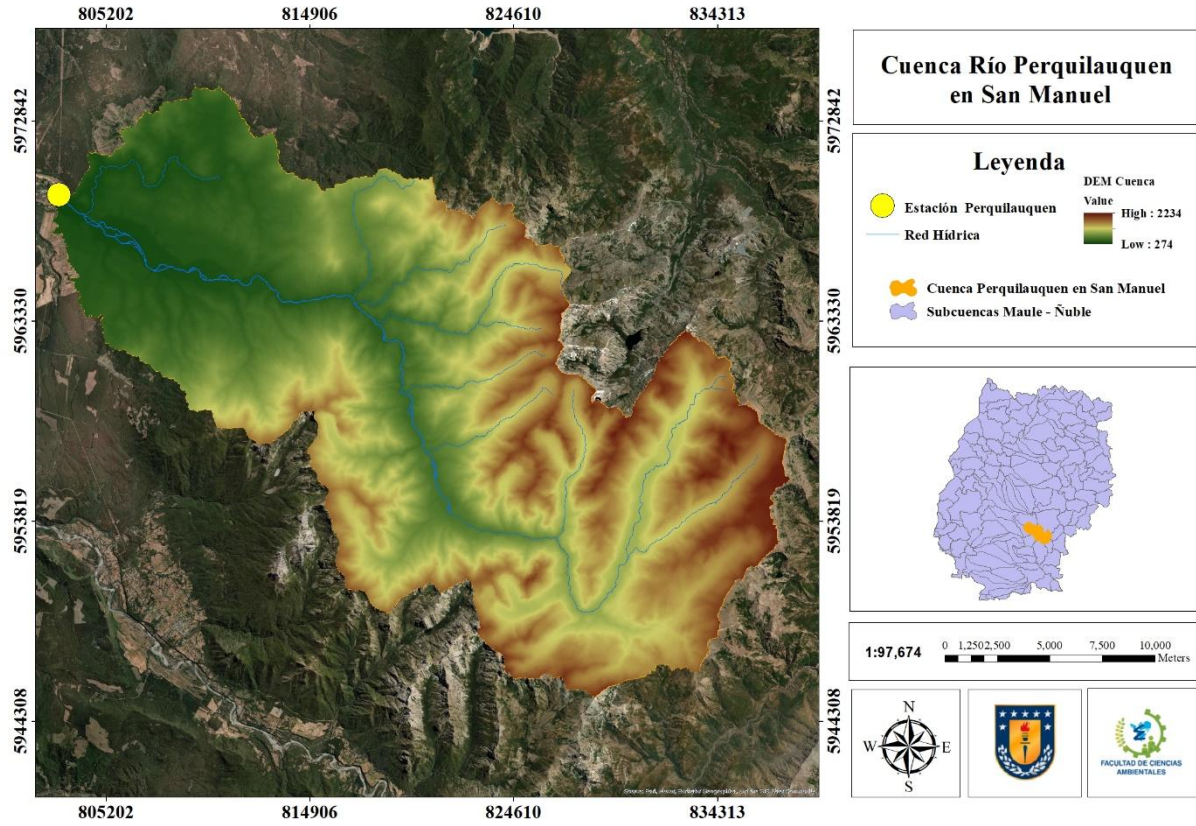


Figura 5: Área de estudio, Cuenca Río Perquillauquén En San Manuel.

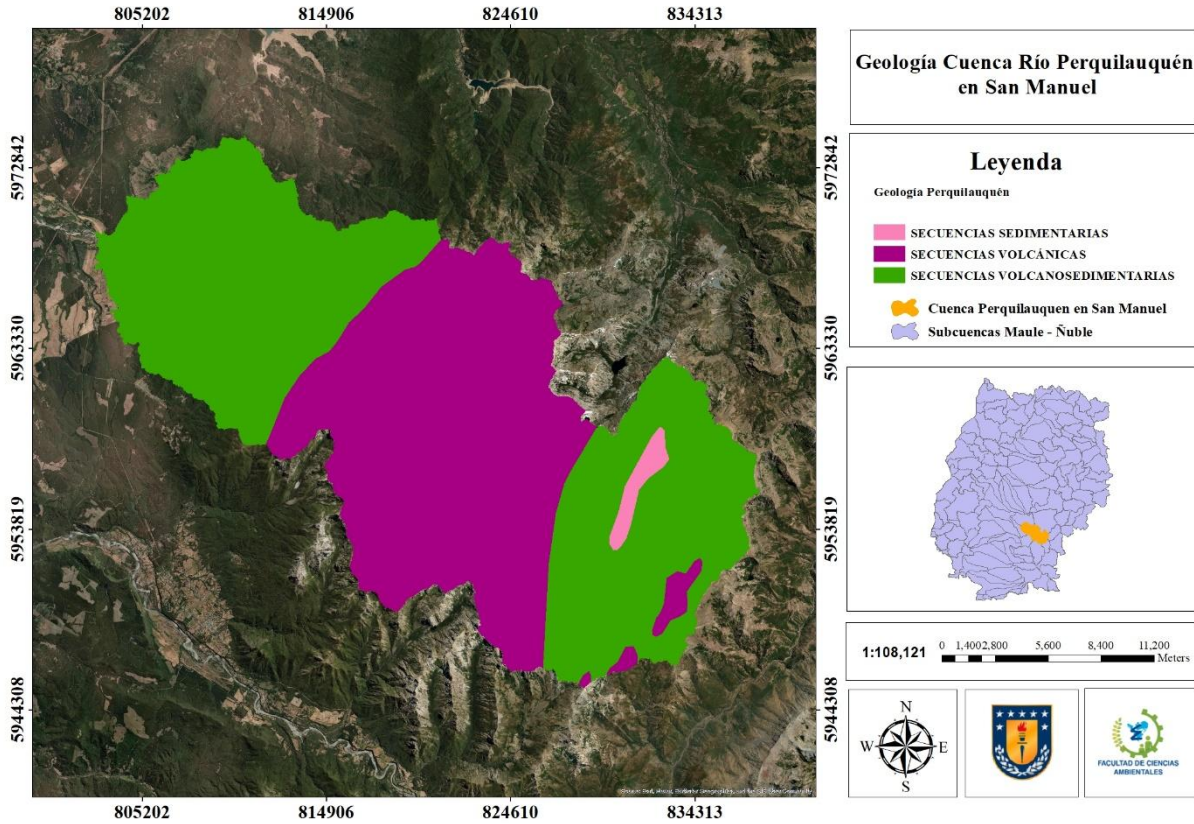


Figura 6: Secuencias geológicas de la cuenca Río Perquiilauquén en San Manuel. Nota Elaboración en base a Mapa geológico escala: 1:1.000.000, SERNAGEOMIN (2003).

5. Metodología

5.1 Recopilación de datos

Para cumplir con el objetivo se utilizaron distintas fuentes de información públicas. En primer lugar, se obtuvieron los DEM necesarios para realizar los mapas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). En segundo lugar, del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) se obtuvo el mapa geológico de Chile, el cual se procesó mediante herramientas SIG para obtener la geología de la cuenca del río Perquilauquén en San Manuel. En tercer lugar, se recopiló información hidrometeorológica como precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal para el periodo 1990-2019, abarcando un registro histórico de 30 años. Esta información se obtuvo del explorador Camels-CR2. Finalmente, se utilizó la guía “Criterio de evaluación del SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico”, del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), la cual ofrece proyecciones de cambio climático.

5.2 Análisis de tendencias

Se utilizó el test de Mann-Kendall, el cual es ampliamente usado en hidrología, para analizar la tendencia de la precipitación y la temperatura en el área de estudio. El test de Mann-Kendall es un test no-paramétrico que se utiliza para evaluar la tendencia en series de datos ambientales. El test consiste básicamente en la comparación entre los valores que componen una misma serie temporal, en orden secuencial (Silva et al. 2017). El test de Mann-Kendall se realizó en el software “XLSTAT”, el cual es una herramienta extendida en Excel. Esta herramienta permite seleccionar los datos meteorológicos en serie y aplicarlos según la temporalidad de estos (estacional o no estacional), obteniendo la tendencia de nuestra serie de tiempo. El complemento XLSTAT de análisis estadístico ofrece una amplia variedad de funciones para mejorar las capacidades de análisis de Excel, por lo que es una herramienta ideal para el análisis de datos

(Crespo, 2016). Dentro de la metodología que utiliza el la herramienta XLSTAT para aplicar este test, se encuentran las ecuaciones estadístico de Mann-Kendall (Ecuacion 1) y test de Mann-Kendall (Ecuacion 2). Con base en la aplicación de esta herramienta estadística se obtuvo el resultado de la tendencia para la precipitación y temperatura histórica. A modo de ejemplo, se puede observar la Figura 7, en la cual se utilizó la herramienta XLSTAT para aplicar el test de Mann-Kendall.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Sgn}(x) = \begin{cases} +1; & x > 0 \\ 0 & ; x = 0 \\ -1; & x < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 2}$$

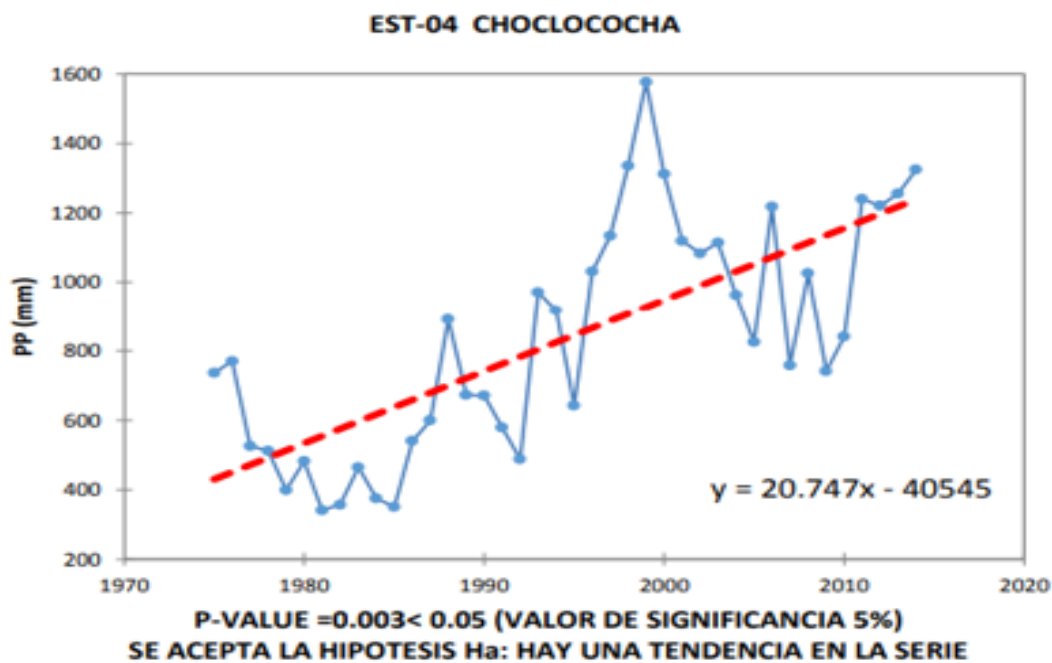


Figura 7: Ejemplo de aplicación del test de Mann-Kendall, para determinar la tendencia de precipitaciones. Fuente: W. Crespo, 2016.

5.3 Modelación hidrológica

El modelo que se utilizó para estimar la recarga, en esta investigación, es el modelo hidrológico conceptual semidistribuido HBV, el cual consiste en un modelo de balance hídrico pluvio-nival simplificado. El modelo simula el caudal de una cuenca, basado en series de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (Bergström, 1992). El modelo se compone de diferentes rutinas para simular la descarga, entre ellas, una rutina de nieve, una rutina de suelo y una rutina de respuesta (Parra et al. 2017). La selección de este modelo corresponde a la limitación de los datos disponibles para simular los procesos hidrológicos en la cuenca del río Perquilauquén en San Manuel. Esto se debe a que el modelo hidrológico se puede usar de forma agregada, lo que simplifica su uso, debido a que no considera la variabilidad espacial. El modelo considera los parámetros de entrada de manera homogénea, permitiendo simular, por ejemplo, la recarga de un acuífero de forma efectiva con información limitada. (Ramírez, 2013). Cabe destacar que el modelo funciona en una temporalidad diaria, requiriendo variables como precipitación y temperatura media diaria. Adicionalmente, como variable de entrada, el modelo requiere de los promedios mensuales de temperatura y evapotranspiración potencial a largo plazo para el cálculo de la Etp (evapotranspiración potencial diaria). La implementación del modelo se realizó a través del software Matlab, debido a que se puede programar y/o modificar las ecuaciones del modelo HBV. A continuación, se describen las rutinas de nieve, humedad del suelo y la rutina de respuesta, las cuales componen el modelo HBV (Figura 8).

La **primera rutina** corresponde a la rutina de nieve, la cual considera la precipitación como nieve o lluvia en función de la temperatura. Para esto se compara la temperatura diaria con un valor umbral de temperatura (TT). Si la temperatura es menor que TT, toda la precipitación se considera como nieve; por el contrario, se considera lluvia (precipitación líquida). La precipitación nival se corrige multiplicando por un factor de corrección denominado Sf . El cálculo del deshielo se realiza mediante el modelo grado-día, controlado por el parámetro C_{melt} que determina la

cantidad diaria de nieve a derretir, dependiendo de la diferencia entre la temperatura real y la temperatura umbral. Finalmente, esta rutina calcula la precipitación aportante a la rutina de humedad (ΔP) (Parra et al. 2017).

La **segunda rutina** modela el proceso de humedad en el suelo. En primer lugar, el modelo calcula la evapotranspiración potencial (Etp). Para ello se utiliza la temperatura media diaria, promedios mensuales a largo plazo de temperatura y evapotranspiración potencial y un factor de corrección denominado C. La Evapotranspiración real (Etr) del suelo es igual a la Etp si la razón entre SM que es el contenido real de agua en el suelo y FC que es el parámetro que representa la capacidad máxima de retención de agua del suelo (SM/FC) está por encima del punto de marchitez permanente (LP), pero si SM/FC está por debajo de LP se aplica una reducción lineal (ver esquina superior derecha en Figura 8). Luego el modelo calcula la escorrentía aportante a la rutina de respuesta (ΔQ) que depende de las variables internas del modelo (ΔP y SM) y también de sus parámetros internos (FC y β), siendo β un coeficiente empírico que determina la contribución relativa de la lluvia o la fusión de nieve en la escorrentía. (Parra et al. 2017).

Por último, **la rutina respuesta** es la que estima el escurrimiento en la salida de la cuenca. Esta rutina es representada por un sistema que consta de dos depósitos, uno superior y otro inferior. Ambos depósitos se conectan entre sí mediante una tasa de infiltración o percolación constante, denominado Q_{perc} (dependiente del coeficiente del flujo máximo de percolación k_p). El depósito superior tiene 2 salidas, una de respuesta rápida Q_0 (dependiente de un coeficiente de respuesta rápida k_0) y otra de respuesta lenta Q_1 (dependiente de un coeficiente de respuesta lenta k_1), mientras que el depósito inferior tiene una sola salida (Q_2) (dependiente de su coeficiente de respuesta depósito inferior k_2). La respuesta rápida del almacenamiento superior depende del parámetro L (valor umbral), ya que, si se supera ese valor L, se produce la escorrentía rápida, y en caso contrario, solo la escorrentía subsuperficial. El escurrimiento total corresponde a la suma de las 3 salidas, siendo $Q_t = Q_0 + Q_1 + Q_2$. Para este trabajo, se consideró Q_{perc} como la recarga

real al acuífero, obtenida con el modelo HBV (Figura 8) (Parra et al. 2017).

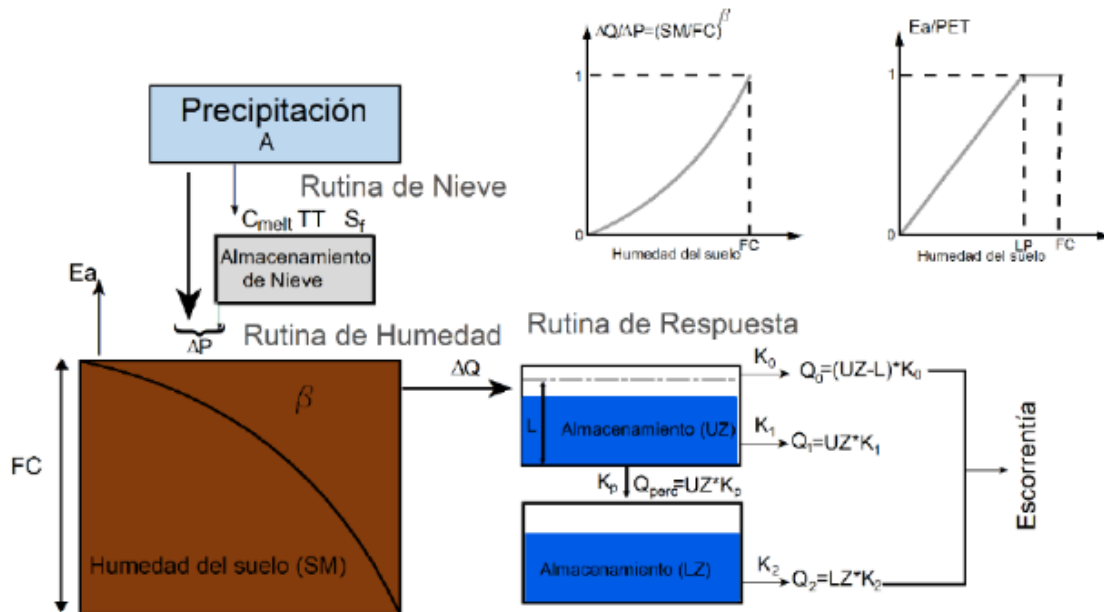


Figura 8: Diagrama conceptual del modelo HBV. Fuente: Parra et al. 2017.

El modelo implementado en Matlab permite interpretar los resultados en función de los objetivos que queremos lograr para la investigación. En este caso se buscan los resultados existentes en la última rutina del modelo (rutina respuesta), específicamente el caudal de percolación (Q_p) que interactúa con el depósito inferior del modelo (LZ).

5.3.1 Calibración y validación del modelo

Para la modelación se utilizó un periodo de 30 años entre 1990 y 2019. Para calibrar el modelo HBV se utilizaron los primeros 15 años, correspondientes al periodo 1990-2004. En total se realizaron 50.000 simulaciones para obtener los parámetros óptimos del modelo. Por otro lado, para la validación se utilizaron los 15 años siguientes, correspondientes al periodo 2005-2019. Este proceso de validación se realiza una sola vez, con los parámetros óptimos (calibrados). En esta se ejecuta el modelo y se comparan los datos observados con los simulados.

En ambos periodos se consideró un 1er año de calentamiento o “Warm-Up”. El calentamiento del modelo es un proceso de ajuste para que este alcance un estado óptimo, donde las reservas internas (p. ej., la humedad del suelo) pasan de una condición inicial estimada a un estado óptimo (Kim et al, 2018). El set de parámetros de calibración se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. *Rango de los parámetros iniciales para el modelo HBV.*

Parámetro	Valor Máximo	Valor mínimo
Cmelt ($mm^{\circ}C-1d-1$)	7	0.5
Fc (mm)	2000	0
C ($^{\circ}C-1$)	0.3	0.01
Beta	7	0
L (mm)	100	0
ko ($d-1$)	0.6	0.3
k1 ($d-1$)	0.2	0.1
k2 ($d-1$)	0.1	0.01
kp ($d-1$)	0.1	0.01
lp	1	0.3
sf	1.2	0.5

Nota. Se elaboró la tabla en base a los valores de Parra et al. 2017.

Para los procesos de calibración y validación se utilizaron funciones objetivo (medidas de bondad de ajuste) para demostrar la precisión de los datos, según el objetivo planteado en la modelación. En este trabajo se utilizó la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (ecuación 3) como índice principal, con el objetivo de evaluar el rendimiento medio del modelo. Además, se utilizó la transformada del error cuadrático medio (TRMSE) (ecuación 4) para evaluar el rendimiento de caudales bajos. El TRMSE no tiene un criterio exacto para su rendimiento, no obstante, su valor óptimo es 0. Cabe destacar que en función al índice de Nash-Sutcliffe se obtendrán los parámetros óptimos

para la validación, ya que es el indicador principal en esta investigación. Para el Índice de Nash-Sutcliffe se consideran los valores óptimos en la Tabla 2.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$TRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Z_{s,t} - Z_{o,t})^2} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Tabla 2. Criterio para el índice Nash-Sutcliffe (NSE).

Valor de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	Interpretación
>0.75	Buena
0.36-0.75	Satisfactorio
<0.36	Menos satisfactorio

Nota. Se elaboró la tabla en base a los valores de Gusti et al. 2022

5.3.2 Aplicación del modelo para escenario base y escenarios futuros de cambio climático

Una vez calibrado y validado el modelo HBV en la cuenca del río Perquilauquén en San Manuel, se utilizó para calcular la recarga para el periodo histórico (escenario base). En este caso, se ingresan los datos de entrada de los 30 años, aplicando el modelo HBV con los parámetros validados. En base a estas variables utilizadas se obtienen los resultados del modelo para el escenario base, posibilitando un margen comparativo para los escenarios futuros de la modelación.

Para simular escenarios de cambio climático, se modifican las variables de entrada (en este caso, precipitación y temperatura) considerando las proyecciones climáticas que se presentan en la guía del SEA, “Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico”. Este documento consta de proyecciones de temperatura y precipitación, en

donde se muestra el aumento de la temperatura media nacional (Figura 9) y la disminución de precipitaciones por sectores. (Figura 10). Para determinar cuál es el sector que pertenece a la cuenca estudiada se utilizó el KMZ de la sectorización otorgado por la guía, ubicando el polígono de la cuenca sobre esta sectorización, la cual se muestra en la Figura 11.

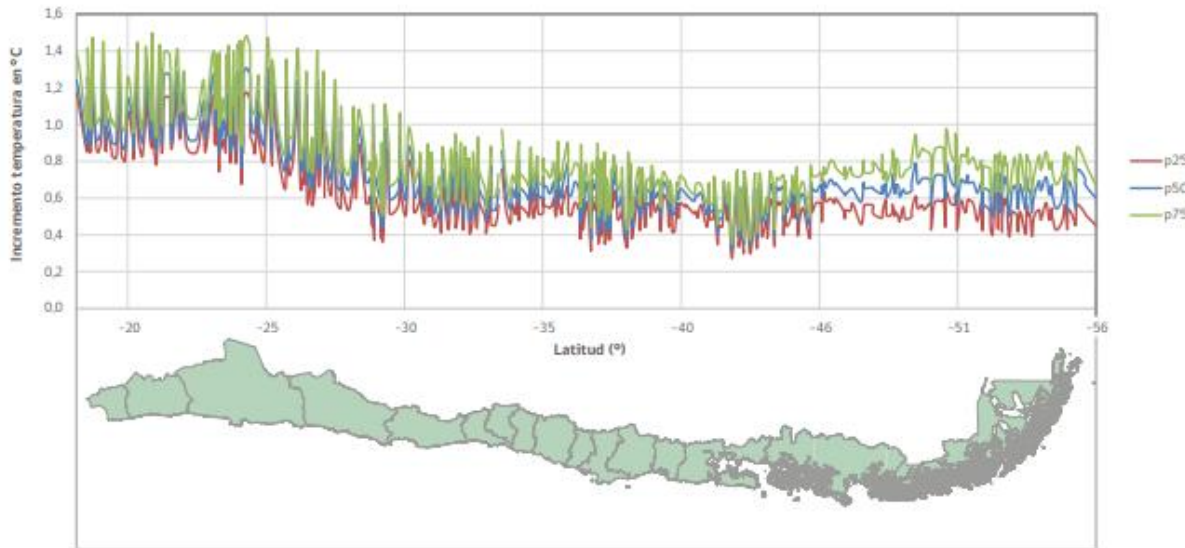


Figura 9: Proyección del cambio de temperatura. Fuente: SEA,2023

De acuerdo a la sectorización propuesta de la guía del SEA, se utilizaron los cambios porcentuales correspondientes a la zona K (azul), ya que abarca por completo el área de estudio (Figura 11). El aumento de la temperatura media fue de $+1.4^{\circ}\text{C}$ y la disminución porcentual de precipitaciones es en un intervalo de $[-9.5 \text{ a } -20.1]\%$, con base en la metodología estipulada en el documento. Siguiendo estas condiciones, se implementa una variación porcentual de ambas variables (temperatura y precipitación), generando una segregación de escenarios para cada modelación. Los valores de cada escenario se presentan en la Tabla 3.

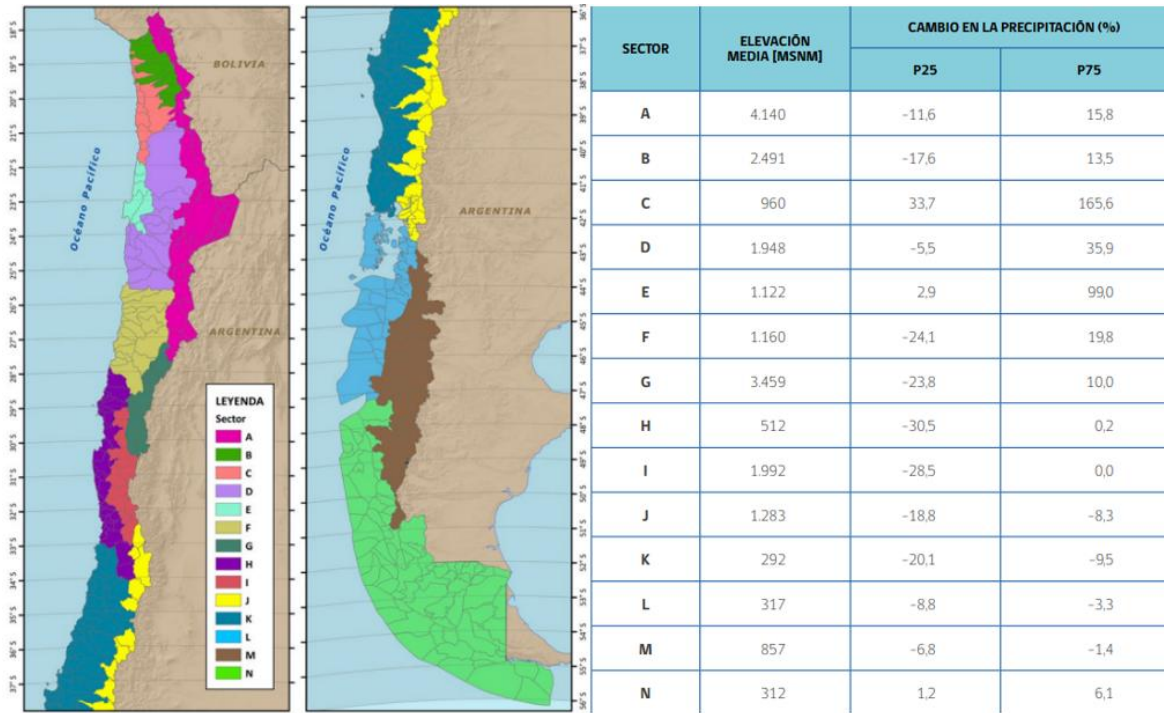


Figura 10: Sectorización de proyecciones de precipitación y cambio porcentual de precipitaciones según sectorización. Fuente: SEA, 2023

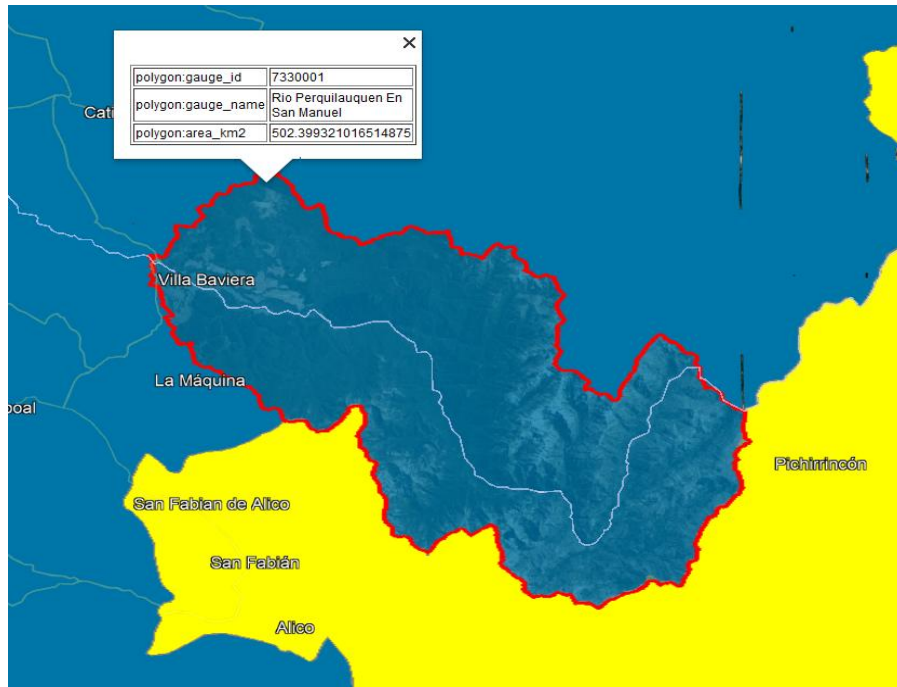


Figura 11: Polígono de la cuenca Río Perquillauquén en San Manuel sobre el área de sectorizaciones correspondiente a la guía del SEA (Zona K). Nota. Elaborado en base a KMZ de SEA, 2023.

Tabla 3. Variación de temperatura y precipitación para los escenarios futuros aplicados a la modelación.

Escenario	Temperatura (°C)	Precipitación (%)
M1	+0.233	-9.5
M2	+0.466	-11.6
M3	+0.699	-13.7
M4	+0.932	-15.9
M5	+1.165	-18.0
M6	+1.4	-20.1

Nota. Se generaron los valores graduados en base a datos de SEA, 2023

6. Resultados

6.1 Test de Mann-Kendall

La Figura 12 y la Figura 13 presentan los resultados del test de Mann-Kendall que se realizó a la precipitación y la temperatura. Se observa que la precipitación presenta una tendencia negativa significativa (p-value de 0.049 menor a alfa de 0.05) para el periodo 1990-2019 (Figura 12). De acuerdo con la pendiente Sen se obtiene que existe una tasa de descenso de la precipitación de 23.502 mm/año.

A diferencia de las precipitaciones, el test de Mann-Kendall para la temperatura indica que no existe una tendencia significativa en la serie temporal (p-value de 1.83 mayor a alfa de 0.05) para el periodo 1990-2019 (Figura 13). No obstante, de acuerdo con la Pendiente Sen, existe un ligero ascenso de temperatura de 0.010°C/año.

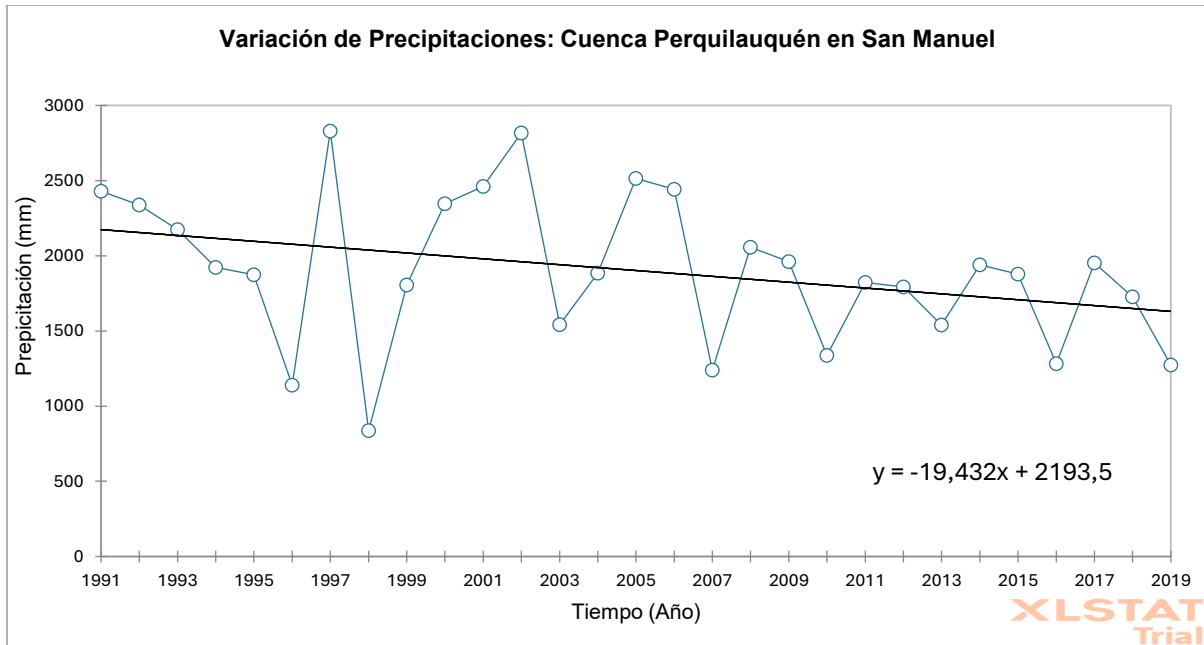


Figura 12: Gráfico de tendencias de precipitaciones en Río Perqui Lauquén en San Manuel. Se considera tendencia negativa.

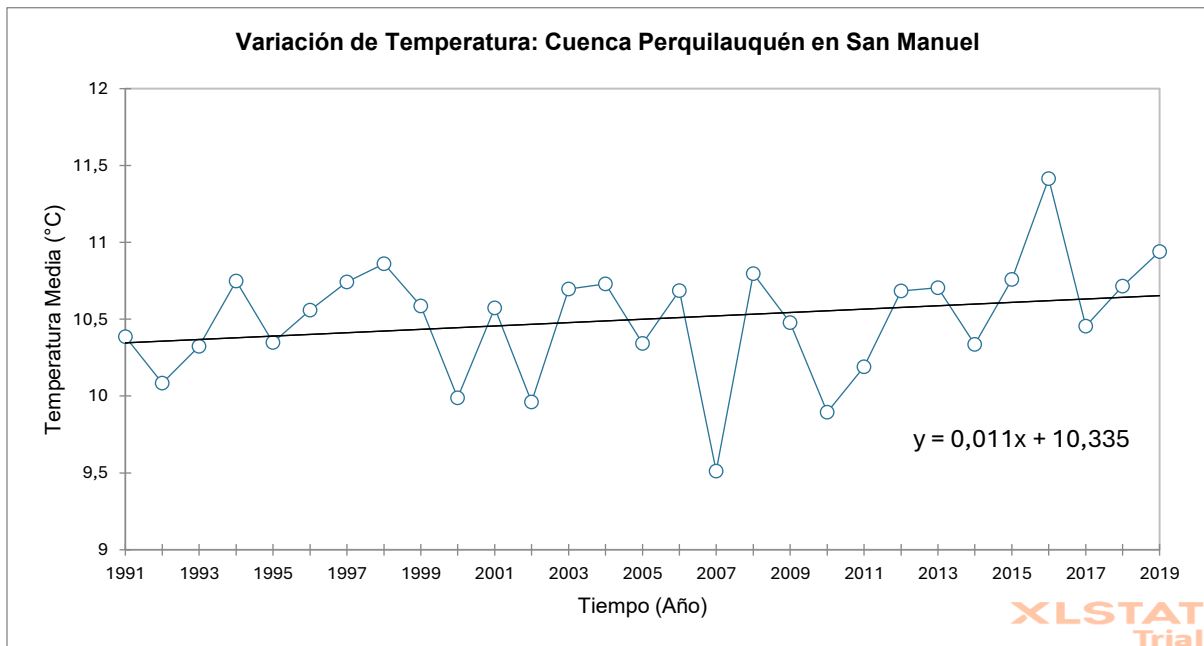


Figura 13: Gráfico de tendencias de temperatura en Río Perqui Lauquén en San Manuel. Se considera tendencia nula.

6.2 Calibración y validación del modelo

La Figura 14 presenta la calibración del modelo HBV para el periodo 1990-2004. Se observa que el modelo se ajusta bien a los caudales observados, en especial a los caudales bajos. En términos generales, el modelo muestra un buen comportamiento entre caudales simulados y observados, ya que el modelo tiene un índice de NSE de 0,782 (buena representación del sistema), mientras que el TRMSE, que evalúa el rendimiento en la simulación de caudales bajos, es de 1,13 (valor cercano al valor óptimo de 0). Los valores de los parámetros óptimos obtenidos de acuerdo con el índice NSE se presentan en la Tabla 4.

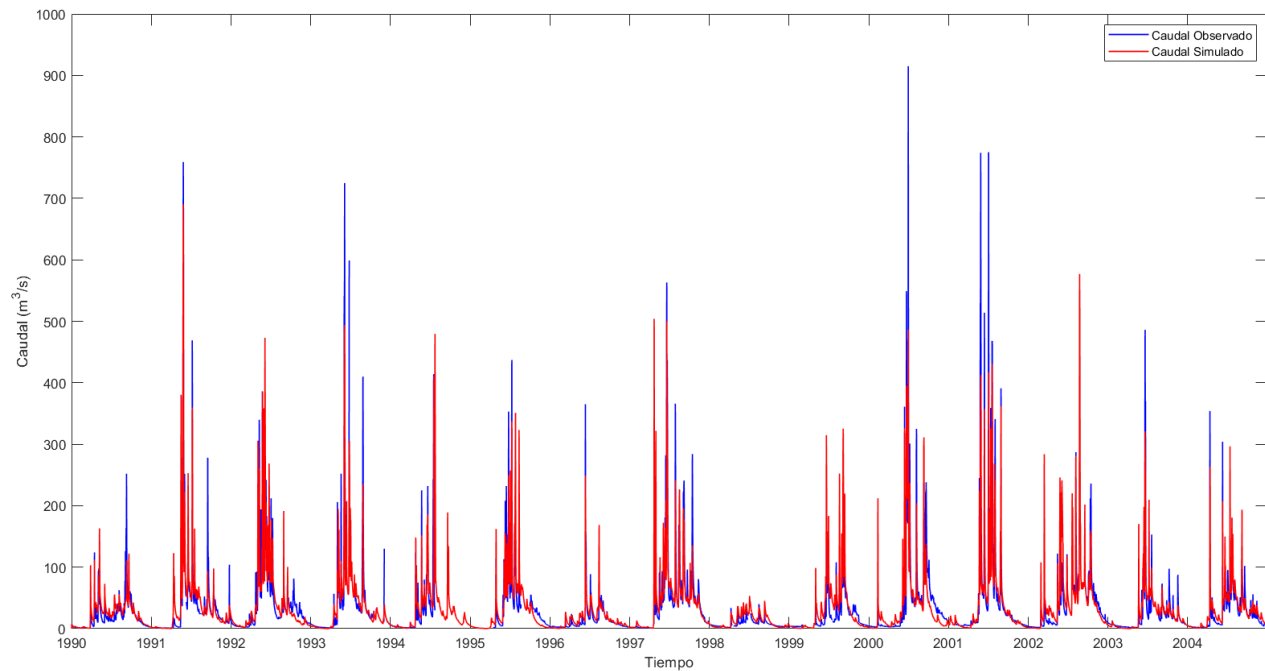


Figura 14: Gráfico de caudales observados (azul) y simulados (rojo) en periodo de calibración (1990-2004). La figura muestra la comparación entre los caudales del Río Perquilauquén en San Manuel, utilizando el modelo HBV en Matlab para efectuar los gráficos.

Tabla 4. Parámetros óptimos para el modelo HBV.

Parámetros HBV	Valores óptimos
Cmelt ($mm^{\circ}C^{-1}d^{-1}$)	1.757
Fc (mm)	1702.079
C ($^{\circ}C^{-1}$)	0.149
Beta	0.200
L (mm)	65.496
ko (d^{-1})	0.501
k1 (d^{-1})	0.193
k2 (d^{-1})	0.027
kp (d^{-1})	0.089
lp	0.854
sf	0.948

Nota. Valores obtenidos en el periodo de calibración, mediante software MATLAB.

La Figura 15 presenta la validación del modelo HBV para el periodo 2005-2019. Se observa que el modelo se ajusta bien a los caudales observados, en especial a los caudales bajos, siendo un comportamiento similar al periodo de calibración. Los resultados de las funciones objetivo son buenos, ya que el modelo tiene un índice de NSE de 0.802 (rendimiento medio del modelo bueno), mientras que el TRMSE es 1.22. Cabe destacar que al incrementar el TRMSE se observan comportamientos menos representativos para caudales bajos. Sin embargo, el aumento del NSE compensa este comportamiento, siendo posible argumentar que la simulación del modelo en los periodos de calibración y validación es consistente.

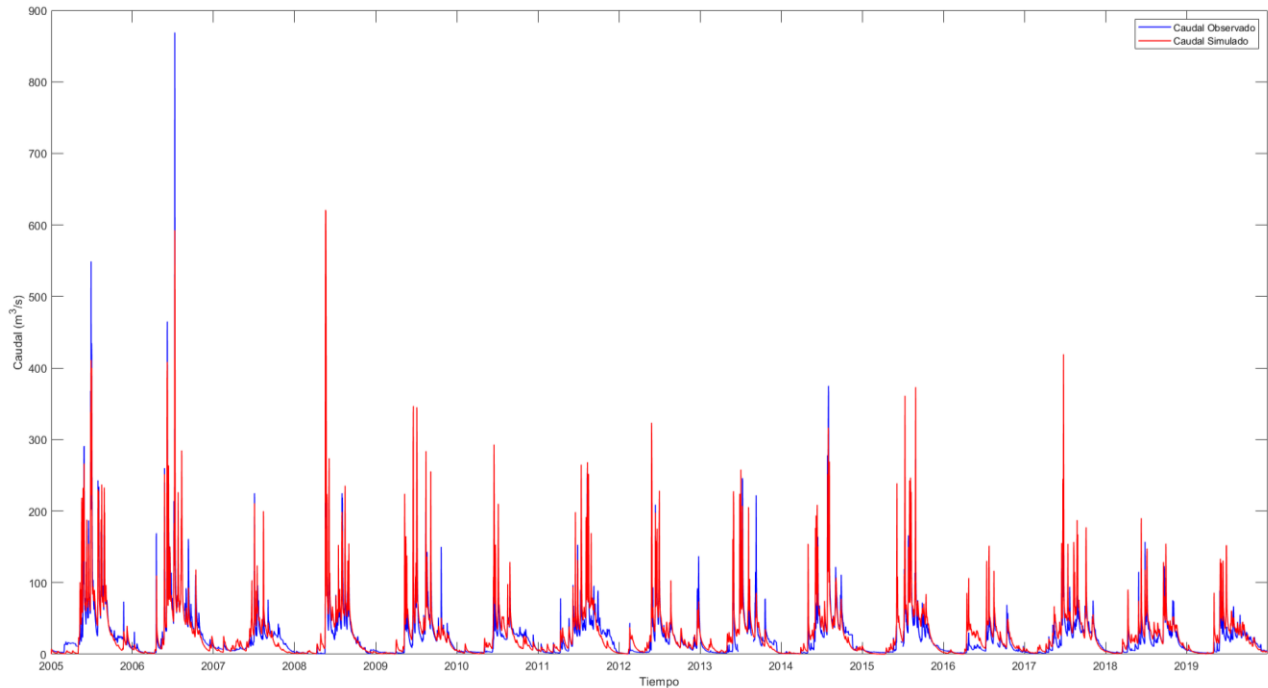


Figura 15: Gráfico de caudales observados (azul) y simulados (rojo) en periodo de Validación (2005-2019). Al igual que en el periodo de calibración, la figura muestra la comparación entre los caudales del Río Perquilauquén en San Manuel, utilizando el modelo HBV en Matlab para efectuar los gráficos.

6.3 Modelo HBV para escenario base

En la Figura N°16 se observan los valores anuales de cada variable de la rutina de respuesta del modelo HBV, siendo Q_0 la escorrentía superficial, Q_1 la escorrentía subsuperficial, Q_2 el flujo base, Q_p la recarga y Q_t la escorrentía total. En la figura existen componentes que en términos de valores son mayores respecto a otros, como en el caso de las escorrentías, siendo $Q_1 > Q_2 > Q_0$, por lo que es interesante orientar los resultados a la escorrentía superficial, ya que es la de menor valor. Además, se puede observar que en la figura se muestran años con valores muy bajos respecto a años previos, como por ejemplo en 1998 y 2019.

A partir de los resultados, se obtuvo que la recarga (Q_p) media anual es aproximadamente 440.94 mm/año, la cual corresponde a un 22,1 % de la precipitación media anual de la cuenca (1996

mm/año). Por otro lado, la escorrentía media anual total (Q_t) simulada por el modelo corresponde a la suma de la escorrentía superficial ($Q_0=3,11 \text{ m}^3/\text{s}$), la escorrentía subsuperficial ($Q_1=15,22 \text{ m}^3/\text{s}$) y el flujo base ($Q_2=10,53 \text{ m}^3/\text{s}$) es de $28,87 \text{ m}^3/\text{s}$.

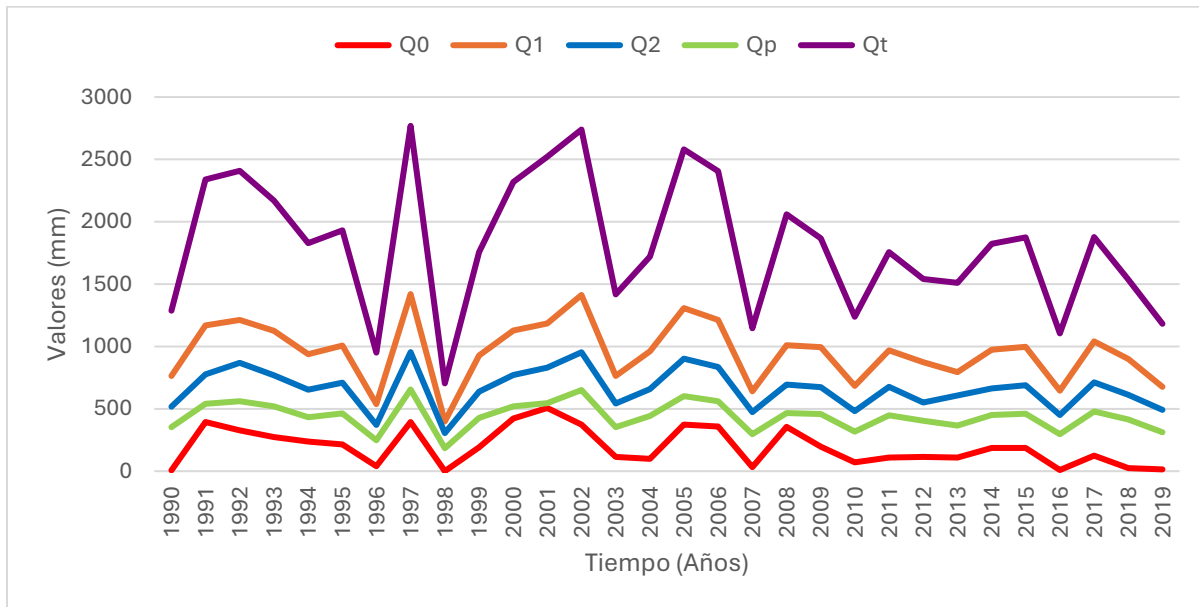


Figura 16: Valores anuales de variables de la rutina respuesta para el modelo HBV, representadas en milímetros.

Para complementar los resultados, las Figuras 17 y 18 muestran las comparaciones entre las variables Q_p y Q_0 respecto a la precipitación anual determinada en los intervalos de tiempo 1997-1999 y 2017-2019, respectivamente. Cabe destacar que la selección de estos intervalos es con el fin de representar los comportamientos de las variables en periodos asociados a sequías, donde se ha observado una importante disminución de precipitaciones. Se destacan el año 1998, que representa un evento de sequía extrema en el país, y el año 2019, periodo más actual de la investigación. A su vez se agregó al intervalo el año anterior y posterior de los eventos mencionados.

Se puede apreciar en la Figura 17 y la Figura 18 que la variación de precipitaciones muestra un comportamiento similar a las variables Q_0 y Q_p , destacando que Q_0 posee un menor valor respecto a Q_p . Adicionalmente, se puede observar que en el año 1998 (Figura 17) el modelo

entrega un valor de escorrentía superficial (Q_0) igual a 0. Esto se puede relacionar con la abrupta disminución de precipitaciones registradas para ese año (1998).

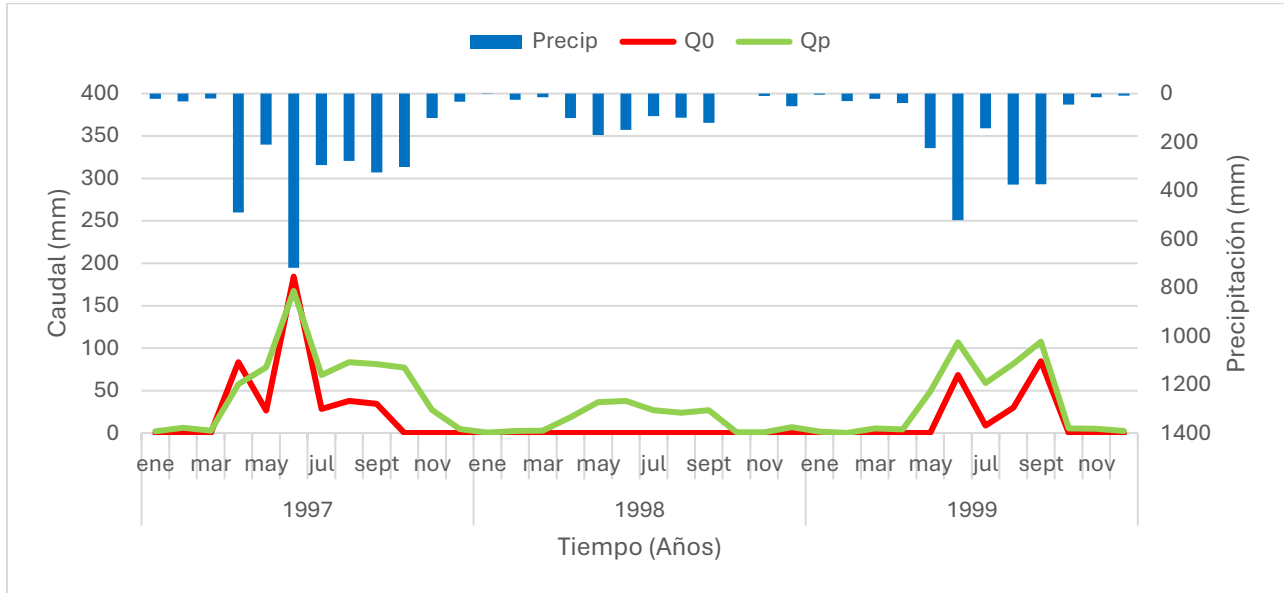


Figura 17: Valores de Q_0 y Q_p en comparación con la precipitación, para el periodo 1997-1999.

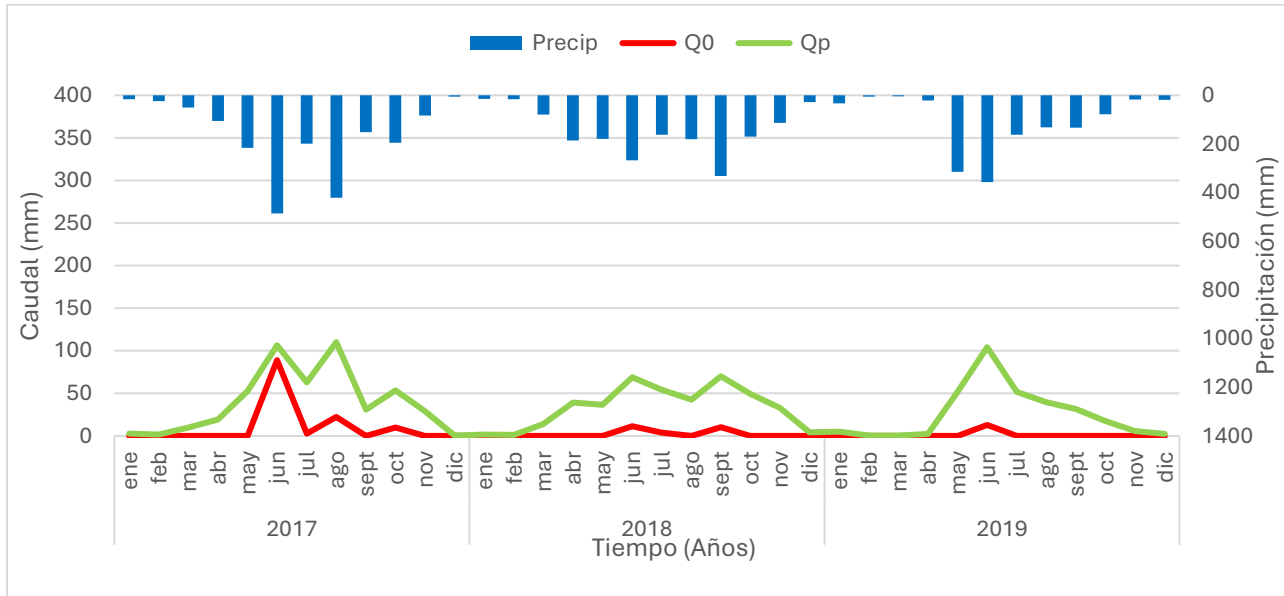


Figura 18: Valores de Q_0 y Q_p en comparación con la precipitación, para el periodo 2017-2019.

6.4 Modelo HBV para escenarios futuros

En la Figura 19 se aprecian gráficos tipo boxplot para mostrar la variabilidad del porcentaje de reducción para las variables de recarga (Q_p) y escorrentía superficial (Q_0). La figura refleja diferencias significativas entre las variables, ya que Q_0 muestra una mayor variabilidad de porcentajes de reducción que Q_p . La escorrentía superficial alcanza hasta un 100% de reducción, mientras que Q_p presenta una reducción máxima de un 25,3%, asociada al escenario más desfavorable (M6).

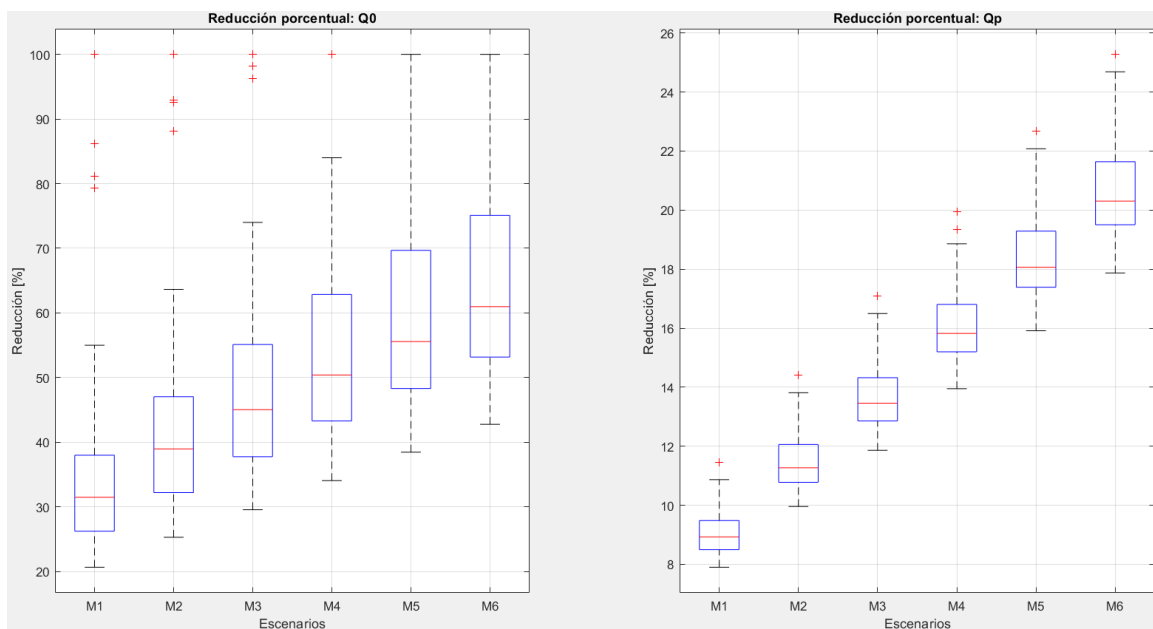


Figura 19: Grafico de Boxplots de reducción porcentual de los escenarios futuros (M1 a M6) respecto al escenario base para las variables Q_0 y Q_p .

En la Figura 20 se muestran gráficos de dispersión de los datos anuales del escenario base y de cambio climático para las variables Q_0 y Q_p . En el eje X se representan los valores totales anuales en el escenario base y en el eje Y los escenarios de cambio climático. Adicionalmente, se representa la línea discontinua $Y=X$ para comparar las reducciones respecto a esta igualdad (1:1). En la figura se observa que la dispersión de los datos para Q_0 es significativamente mayor que la de Q_p , mostrando que Q_0 tiende a una mayor sensibilidad a las perturbaciones de

precipitación y temperatura respecto a Q_p . Adicionalmente, se observa que las variaciones de Q_p muestran un comportamiento lineal respecto al escenario base.

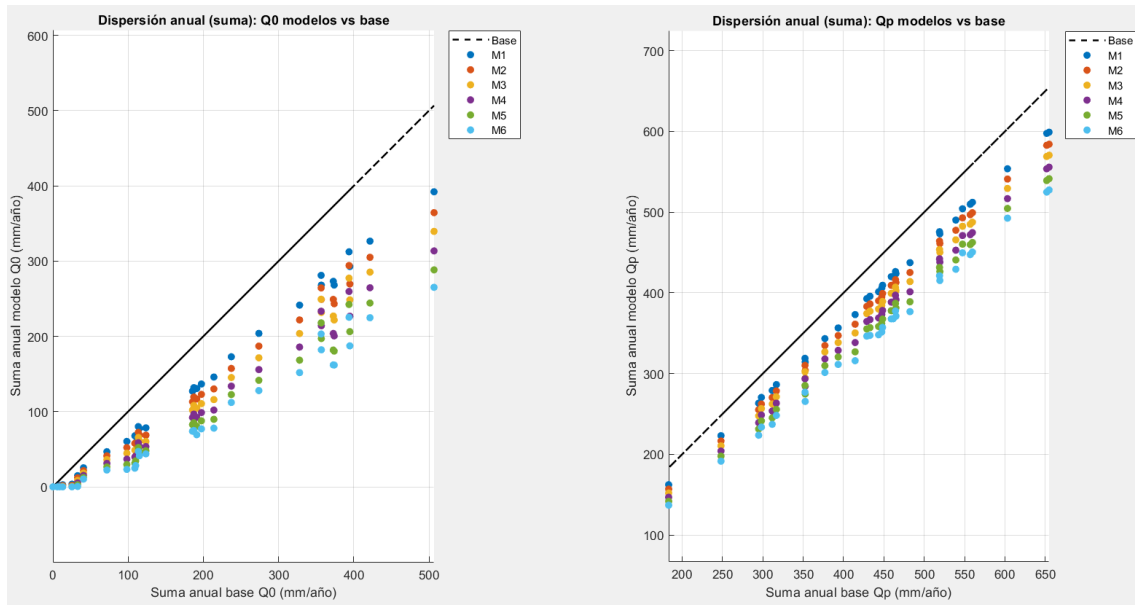


Figura 20: Gráfico de dispersión anual para las variables Q_0 y Q_p para escenarios futuros vs escenario base.

Las Figuras 21 y 22 muestran los percentiles 5, 50 y 95 de las variaciones anuales (%) asociadas a los 6 escenarios de cambio climático respecto al escenario base de Q_p y Q_0 , respectivamente. Las figuras muestran el rango de reducción que puede existir para cada variable en el periodo proyectado (2035 y 2065), considerando todos los escenarios (M1 a M6). Se observa que Q_p muestra un área de incertidumbre estable con variaciones de reducción entre 8% y 25% (Figura 21). Por el contrario, Q_0 muestra mayor variabilidad, con reducciones que alcanzan un 100 % (Figura 22). Cabe destacar que el año 2043 correspondería a las precipitaciones del año base 1998, siendo un periodo de bajas precipitaciones y el modelo calculó, para ese año, una escorrentía superficial igual a 0.

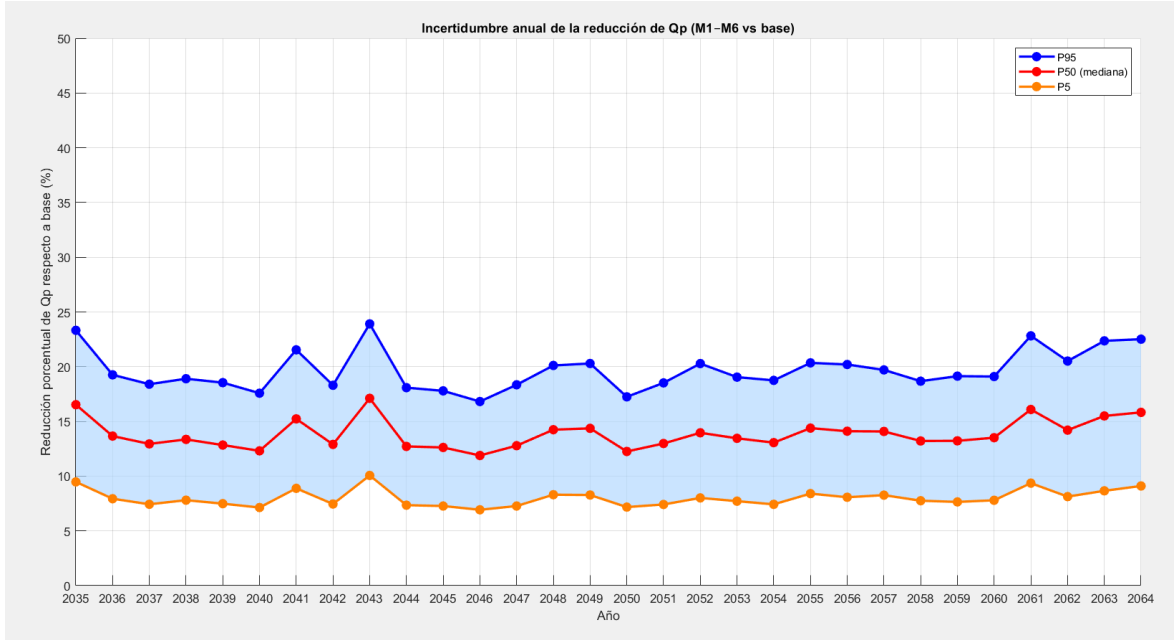


Figura 21: Gráfico de incertidumbre anual para Qp comparando la reducción porcentual de los escenarios futuros respecto al escenario base, Periodo 2035-2064.

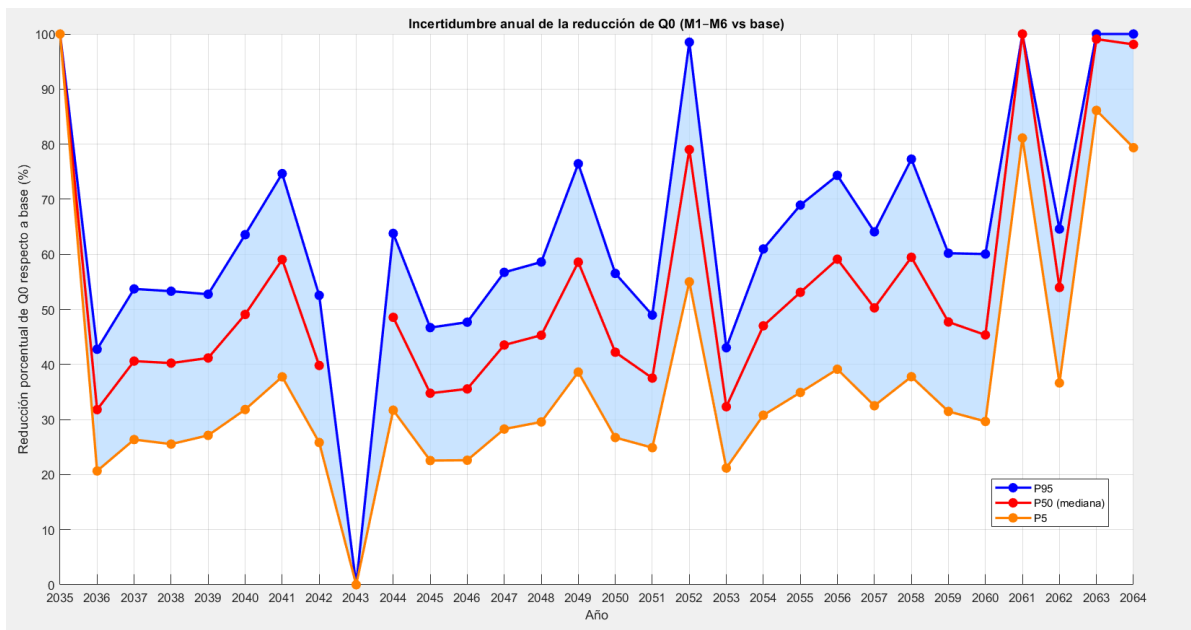


Figura 22: Gráfico de incertidumbre anual para Q0 comparando la reducción porcentual de los escenarios futuros respecto al escenario base, Periodo 2035-2064.

Considerando los promedios a largo plazo de las proyecciones obtenidas anteriormente, se tienen los siguientes resultados mostrados en la Figura 23. Se puede observar en la figura que los porcentajes de reducción entre las variables Q_1 , Q_2 , Q_p y Q_t tienen un acercamiento en los resultados, siendo Q_t ligeramente mayor. Sin embargo, al igual que en las demás figuras, la variable Q_0 muestra una importante reducción respecto al escenario base, siendo la variable más afectada por las perturbaciones en los escenarios futuros.

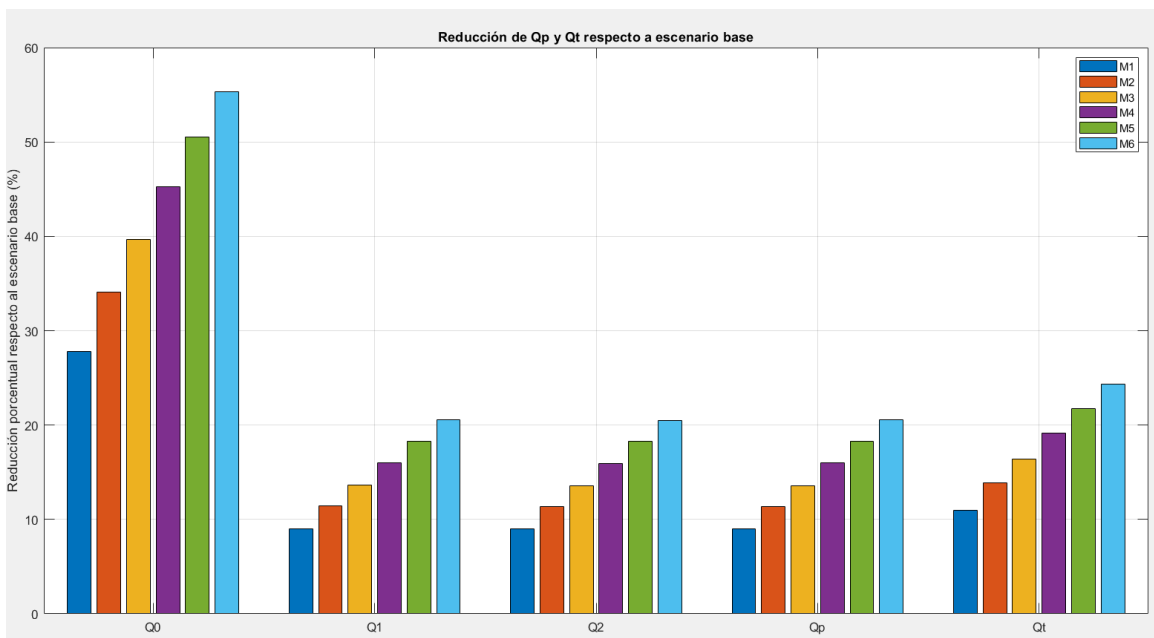


Figura 23: Gráfico de reducción porcentual de las variables del modelo HBV para escenarios futuros, respecto al escenario base. La figura muestra las variables extraídas del modelo HBV en función de cada escenario futuro y la respectiva reducción respecto al escenario base.

7. Discusión

7.1 Análisis de Tendencias

Los resultados del análisis de tendencias con test de Mann-Kendal de la precipitación muestran una tendencia significativa de disminución, siendo consistentes con los registros y tendencias observadas a nivel país en los últimos años. Por el contrario, los resultados de la temperatura

muestran una tendencia no significativa, resultado que difiere de las tendencias observadas en otros sectores del país (particularmente los reportados por el Reporte Anual de la Evolución del Clima en Chile en 2025). Esto puede estar relacionado con diversos factores como los valores de temperatura ingresados en el test, respecto a la línea de tiempo, o las características hidrometeorológicas presentes en la Cordillera de los Andes. En este contexto, Kaser y Osmaston (2002) mostraron que la ubicación latitudinal influye en la radiación solar, lo que permite una baja variabilidad estacional y amplitud térmica anual, teniendo en cuenta que cuanto más baja es la latitud, mayor es el efecto mencionado. Esto puede influir en la Cordillera de los Andes en Chile, siendo una posible justificación de por qué el test de Mann-Kendall para la temperatura determinó una tendencia no significativa.

7.2 Modelación Hidrológica Para Escenario Base

Los resultados del modelo HBV fueron satisfactorios y el modelo mostró un buen rendimiento, ya que se obtuvieron buenos valores de NSE para los periodos de calibración y validación (Gusti et al., 2022). Por otro lado, el índice TRMSE nos muestra un resultado aceptable frente al comportamiento de caudales bajos. Este índice busca como valor óptimo 0, pero no existe un umbral exacto para determinar la representación del índice, ya que va del 0 al $+\infty$. Los resultados de la función objetivo TRMSE obtenidos en la cuenca del río Perquillauquén en San Manuel en este estudio son similares a los obtenidos por Muñoz (2015) (Para calibración un $TRMSE_{\text{muñoz}} = 1.13$, y para la validación un $TRMSE_{\text{muñoz}} = 0.96$), por lo que se puede mencionar que el modelo, implementado en este estudio, representa de buena manera los caudales bajos en la cuenca de estudio. El buen rendimiento del modelo se puede ver al comparar los valores a largo plazo del caudal total simulado y observado. El modelo simuló un caudal total (Q_t) de $28,83 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el valor observado es de $29,18 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto muestra que el modelo reproduce de forma adecuada los procesos y caudales observados en la cuenca del río Perquillauquén en San Manuel.

En las condiciones para el escenario base, el modelo muestra una relación entre la variación de la precipitación y las variaciones de los resultados, como la esorrentía superficial (Q_0) y recarga (Q_p) (Figuras 17 y 18). En este contexto, el periodo que incluye la crisis hídrica de 1998 (Figura 17) muestra cómo la pérdida abrupta de precipitaciones interrumpe el proceso de esorrentía superficial (esorrentía directa), ya que el modelo no simuló esorrentía superficial para ese año. Esto se puede reflejar con el descenso abrupto del caudal simulado y observado para 1998 (Figura 14), existiendo una consistencia con la reducción de Q_0 simulado para ese año.

A su vez, se puede relacionar que la pérdida de precipitación en ambos periodos (escenario base) influye en la disminución de la recarga, pero nunca existe un valor anual igual a 0, demostrando que la capacidad de recarga que tuvo el acuífero, en el periodo 1990-2019, es suficiente para continuar con el aporte al almacenamiento. Esto se puede atribuir a las estructuras volcánicas y volcanosedimentarias que predominan en la cuenca (Figura 6), las cuales tienen una alta permeabilidad, lo que facilita la infiltración y recarga al acuífero.

7.3 Modelación Hidrológica Para Escenarios Futuros

El modelo HBV calibrado y validado permitió simular diferentes escenarios de cambio climático respecto al escenario base. A partir de los resultados de la Figura 23, la variable con mayor porcentaje de reducción es Q_0 , mostrando reducciones mayores que los porcentajes de reducción de precipitaciones de cada escenario. Por otro lado, las variables Q_1 , Q_2 y Q_p tienen una similitud con los porcentajes de reducción para cada escenario, entregando una relativa linealidad entre las variables mencionadas y la reducción de precipitaciones para cada escenario. Esto muestra que la esorrentía superficial (Q_0) es un proceso más sensible que la recarga ante escenarios de déficit de precipitaciones.

Teniendo en consideración que Q_0 tiende a ser igual a 0 en casos extremos de sequía, se puede mencionar que es un proceso sensible frente a la reducción de precipitaciones y aumento de

temperatura, lo cual requiere mayor relevancia a la hora de entender los comportamientos de los procesos hidrológicos en condiciones futuras de escasez hídrica. Por otro lado, la recarga (Q_p) es una variable más estable, considerando que tiende a demostrar una linealidad entre la reducción de precipitaciones y la reducción de la variable. Esto, al igual que en la discusión para el escenario base, puede ser producto de las formaciones geológicas volcánicas y volcanosedimentarias que predominan en la cuenca (Figura 6). Estas formaciones tienden a tener una alta permeabilidad, debido a su naturaleza fracturada, y por lo tanto favorecen el proceso de recarga. Parra et al. (2018) mencionan que las cuencas de montaña, en donde predominan las rocas volcánicas fracturadas, presentan un comportamiento de drenaje rápido en el acuífero. A pesar de que estas características facilitan el proceso de la recarga, esta no logra saturar el suelo, debido a la disminución de las precipitaciones, lo que reduce o limita la escorrentía superficial.

7.4 Conclusiones y Recomendaciones

Esta investigación estuvo orientada a evaluar si las variaciones de temperatura y precipitación proyectadas afectan a procesos importantes de los acuíferos, en este caso, la recarga (Q_p). Se pudo determinar que las condiciones extremas de sequía afectan a todas las variables, pero la respuesta a estas perturbaciones es diferente entre ellas. Por un lado, la recarga mostró porcentajes de reducción similares a los aplicados a la precipitación, mostrando un comportamiento aproximadamente lineal. Por el contrario, la escorrentía superficial demostró reducciones abruptas frente a la reducción de precipitaciones y aumento de temperatura, siendo un proceso que representa mayor sensibilidad, el cual incluso en condiciones menos desfavorables tiene una reducción sobre el 80%. Esto muestra que la escorrentía superficial es un proceso sumamente crítico frente a condiciones de sequía y aumento de temperatura en el área de estudio.

Por lo tanto, se comprobó que la hipótesis que se planteó en el trabajo es correcta, siendo la recarga una variable que no sufre una reducción importante frente a las perturbaciones efectuadas en el modelo, en comparación, por ejemplo, con la escorrentía superficial. Esto se complementa con la relación entre las perturbaciones (reducciones de precipitación) realizadas en el modelo y la reducción de la recarga en los 6 escenarios, ya que muestra una tendencia a la linealidad entre estas condiciones.

Con base en estas conclusiones, se puede recomendar un enfoque prioritario tanto para la escorrentía superficial como para la recarga de los acuíferos en la Cordillera de los Andes. Se recomienda considerar la escorrentía como una variable sensible al cambio climático, particularmente en zonas de alta montaña. Además, hay que enfatizar que las zonas de alta montaña son un punto clave en el abastecimiento hídrico para zonas bajas, como el valle central, por lo que orientar estrategias para la protección de los acuíferos, limitar sus extracciones y potenciar más investigaciones relacionadas con la recarga u otros comportamientos físicos de los acuíferos, son cruciales para aportar en la gestión integral de los recursos hídricos.

Finalmente, se recomienda generar nuevas modelaciones para comparar con otras cuencas que difieran en las estructuras geológicas, para así obtener una mayor representatividad en el territorio nacional, ya que Chile posee una amplia variedad de estructuras geológicas que influyen en los procesos de un acuífero. Un ejemplo práctico sería aplicar estas mismas perturbaciones a cuencas de la Cordillera de la Costa, ya que son estructuras montañosas diferentes que tienen relevancia en nuestro territorio.

8. Referencias

Alencar da Silva Alves, Keyla Manuela; Silva Nóbrega, Ranyére TENDENCIA PLUVIOMETRICA Y CONCENTRACIÓN ESTACIONAL DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MOXOTÓ – PERNAMCUCO – BRASIL. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/journal/4517/451750038021/451750038021.pdf>

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A.: The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, Hydrol. Earth Syst. Sci., 22, 5817-5846, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>, 2018.

Bergström, S. 1992. The HBV model: Its structure and applications. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping.

Carling, T, Mayo, A.L., Tingey, D. and Bruthans, J. (2012). Mechanisms, timing, and rates of arid region mountain front recharge. Journal of Hydrology 428-429, 15-31.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2015). Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Informe a La Nación, 26. <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>

Dirección Meteorológica de Chile (DMC). REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE. 2025. Disponible en: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/documentoPdf/reporteEvolucionClima/reporteEvolucionClima2024.pdf>

Dirección General de Aguas (DGA). 2004. DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGUN OBJETIVOS DE CALIDAD. CUENCA DEL RIO MAULE. Disponible en: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Maule.pdf>

Edwin Toledo, Alberto Galvis. 2022. Metodología para calibración/validación de modelos determinísticos en cuencas hidrográficas. Disponible en:

<https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2230/2462>

F. Javier Sánchez. 2012. Hidrología – Hidrogeología. Disponible en:

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32270616/Hidrologia_e_Hidrogeologia_%28Libro%29.pdf20131109-9534-tueefr-libre-libre.pdf?1384008850=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DHidrologia_e_Hidrogeologia_Libro.pdf&Expires=1729454765&Signature=YGCRP-w5UoUfHjv-y~EHT45nyJbzVc~d0jpnnr-hRQhUEpj005WapjaHSqLGn4Td~abiqTdnHUXhEdqypsSzsPuPHN~gbl7me59psRSBBilBil2A2Vv4-XEVsCk6cV-oy9GjWPCFN90g3U4t5TWKY-AvBNMEpmRe0FN5S8bA0ohrkKL4~fHxVeJK6zJIYs8uKgNHqSmX1jF4U~MSwwIWjeXyEloKm1u~YpHfHGoriQjWj-sBo6odn9tszNpHnwe4kq9YKZvFhYqvVLzblvnQi2Mw89Kpjo-i7UdE35dYQ3KNIPiDXrS~PQB51cR6~Jj~3N4ulJE90~QRKAvTLkbqjw_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

F. Gliemmo, F. Moscoso. 2022. GEOGRAFÍA TUSTISTICA LATINO AMERICANA: APORTES CONCEPTUALES Y ESTUDIOS DE CASO PARA LA COMPRESIÓN DE UN ESCENARIO EN TRANSICIÓN. Disponible en: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/148712>

Fernández Cirelli, Alicia (2018). El agua en Latinoamérica. En: Universidad Nacional de San Martín y Fundación Innovación Tecnológica (FUNINTEC). Programa Futuros: Escuela de Posgrado: Agua + Humedales. (Serie Futuros). Buenos Aires: UNSAM Edita.

<https://ri.unsam.edu.ar/bitstream/123456789/907/1/PFAH%202018%20CFCA.pdf>

Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R. and Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281(3), 180-195.

I Gusti Agung Putu Eryani, Made Widya Jayantari, I Kadek Merta Wijaya (2022). Sensitivity Analysis in Parameter Calibration of the WEAP Model for Integrated Water Resources Management in Unda Watershed. *Civil Engineering and Architecture*, 10(2), 455-469. DOI: 10.13189/cea.2022.100206.

J. Werner. 1996. Introducción a la hidrogeología. Disponible en:

<http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080066373/1080066373.PDF>

Kapos, V., Rhind, J., Edwards, M., Price, M. F., & Ravilious, C. (2000). *Developing a map of the world's mountain forests* (pp. 4-9). CAB International, Wallingford.

<https://doi.org/10.1079/9780851994468.0004>

Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press.

Ke, G., Meng, Q., & Finley, T. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. NIPS.

Kue Bum Kim, Hyun-Han Kwon, Dawei Han, Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, Volume 556, 2018, Pages 194-210, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.015>.

L. Ramírez. 2013. Análisis de la implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en España. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/27255>

M. Vélez, L. Vásquez. 2004. Métodos para estimar la recarga en acuíferos. Disponible en:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/93044/77820>

M. Zaragoza. 2020. EL AGUA COMO CLAVE DEL ECODesarrollo URBANO: PAISAJE, PATRIMONIO, TERRITORIO Y SOCIEDAD. Disponible en:

<https://rua.ua.es/entities/publication/9b6ffea0-0f0d-466b-9281-a85482fc46da>

Markovich, K., H. Manning, A. H., Condon, L. E., & McIntosh, J. C. (2019). Mountain-block recharge: A review of current understanding. *Water Resources Research*, 55, 8278–8304. <https://doi.org/10.1029/2019WR025676>

Ministerio de Desarrollo Social (MDS). 2015. METODOLOGÍA DE FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE AGUA POTABLE RURAL (APR). Disponible en: <https://sni.gob.cl/storage/docs/Metodologia-APR-2015-final-23-02-2015.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente. (2018). *Estrategia nacional de biodiversidad 2017-2030*. https://estrategia-aves.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/03/MMA_2017_Estrategia_Nacional_Biodiversidad_2017-2030.pdf

Pablo Andrés Muñoz Cofré. 2015. DINÁMICAS HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO PERQUILAUQUÉN. Disponible en: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1227684?show=full>

Parra, V., Fuentes P., Muñoz E. 2017. Comparación de procesos hidrológicos a diferente escala temporal. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/327920366_COMPARACION_DE_PROCESOS_HIDROLOGICOS_A_DIFERENTE_ESCALA_TEMPORAL

Parra V., Arumi J., Muñoz E. 2018. COMPORTAMIENTO DEL ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO EN CUENCAS DEL CENTRO-SUR DE CHILE. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331286996_COMPORTAMIENTO_DEL_ALMACENAMIENTO_SUBTERRANEO_EN_CUENCAS_DEL_CENTRO-SUR_DE_CHILE

Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., ... Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. In *Nature climate change*, 5, 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>

P. Camus, F. Jaksic. 2023. El fenómeno el niño/la niña de 1997-1998: repercusiones económicas, sociales y políticas en Chile. Disponible en:

https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-88322023000100314&script=sci_arttext

R. Espinoza, S. Olave, T. Eyzaguirre, V. Sotomayor, J. Zaro. 2020 “Pobres de agua. Radiografía del agua rural de Chile: Visualización de un problema oculto.” Disponible en:

https://www.fundacionamulen.cl/wp-content/uploads/2020/07/Informe_Amulen.pdf

Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). 2023. Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico. Primera edición. Disponible en:

https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/11/10/Resolucion_202399101883_DT_Cambio_climatico_en_recurso_hidricos_2023.pdf

Somers, L. D., & McKenzie, J. M. (2020). *A review of groundwater in high mountain environments*. *Wires Water*. <https://doi.org/10.1002/wat2.1475>

Stehr A., C. Álvarez, P. Álvarez, J. L. Arumí, C. Baeza, R. Barra, C. A. Berroeta, Y. Castillo, G. Chiang, D. Cotoras, S. A. Crespo, V. Delgado, G. Donoso, A. Dussailant, F. Ferrando, R. Figueroa, C. Frêne, R. Fuster, A. Godoy, T. Gómez, E. Holzapfel, C. Huneus, M. Jara, C. Little, K. Lizama, M. Musalem, M. Olivares, O. Parra, R. D. Ponce, D. Rivera, I. Rodríguez, A. Sepúlveda, M. Somos, F. Ugalde, R. Urrutia, M. Valenzuela, C. Vargas, X. Vargas, S. Vásquez, I. L. Vera, S. Vicuña, G. Vidal y M. Yévenes (2019). Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático. Informe de la mesa Agua. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

<https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/9601f184-a85d-4da6-9ec8-c56b0b48d9de/content>

Viviroli, D., H. H. Dürr, B. Messerli, M. Meybeck, and R. Weingartner (2007), Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance, *Water Resour. Res.*, 43, W07447, doi:10.1029/2006WR005653.

W. Crespo. (2016). Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la cuenca del río Pampas, de 1975 al 2014. Disponible en:

<https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/8f310d33-db61-45f2-993e-b95caf41fd6d/content>

Wilson, J. L., & Guan, H. (2004). Mountain-block hydrology and mountain-front recharge In F. Phillips, J. Hogan, & B. Scanlon (Eds.), in *Groundwater recharge in a desert environment, The southwestern United States*. Washington, DC: AGU. <https://doi.org/10.1029/009WSA08>

9. Anexos

Tabla A1. Precipitaciones mensuales en base a datos diarios, aplicadas en modelo HBV.

Fecha	Precipitación (mm)											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic
1990	10.29	20.21	149.78	171.09	206.14	116.77	178.34	183.03	292.52	48.10	65.23	13.30
1991	30.59	2.62	2.91	219.31	832.39	342.14	371.42	92.99	205.26	129.75	54.00	145.21
1992	0.00	27.35	83.49	206.43	819.00	565.66	159.41	211.26	114.67	60.86	42.88	45.88
1993	15.37	0.00	5.27	150.43	471.83	738.33	223.70	259.29	57.93	136.91	44.81	69.33
1994	5.02	25.18	11.21	246.14	176.08	442.59	530.00	52.91	245.74	96.27	26.31	65.87
1995	0.11	2.33	5.75	237.51	65.88	557.01	560.48	283.18	70.96	78.04	11.90	0.19
1996	12.93	23.19	80.43	91.17	138.09	238.70	108.97	262.68	43.34	56.28	60.61	22.64
1997	21.74	32.41	20.58	490.55	209.83	718.70	295.04	277.92	325.42	302.67	101.02	33.44
1998	1.02	25.66	14.46	100.92	170.61	149.74	93.02	99.30	120.10	0.00	9.81	52.42
1999	4.99	30.70	22.14	39.17	224.74	521.58	143.35	375.84	373.43	45.82	14.66	9.09
2000	9.21	212.54	7.36	69.76	107.69	1014.75	168.64	218.60	406.90	31.61	48.72	50.33
2001	120.60	2.28	8.42	95.23	576.01	296.73	875.89	349.85	42.48	43.46	50.08	0.00
2002	8.67	156.59	229.93	102.58	412.42	356.59	265.52	649.61	201.45	325.22	84.62	24.33
2003	39.75	0.00	1.07	27.52	157.89	552.27	224.10	112.86	175.19	122.06	98.45	30.60
2004	4.78	15.56	93.23	281.18	51.07	368.15	421.75	126.22	209.82	157.41	97.07	59.19
2005	13.63	0.00	26.61	14.72	662.83	588.53	386.48	528.19	74.59	39.67	102.55	77.16
2006	41.04	15.68	6.21	144.65	239.45	621.82	566.99	372.30	134.79	195.70	11.33	92.58
2007	15.54	108.86	45.93	98.77	49.47	203.97	380.02	189.94	93.15	33.74	8.49	10.80
2008	21.60	15.86	19.56	124.09	746.71	249.78	341.12	377.65	90.20	31.31	12.02	27.51
2009	0.23	22.85	0.44	72.08	421.90	386.35	255.38	347.42	167.82	171.74	105.45	9.87
2010	10.57	49.48	0.94	13.56	118.00	410.44	303.03	225.64	25.84	76.66	50.55	52.13
2011	49.43	39.53	79.23	159.23	86.33	367.14	297.72	523.52	139.58	31.77	48.62	0.07
2012	15.11	160.01	6.60	32.81	366.92	476.20	78.05	208.88	21.08	119.38	73.09	234.00
2013	4.65	73.92	13.72	25.36	400.44	216.48	284.23	226.80	197.81	76.78	19.63	0.16
2014	18.51	14.68	48.94	98.49	232.60	418.79	409.59	301.82	264.67	48.55	13.39	69.11
2015	0.00	0.00	0.48	34.42	130.12	263.40	490.87	548.73	205.31	184.36	16.86	3.82
2016	13.66	17.66	0.00	286.33	133.52	32.15	328.18	168.35	51.12	182.68	21.82	46.69
2017	15.66	24.50	49.99	104.91	216.40	485.71	198.25	421.12	151.86	195.29	82.93	5.85
2018	14.29	16.52	79.26	185.72	179.40	267.45	161.82	180.18	332.19	169.61	113.33	27.69
2019	32.56	4.96	3.87	21.14	314.78	356.08	161.56	131.79	133.23	77.95	17.16	18.43

Tabla A2. Temperatura media Mensual en base a datos diarios, aplicadas al modelo HBV.

Fecha	Temperatura Media (°C)											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic
1990	16.89	16.76	13.90	10.73	7.01	5.90	4.03	7.19	7.23	9.58	12.36	15.08
1991	15.81	16.88	15.43	11.65	8.47	5.34	3.60	4.90	7.75	9.22	12.44	13.16
1992	17.76	15.65	15.76	9.96	6.08	3.57	2.65	5.89	7.32	9.09	12.87	14.41
1993	17.10	17.87	15.83	11.28	5.11	5.46	2.82	5.98	6.71	9.72	11.32	14.68
1994	17.09	15.98	15.73	11.26	8.05	5.54	3.97	5.24	8.47	9.37	12.75	15.53
1995	16.26	15.97	14.29	11.57	9.38	5.28	1.34	3.25	7.23	9.18	12.99	17.44
1996	15.90	15.90	15.31	10.09	7.74	4.55	5.74	5.38	8.07	9.72	13.20	15.12
1997	16.63	16.40	16.37	13.05	9.16	4.35	5.34	6.25	7.47	7.69	11.53	14.68
1998	16.88	16.61	14.55	10.83	8.94	5.56	5.08	4.77	6.60	11.79	12.62	16.09
1999	17.61	17.12	13.62	11.31	8.64	5.31	3.21	5.64	6.40	10.32	12.73	15.12
2000	16.22	15.05	13.73	11.57	7.36	4.62	2.97	4.98	6.25	10.00	11.69	15.42
2001	15.97	17.21	15.01	10.31	6.84	4.71	4.16	5.91	6.78	10.89	11.39	17.69
2002	17.18	17.18	13.74	9.94	7.19	3.25	4.18	5.35	6.34	8.80	11.55	14.84
2003	17.01	15.76	16.26	11.13	7.73	6.55	3.46	5.79	7.59	10.67	12.86	13.55
2004	17.95	17.12	15.63	10.65	8.31	5.28	4.48	5.82	7.67	8.88	11.95	14.99
2005	16.24	17.94	14.35	10.99	5.63	5.15	4.95	5.37	6.47	9.29	12.79	14.93
2006	17.22	17.53	13.87	11.67	8.59	6.05	4.82	5.27	7.34	9.13	12.34	14.43
2007	17.26	15.14	14.78	10.57	6.83	2.87	2.14	2.32	6.11	8.87	12.15	15.10
2008	17.75	17.92	14.97	10.72	7.47	4.32	4.61	3.87	7.53	9.65	14.12	16.61
2009	18.02	16.60	16.29	13.65	8.80	5.18	3.24	5.10	5.90	9.19	9.60	14.18
2010	17.15	15.63	15.56	10.81	7.97	4.75	1.29	3.99	6.52	9.29	12.06	13.73
2011	16.73	16.74	14.02	10.89	8.40	4.08	2.76	3.64	7.10	9.00	12.31	16.63
2012	17.63	16.37	16.08	11.37	8.76	6.24	3.53	4.76	8.40	8.89	13.04	13.12
2013	18.58	16.56	14.13	11.71	7.49	5.41	4.76	4.95	6.17	9.73	12.36	16.61
2014	17.42	15.63	14.09	10.55	7.82	4.30	3.76	6.50	6.76	10.55	11.89	14.79
2015	17.84	17.06	16.54	12.59	7.98	5.26	4.25	5.50	6.87	8.26	11.57	15.37
2016	17.87	17.50	16.51	10.68	8.70	5.22	4.63	6.50	9.81	10.23	13.88	15.44
2017	18.68	17.76	14.77	11.15	6.99	4.11	4.16	4.17	6.98	8.44	12.29	15.96
2018	17.55	17.76	14.54	11.84	7.98	3.74	4.15	5.58	8.06	9.36	12.62	15.40
2019	17.18	18.25	14.98	12.22	8.01	4.38	4.20	6.11	7.33	9.04	13.64	15.95

Tabla A3. Caudales Observados mensuales en base a datos diarios, aplicados al modelo HBV.

Fecha	Caudal Observado (m ³ /s)											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic
1990	70.98	40.87	170.83	562.59	1023.93	583.93	545.5	898.3	2202	792.4	314.36	118.62
1991	25.59	35.52	31.161	146.809	4149.62	2391.9	2572.1	767.8	1712	1081	513.4	467.22
1992	195.36	89.81	137.91	643.08	4711	4163	1795.1	828.7	1185	1246.1	725.8	347
1993	152.55	65.66	49.36	214.58	2016.1	3640.1	456.7	2192.3	994.9	486.9	68.9	384.24
1994	131.06	66.5	49.85	324.08	985.34	1985.8	1716					
1995				280.03	360.18	3102	3064.4	909		1089	618.2	237.11
1996	93.84	79.64	97.46	198.74	215.34	1377.2	746.28	930.32	623.9	322.8	191.53	103.31
1997	68.65	53.47	42.54	796.92	1347	4891	2153.5	2395.3	2498	2410.1	1227.4	401.41
1998	174.45	110.4	77.82	140.76	321.77	409.25	309.6	407.56	333.1	196.78	121.96	98.28
1999	93.57	98.97	26.3		236.27	1156	617.7	1197.7	2439	828.4	519.79	183.05
2000	110.38	231.7	122.51	93.66	192.11	4632.2	3110.2	2216.5	3684	1742.2	844.9	444.8
2001	114.1	167	166.87	237.86	3494.12	2393.5	6316.7	2795.6	929.9	580	314.19	177.2
2002	89.34	117.3	535.09	279.98	1046.25	1578	135.6	1817.3	284.6	2657.2	1215.7	505.86
2003	237.55	125.4	94.07	62.63	225.43	2885	891.2	243.2	931.7	947.3	615.5	266.26
2004	102.47	60.45	62.7	1054.04	286.91	1519.1	2052.2	1271.2	1608	808.3	535.83	219.69
2005	135.23	76.18	459.3	419.9	1824	3346	3189.2	3510.7	1516	718.8	726.7	404.25
2006	318.81	87.93	68.73	407.01	1140.62	3935.3	3297.3	507.7	1829	1520.7	698	404.9
2007	272.26	252.4	164.85	182.48	244.24	424.55	1749	932.8	999.1	867.8	472.6	171.88
2008	76.51	51.2	4.48	46.556	2996.56	1474.8	1656.9	2545.3	1205	498.58	153.13	136.014
2009	103.73	60.42	49.8	52.53	1223.02	1479.7	1744.6	2166.9	1468	1083.7	783.1	353.81
2010	109.55	92.63	98.17	76.87	112.36	934.43	1158.8	1245.5	951.5	850.4	691.8	345.12
2011	160.59	60.17	91.91	351.9	423.62	1320.8	1393.7	2438.6	1639	1066	822.9	266.59
2012	45.361	125.4	110.85	72.92	957.74	2116.2	1230.4	844.6	538.7	461.61	262.17	1158.2
2013	325.1	90.96	64.84	54.82	505.77	497.07	1686.6	975.9	1438	788.2	518.5	242.79
2014	49.505	41.86	41.221	57.1	464.8	1711.6	1776.2	2763.2	1964	1141.9	570.57	243.91
2015	151.23	84.88	76.41	73.52	148.95	540.79	1908.6	3083.6	1126	1082.3	481.4	267.81
2016	143.98	71.59	54.66	217.59	270.66	254.99	864.04	711	447.5	677.53	209.52	141
2017	67.065	32.22	62.69	151.97	602.85	1536.7	1232.3	1288.7	1120	1450	1002.7	302.54
2018	114.03	67.67	86.5	282.16	402.41	1022.7	1117.5	602.5	1390	1155.1	908.7	276.17
2019	143.32	78.78	57.99	48.6	340.16	1276.4	845.2	1033.9	850.9	620.62	411.212	161.529