

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



ESTUDIO DEL ÁREA DE RECARGA DE LA VERTIENTE DE AGUA FRÍA

KATTIA PAOLA FIGUEROA MEDEL

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

CHILLÁN - CHILE

2024

ESTUDIO DEL ÁREA DE RECARGA DE LA VERTIENTE DE AGUA FRÍA

Aprobado por:

José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Profesor Guía

Víctor Parra Ramírez
Ingeniero Civil, Dr.
Profesor Asistente

Profesor Co-Guía

Jerónimo Paredes Cáceres
Licenciado en Matemáticas, Dr.
Profesor Asociado

Profesor asesor

José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
Profesor Asociado

Decana

DEDICATORIA

A las amistades que me brindó la universidad, quienes de diversas formas fueron parte de este proceso, en especial a Daniela Navarrete y Belén Sánchez, con las cuales compartí largas tardes de estudios y risas, , y que, con su gran paciencia, me ayudaron durante mis años de estudio.

A mi tía Paola por enseñarme a abrir mi mente y explorar más allá, a mi abuelita por su amor incondicional y a mi abuelito, que estuvo presente en todo este proceso, acompañando y entregándome la claridad necesaria.

A mis gatitas, Koda, Kali y Yumi, porque todas en algún momento, fueron mi compañía en las maratónicas noches de estudio, entregando la paz y alegría que necesitaba en esos momentos.

A mi hermana, Camila, por su amor, consejos, guía y sabiduría que me ha entregado a lo largo de mi vida, por ser mi mejor amiga, por estar en las buenas y las malas, por entregar siempre un simple consejo logra calmar mis ansiedades sobre el futuro.

A mis padres, Fernando y Lorena, por todo el amor y apoyo que me dan, por ciegamente creer en mí y permitirme lograr todos los sueños y metas que me he propuesto, por enseñarme a confiar en mí, por ayudarme a aclarar mi mente en momentos de inquietud.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. José Luis Arumí por la guía y paciencia que me ha brindado a lo largo de este proceso de tesis. Con su experiencia y orientación he logrado concluir mis estudios como esperaba.

También agradezco al Profesor Víctor Parra, por aceptar el compartir sus conocimientos sobre el modelo, sin su guía no podría haber realizado este trabajo.

Finalmente, le doy mis agradecimientos al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería (CRHIAM), por darme la oportunidad de ser becario del proyecto ANID/FONDAP/1523A0001

INDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS.....	6
2.1 Objetivo general	6
2.2 Objetivos específicos.....	6
3. ANTECEDENTES GENERALES	7
3.1 Área de estudio	7
3.2 Hidrogeología del Valle Las Trancas	7
4. METODOLOGÍA	8
4.1 Obtención de datos	8
4.2 Modelo conceptual HBV	9
4.2.1 Rutina de nieve	11
4.2.2 Rutina de suelo	11
4.2.3 Evapotranspiración.....	12
4.2.4 Rutina de respuesta	12
4.3 Parámetros.....	13
4.4 Balance hídrico.....	14
5. RESULTADOS	15
5.1 Área preliminar	15
5.2 Modelación.....	16
6. CONCLUSIÓN	22
7. BIBLIOGRAFÍA.....	23
8. ANEXOS.....	24

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto	Página
Tabla 1. Rangos de parámetros de calibración para el modelo HBV.....	14
Tabla 2. Balance hídrico con datos obtenidos del año 2023.....	16
Tabla 3. Rangos de parámetros de calibración modificados para el modelo HBV.....	19
Tabla 4. Valores obtenidos para el índice de Nash-Sutcliffe para el rango de área definido.....	21
En el Anexo	Página
Tabla A1. Valores obtenidos de índice de Nash-Sutcliffe para cada área simulada.....	24

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. (a) Vertiente fría seca en junio 2023 (b) Vertiente fría con caudal medio en agosto 2023 (c) Vertiente fría con un gran caudal en octubre 2023 (d) Vertiente fría con caudal medio en julio 2024.....	3
Figura 2. Curva de descarga de la vertiente de agua fría.....	9
Figura 3. Caudal vertiente de agua fría, durante las fechas 28 de julio de 2023 a 04 de junio de 2024.....	9
Figura 4. Diagrama conceptual del modelo HBV simplificado, incluye la definición de sus parámetros y ecuaciones principales.....	10
Figura 5. Aproximación al área aportante de la vertiente de agua fría.....	15
Figura 6. Simulaciones con parámetros iniciales para las áreas (a) 15 km ² (b) 20 km ² (c) 30 km ² (d) 40 km ²	17
Figura 7. Simulaciones para un área de 30 km ² , cada una con valores de parámetros distintos.....	18
Figura 8. (a) Mejor simulación de caudal para 15 km ² (b) Mejor simulación de caudal para 20 km ² (c) Mejor simulación de caudal para 30 km ² (d) Mejor simulación de caudal para 40 km ²	20
Figura 9. Resultados del índice de Nash-Sutcliffe, para la serie de valores de área de 15 a 45 km ²	21

ESTUDIO DEL ÁREA DE RECARGA DE LA VERTIENTE DE AGUA FRÍA

STUDY OF THE RECHARGE AREA OF THE AGUA FRIA SPRING

Palabras claves: Modelación; almacenamiento y descarga de aguas subterráneas; Modelo HBV

RESUMEN

La vertiente de Agua Fría, ubicada en el Valle de las Trancas, Chillán, posee un comportamiento particular con un caudal variable a lo largo del año, esto debido a los suelos permeables de formaciones volcánicas presentes en los valles cordilleranos. Con este estudio se estimó el área de recarga de la vertiente de Agua Fría, a través de dos aproximaciones, una delimitación de la cuenca aportante a las vertientes y un balance hídrico, con los datos de escorrentía y precipitación anual. Con los caudales observados en los años 2023-2024, datos extraídos en terreno, se llevaron a cabo simulaciones de caudal utilizando el modelo HBV, para evaluar la precisión del modelo y sus resultados se empleó en Índice de Nash-Sutcliffe. Los resultados sugieren que la zona de recarga de la vertiente posee un área aportante en el rango de 23 a 30 km².

STUDY OF THE RECHARGE AREA OF THE AGUA FRÍA SPRING

Keywords: modeling; groundwater storage-discharge; HBV Model

ABSTRACT

The Agua Fría spring, located in the Valle de las Trancas, Chillán, exhibits a particular behavior with a variable flow rate throughout the year, due to the permeable soils from volcanic formations present in the mountain valleys. This study estimated the recharge area of the Agua Fría spring through two approaches: delineating the contributing watershed and performing a hydrological balance using runoff and annual precipitation data. Using flow rates observed during the years 2023-2024, with field data collected on-site, flow simulations were carried out using the HBV model. To evaluate the model's accuracy, the Nash-Sutcliffe Efficiency Index was used. The results suggest that the recharge area of the spring has a contributing area in the range of 23 to 30 km².

1. INTRODUCCIÓN

Las vertientes, o manantiales, son puntos de salida naturales de las aguas subterráneas, las cuales afloran formando esteros, arroyos y ríos. Al vaciar un gran depósito de aguas subterráneas, estas formaciones geológicas presentan un caudal que tiende a ser estable, incluso en años secos. Por esta razón, las vertientes han sido fuentes de agua que la humanidad ha utilizado desde siempre. En general son consideradas fuentes de agua segura, ya que presentan una buena calidad proveniente de las aguas subterráneas y mantienen una temperatura constante. Su temperatura dependerá de cómo se recarga el depósito de agua subterránea que se descarga en la vertiente: si es una vertiente de montaña, que se recarga por lluvias o derretimiento de nieves, el agua será fría, pero si el depósito está en un sistema volcánico, su temperatura será mayor.

Algunos valles cordilleranos de la zona central de Chile han presentado un aumento en las comunidades que habitan allí, debido al desarrollo agrícola, de la industria agroalimentaria y del turismo. En los valles cordilleranos las aguas subterráneas son profundas y difíciles de captar y por ello las vertientes son la principal fuente de agua para los pobladores de la zona. Sin embargo, al ser las vertientes consideradas aguas superficiales, pues afloran de forma natural, en muchos lugares los derechos de uso de agua superficial se encuentran agotados.

En el sector del Valle de las Trancas se encuentra una vertiente conocida localmente como vertiente de Agua Fría, que actúa distinto al comportamiento esperado de una vertiente. Al drenar un sistema de almacenamiento subterráneo, se espera que una vertiente posea un caudal estable con variaciones lentas a lo largo del tiempo. Pero la vertiente de Agua Fría posee un comportamiento muy variable a lo largo del año, presentando un caudal abundante o completamente seco con el pasar de los meses.



Figura 1. (a) Vertiente fría seca en junio 2023 (b) Vertiente fría con caudal medio en agosto 2023 (c) Vertiente fría con un gran caudal en octubre 2023 (d) Vertiente fría con caudal medio en julio 2024.

Por ello se ha desarrollado una hipótesis de trabajo que la vertiente de Agua Fría posee una zona de recarga compuesta por los rellenos de material volcánico muy permeables que existen en el sector de Shangri-La, en el Valle del Renegado y por ello responde muy rápidamente a eventos de precipitación.

Este estudio busca avanzar en el estudio de la hipótesis determinando el área de recarga de la Vertiente de Agua Fría, mediante el análisis de datos extraídos en el sector y el uso del modelo hidrológico conceptual HBV, para así lograr comprender el comportamiento de esta vertiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Estimar la superficie aportante de la vertiente de Agua Fría

2.2 Objetivos específicos

- Sintetizar información hidrogeológica del sistema de vertientes de Agua Fría
- Analizar los datos hidrológicos medidos en la vertiente de Agua Fría
- Determinar mediante modelación hidrológica el área aportante a la vertiente

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Área de estudio

En la parte norte del Valle de Las Trancas, comuna de Pinto, Región de Ñuble, se encuentra el grupo de vertientes de Agua Fría, correspondientes a vertientes emplazadas en torno a una quebrada que recibe el aporte de depósitos de aguas subterráneas formados en el valle de Shangri-La. En el sector cordillerano de los Andes se desarrolla un clima frío de altura con abundantes precipitaciones, que superan incluso los 2.000 mm anuales. Esto, sumado a las bajas temperaturas imperantes, permite la presencia de nieves permanentes en la sección de mayores altitudes.

3.2 Hidrogeología del Valle Las Trancas

El Valle de las Trancas se encuentra delimitado geográficamente por diferentes afloramientos de origen volcánico, tanto al sur como al norte del valle, formando una especie de cajón. En el sur se encuentra la unidad geológica denominada Batolito Santa Gertrudis-Bullileo (Msgb), mientras que, hacia el oeste, en dirección a Chillán, se encuentran las lavas Los Pincheiras (Plp), que se distribuyen a lo largo del Valle Las Trancas, encausando al Estero Renegado. Los bancos laterales canalizados aguas abajo del sector del Valle Las Trancas cubren lateralmente las lavas Los Pincheiras. Aflorando a lo largo del valle del Estero Renegado se encuentra un depósito de lavas Atacalco (Pla). En dirección opuesta, al noreste del valle de Las Trancas, entre los valles de los esteros Shangri-La y Renegado, se encuentran las lavas Lanalhue (PlI). Entre las lavas Atacalco, Pincheira y Batolito Santa Gertrudis-Bullileo, se

localiza una lengüeta de lavas correspondiente al Volcán Democrático (Ltd); estas también se encuentran presentes en el valle de Shangri-La en dirección al Ecoparque. Los depósitos aluviales-laharicos, depósitos coluviales y abanicos aluviales (Hca; Hal) se presentan a lo largo del Valle Las Trancas, cubriendo y rellenando la superficie de lavas más antiguas (Navarro, 2016).

En el sector predominan los suelos arenosos con tasas de infiltración elevadas (superiores a 200 mm/hr), la existencia de estos suelos sobre una base compuesta por rocas fracturadas favorece la recarga de aguas subterráneas y explica por qué el Estero Renegado no presenta escorrentía superficial significativa. Una gran cantidad de agua de lluvia y deshielo de la nieve se infiltra en el suelo permeable de arena y percola hacia el sistema de rocas fracturadas, donde el agua es desplazada a través del sistema de rocas fracturadas y se descarga en el río Diguillín a través de las vertientes (Arumí et al., 2019).

4. METODOLOGÍA

4.1 Obtención de datos

Para comprender el comportamiento del caudal, se recopilaron datos en terreno, donde se instaló el Sensor Hydros 21 conectado a un data logger Meter ZL6, una herramienta precisa que proporciona mediciones continuas del nivel de agua, la conductividad eléctrica y la temperatura en la sección de control. Además, mediante aforos se determinó la curva de descarga de la

vertiente. Los valores de las precipitaciones diarias se tomaron de la estación Las Trancas, extraídos de la base de datos Dirección General de Aguas.

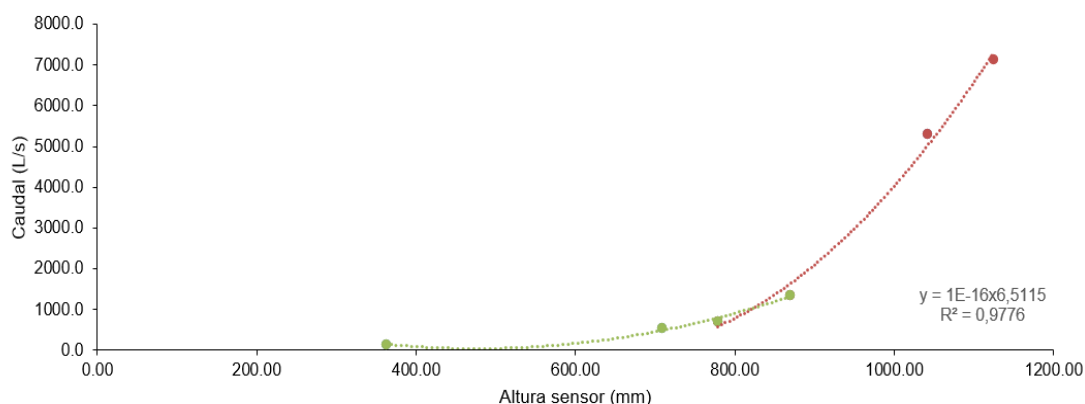


Figura 2. Curva de descarga de la vertiente de agua fría.

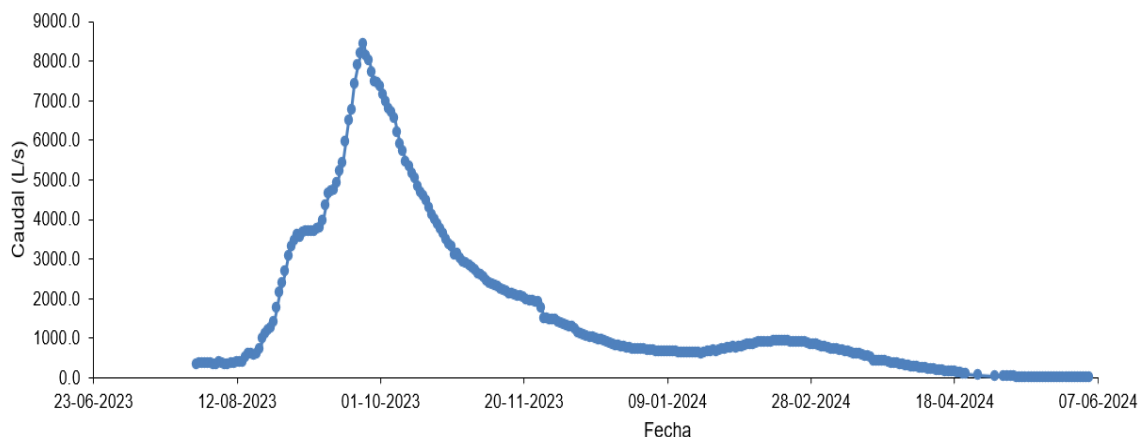


Figura 3. Caudal vertiente de agua fría, durante las fechas 28 de julio de 2023 a 04 de junio de 2024.

4.2 Modelo conceptual HBV

En este estudio se utilizó la versión simplificada de este modelo, desarrollada por Aghakouchak y Habib (2010) y basada en Bergström (1992). El modelo simula el caudal diario en función de las series temporales diarias de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial. Consta de tres

módulos: uno que procesa la precipitación de entrada, ya sea como lluvia o nieve, según la temperatura de entrada en cada paso de tiempo. La lluvia y el deshielo de la nieve (si lo hay) se procesan luego en el módulo de humedad del suelo, donde se evalúa la lluvia efectiva que contribuye al escurrimiento superficial. La parte restante de la lluvia contribuye al almacenamiento de humedad del suelo, que a su vez puede evaporarse siempre y cuando haya suficiente contenido de agua en el subsuelo. La principal salida del modelo es el escurrimiento en el punto de salida de la cuenca hidrográfica, que tiene tres componentes: escurrimiento superficial, interflujo (contribución del flujo superficial cercano) y flujo base (contribución del flujo subterráneo). A continuación, se describen brevemente los detalles de cada módulo.

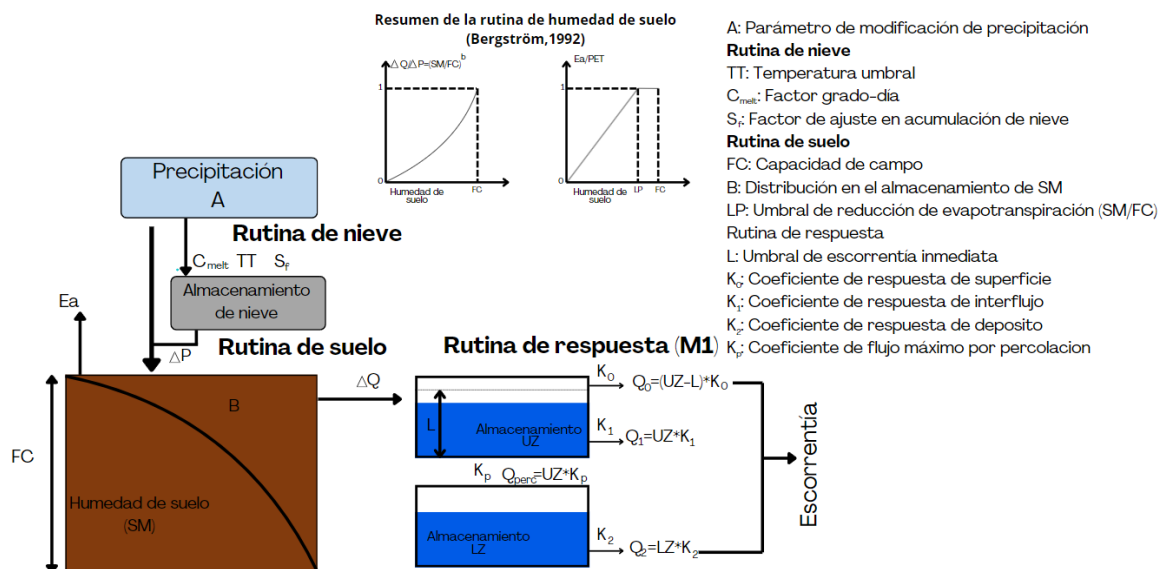


Figura 4. Diagrama conceptual del modelo HBV simplificado, incluye una descripción de sus parámetros y ecuaciones principales.

4.2.1 Rutina de nieve

Se considera como precipitación sólida o líquida dependiendo de la temperatura del día correspondiente, ya sea por encima o por debajo de una temperatura umbral (T_U) igual a 0 °C. Si ocurre un evento de precipitación cuando la temperatura está por debajo de T_U , entonces la precipitación se acumula como nieve; de lo contrario, se asume que la precipitación de entrada es lluvia. Mientras la temperatura permanezca por debajo del umbral, la precipitación de entrada no contribuye al escurrimiento y se asume acumulada, por lo que se multiplica por un factor de corrección de acumulación de nieve (S_f). Además, toda la nieve contribuye directamente al almacenamiento de nieve (SS).

Sin embargo, tan pronto como la temperatura excede el umbral, tanto el deshielo como la precipitación comienzan a contribuir al escurrimiento. El agua de deshielo de nieve es controlada por un factor de grado-día (C_{melt}), que determina la cantidad diaria de nieve derretida dependiendo de la diferencia entre las temperaturas reales y el umbral.

4.2.2 Rutina de suelo

La capacidad de campo (FC) es el parámetro que describe el almacenamiento máximo de humedad del suelo (SM) en la zona subsuperficial. Generalmente, cuanto mayor sea la cantidad de contenido de humedad del suelo en el momento de la precipitación, mayor será la contribución de la precipitación a la producción de escurrimiento. Para determinar la contribución relativa de la lluvia o el deshielo de nieve al escurrimiento, el escurrimiento (ΔQ) se divide

por la suma de la precipitación y el deshielo de nieve (ΔP). Esta relación se iguala a la del contenido actual de agua del suelo (SM) y la humedad máxima del suelo (FC), elevada al coeficiente de escurrimiento (β).

4.2.3 Evapotranspiración

El modelo HBV incorpora un método para calcular la evapotranspiración diaria (PET) a partir de valores mensuales. Para comenzar, la rutina necesita la evapotranspiración potencial mensual media a largo plazo (PET_m) obtenida del método de Thornthwaite, los promedios mensuales de temperatura a largo plazo (T_m) y la temperatura del aire media diaria (T_d). La evapotranspiración diaria se calculaba ajustando la PET_m en función de la diferencia entre T_d y T_m y un coeficiente C. El parámetro del modelo C se utiliza para mejorar el rendimiento del modelo cuando la temperatura media diaria se desvía considerablemente de su media a largo plazo.

La evapotranspiración real (E_a), es igual a la evapotranspiración potencial (PET) si la relación entre la humedad del suelo y la humedad máxima del suelo (SM/FC) está por encima de un valor umbral para la evapotranspiración potencial (LP). Por otro lado, para valores de humedad del suelo por debajo de LP, la evapotranspiración real se reduce linealmente.

4.2.4 Rutina de respuesta

El sistema consiste en dos compartimentos de almacenamiento, uno sobre el otro, que están directamente conectados entre sí a través de una tasa de infiltración constante (Q_{perc}). El depósito superior tiene dos salidas (Q_0 y Q_1),

mientras que el depósito inferior posee una (Q_2). Cuando el nivel de agua en el depósito superior excede un valor umbral (L), se produce rápidamente un escurrimiento en su parte superior (Q_0). La respuesta de las otras salidas es relativamente lenta. Los caudales en el río deben ser controlados por coeficientes de recesión k_0 , k_1 y k_2 , que representan las funciones de respuesta de los depósitos superior e inferior. La tasa de infiltración constante (Q_{perc}) es controlada por un coeficiente k_p .

Para asegurar que el proceso de escurrimiento superficial sea más rápido que el escurrimiento subsuperficial y de aguas subterráneas, el valor inicial de k_0 siempre debe ser mayor que k_1 . Además, la respuesta de la tercera salida, escurrimiento de aguas subterráneas (Q_2), debe ser más lenta que la de la segunda (Q_1); por lo tanto, k_2 debe ser menor que k_1 .

4.3 Parámetros

Los parámetros deben pasar por un proceso de calibración en el cual se ajustan los valores de los parámetros del modelo de manera que los valores simulados sean lo más parecido a los observados o promedios de valores observados. En este caso, los rangos para el modelo HBV, expuestos en la Tabla 2, fueron extraídos del modelo modificado por Parra (2019) definidos de acuerdo con la representación conceptual de cada uno y la experiencia adquirida en estudios previos sobre cuencas chilenas. Este incluye un parámetro de ajuste de precipitación (parámetro A) para corregir la subestimación de la precipitación debido al efecto orográfico de la cuenca de estudio.

Tabla 1. Rangos de parámetros de calibración para el modelo HBV.

Parámetro (unidades)	HBV
<i>Balance de masa</i>	
A	0.8 – 2
<i>Rutina de nieve</i>	
C_{melt} ($\text{mm}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{d}^{-1}$)	0.5 – 7
S_f	0.5 – 1.2
<i>Rutina de suelo</i>	
FC (mm)	0 - 2000
β	0 – 7
LP	0.3 – 1
C ($^{\circ}\text{C}$)	0.01 – 0.3
<i>Rutina de respuesta</i>	
L (mm)	0 – 100
k_0	0.3 – 0.6
k_1	0.1 – 0.2
k_2	0.01 – 0.1
k_p	0.01 – 0.1

Fuente: Parra et al. (2019)

4.4 Balance hídrico

Con el conjunto de datos obtenidos en el año 2023 se calculó un balance hídrico para estimar el tamaño de la superficie aportante a la vertiente. Para ello, se determinó el volumen total de escorrentía, calculando la escorrentía diaria según el promedio del caudal observado. El volumen de escorrentía se dividió por las precipitaciones totales del año 2023. Para ajustar el valor a esta relación, se utilizó el coeficiente de escorrentía de 0.3, valor recomendado por la DGA para la región (DGA, 1995).

5. RESULTADOS

5.1 Área preliminar

A pesar de que en la zona de estudio predominan unidades geológicas compuestas por rocas fracturadas, se delimitó en Google Earth el área aportante de las cuencas superficiales de los esteros secos, la vertiente fría y Shangri La, para obtener una aproximación inicial de la cuenca aportante a las vertientes. Como se aprecia en la Figura 5, el área superficial aportante a estos esteros posee una superficie de 36 km².

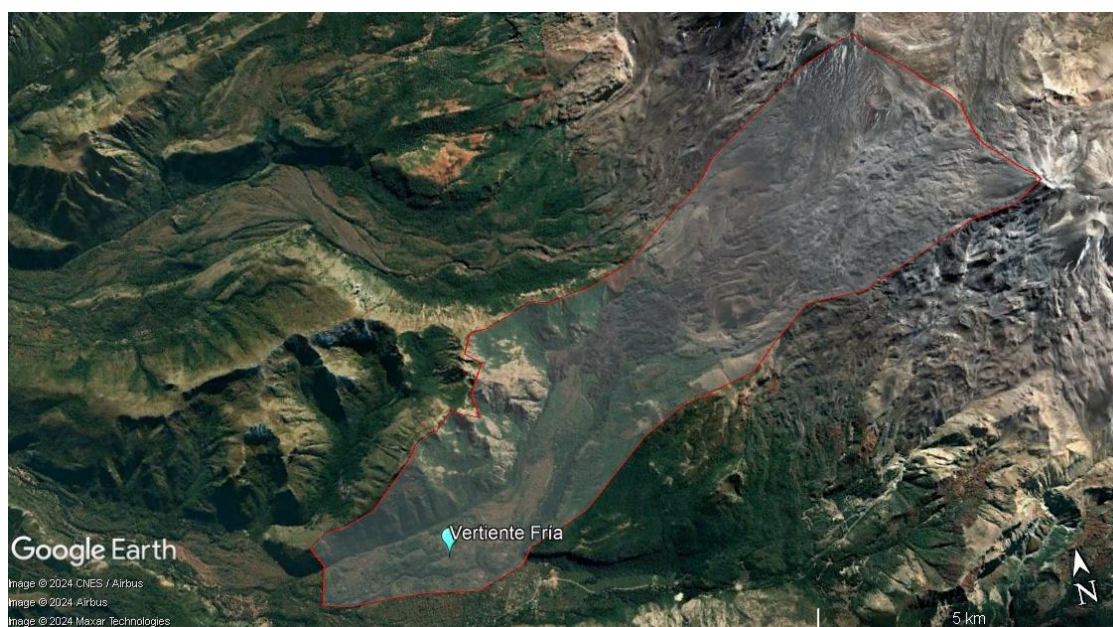


Figura 5. Aproximación al área aportante de la vertiente de agua fría.

Por otro lado, el balance hídrico realizado nos dio como resultado un área de 18.6 km². Esta superficie proporciona una estimación del orden de magnitud del área que aporta agua a la vertiente fría. Los parámetros utilizados se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Balance hídrico con datos obtenidos del año 2023.

Parámetros (unidades)	Valor
Volumen esorrentía (m ³)	43782051.45
Precipitación (mm)	3358
Área (km ²)	18.6

5.2 Modelación

Para este estudio, el área será un parámetro adicional y se definió como un rango de 15 a 45 km², considerando aspectos del terreno, del suelo y del área preliminar. Para cada propuesta de área se realizaron 20.000 simulaciones. En cada simulación se analizaron los 312 datos de caudal observado para generar el caudal simulado.

En un principio, se realizaron las simulaciones con los parámetros modificados por Parra (2019), los cuales entregaron resultados desfavorables, como se observa en la Figura 6. Como se explicó anteriormente, la vertiente de Agua Fría posee un comportamiento diferente, por lo que se debió realizar una calibración de los parámetros.

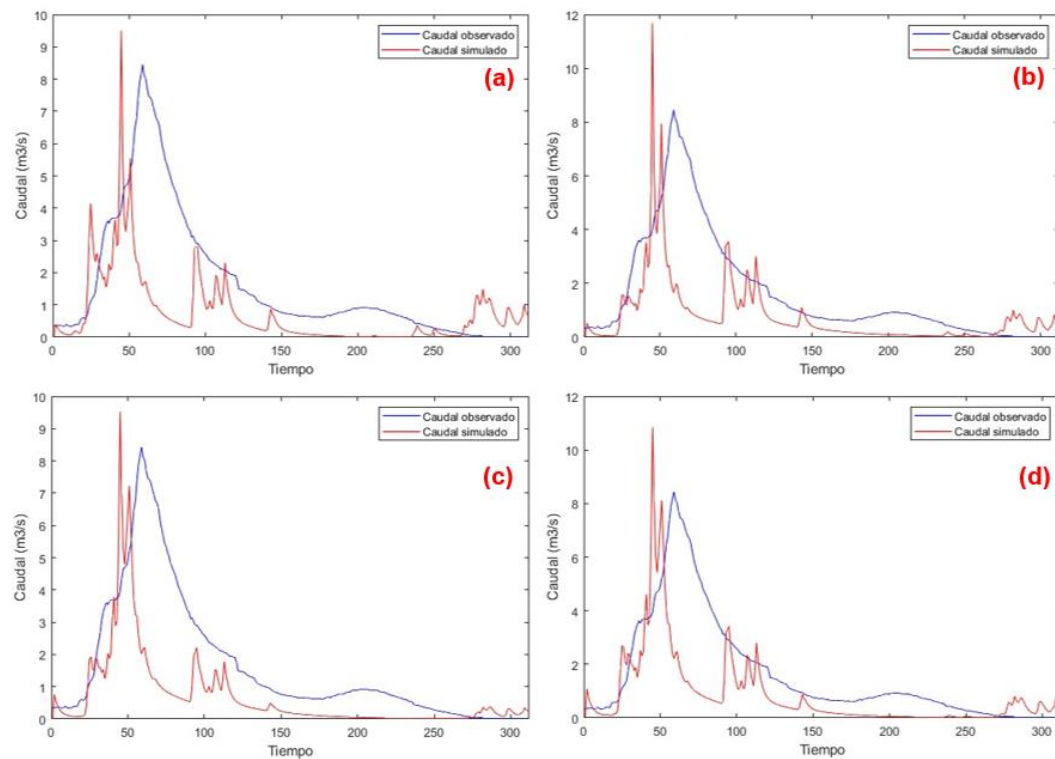


Figura 6. Simulaciones con parámetros iniciales para las áreas (a) 15 km² (b) 20 km² (c) 30 km² (d) 40 km².

En base a los valores óptimos que entrega el modelo para cada parámetro, se realizó una calibración de los parámetros utilizando el método de prueba y error, el cual implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. Como se observa en la Figura 7, los modelos muestran un pick de caudal desfasado, lo que implica que el modelo subterráneo está liberando el agua almacenada más rápido de lo esperado.

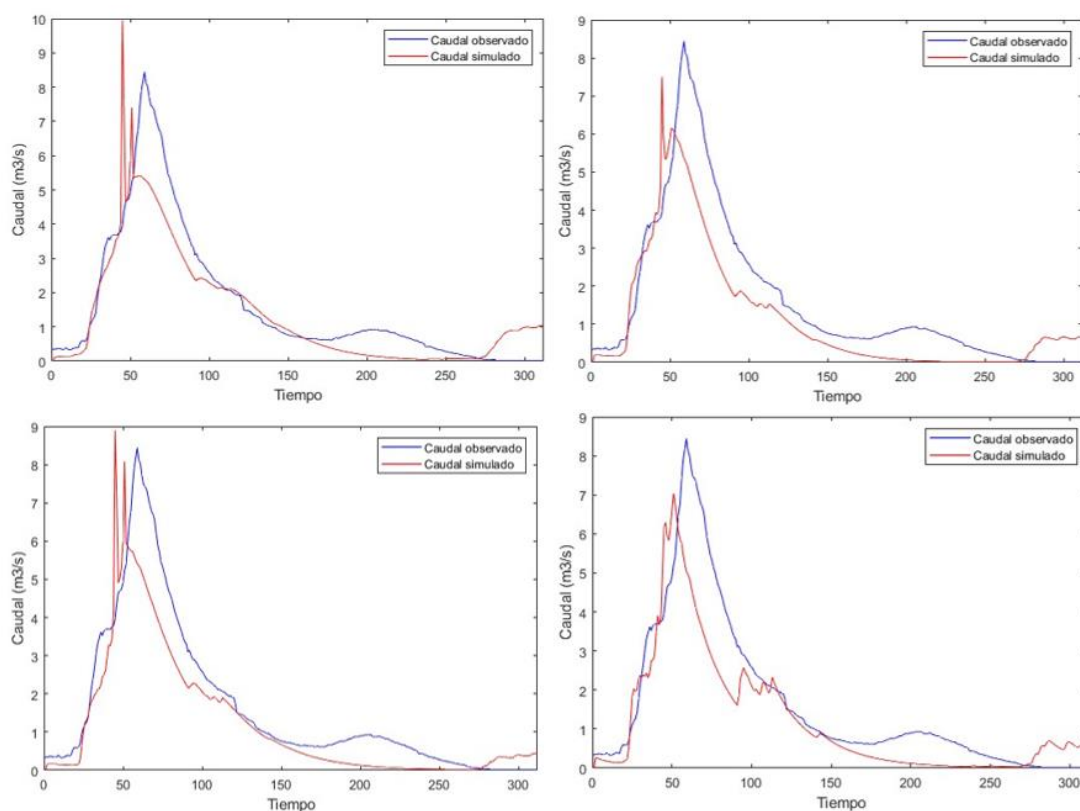


Figura 7. Simulaciones para un área de 30 km², cada una con valores de parámetros distintos.

Finalmente, se obtuvieron parámetros más adecuados para el caso, modificando la capacidad de campo (FC) (500 – 2000 mm) y el valor umbral (L) (100 – 200 mm). Además, se ajustaron los coeficientes k_1 y k_2 , (0.05 – 0.1 y 0.01 – 0.08 respectivamente) encargados del flujo base de la vertiente, para que el agua se liberara más lentamente en el acuífero. En la Tabla 3, se encuentran los parámetros aceptados e implementados en las simulaciones finales para conseguir los resultados esperados.

Tabla 3. Rangos de parámetros de calibración modificados para el modelo HBV.

Parámetro (unidades)	HBV
<i>Balance de masa</i>	
A	0.8 – 2
<i>Rutina de nieve</i>	
C_{melt} ($\text{mm}^{\circ}\text{C}^{-1}\text{d}^{-1}$)	0.5 – 7
S_f	0.5 – 1.2
<i>Rutina de suelo</i>	
FC (mm)	500 - 2000
β	0 – 7
LP	0.3 – 1
C ($^{\circ}\text{C}$)	0.01 – 0.3
<i>Rutina de respuesta</i>	
L (mm)	100 – 200
k_0	0.3 – 0.6
k_1	0.05 – 0.1
k_2	0.01 – 0.08
k_p	0.01 – 0.1

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizadas las 20.000 simulaciones para cada uno de los valores dentro del rango definido para el parámetro de área ($15 - 45 \text{ km}^2$), el modelo HBV seleccionó la simulación con mayor exactitud para cada área propuesta, en la Figura 8 se observan ejemplos de los resultados de caudal simulado. Cada uno de estos caudales fue seleccionado en base al Índice de Nash, también conocido como Índice de Nash-Sutcliffe o por sus siglas ENS, ya que es de los más utilizado en hidrología para evaluar la precisión de un modelo en la predicción de caudal. Este índice mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Un ENS cercano a 1 indica una excelente capacidad de predicción (Cabrera, 2012).

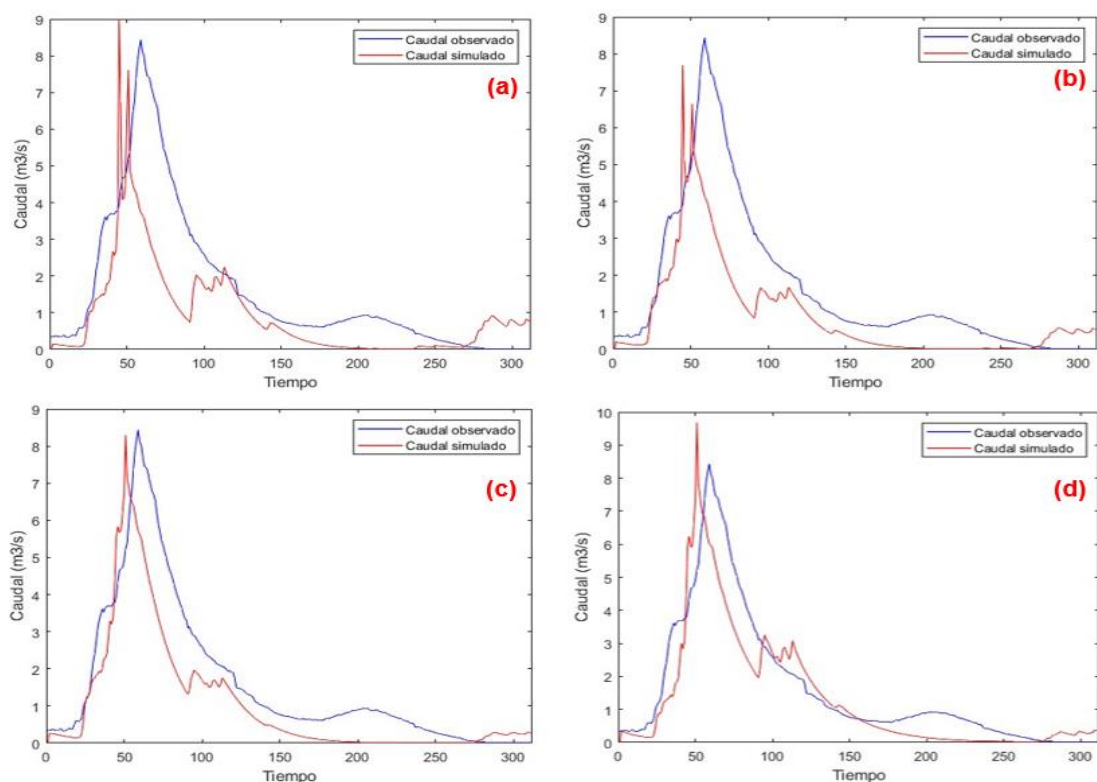


Figura 8. (a) Mejor simulación de caudal para 15 km² (b) Mejor simulación de caudal para 20 km² (c) Mejor simulación de caudal para 30 km² (d) Mejor simulación de caudal para 40 km².

Por esta razón, para el análisis de resultados se consideraron los valores del Índice de Nash como indicador. Como se puede apreciar en la Figura 9, en los 30 valores de las mejores simulaciones, el ENS se vuelve constante una vez que sobrepasa el área de 30 km², con valores aproximados a 0.8, por lo que se obtiene que el área aportante se encuentra en el rango de 23 a 30 km², la Tabla 4 expone los valores del índice de Nash para este rango.

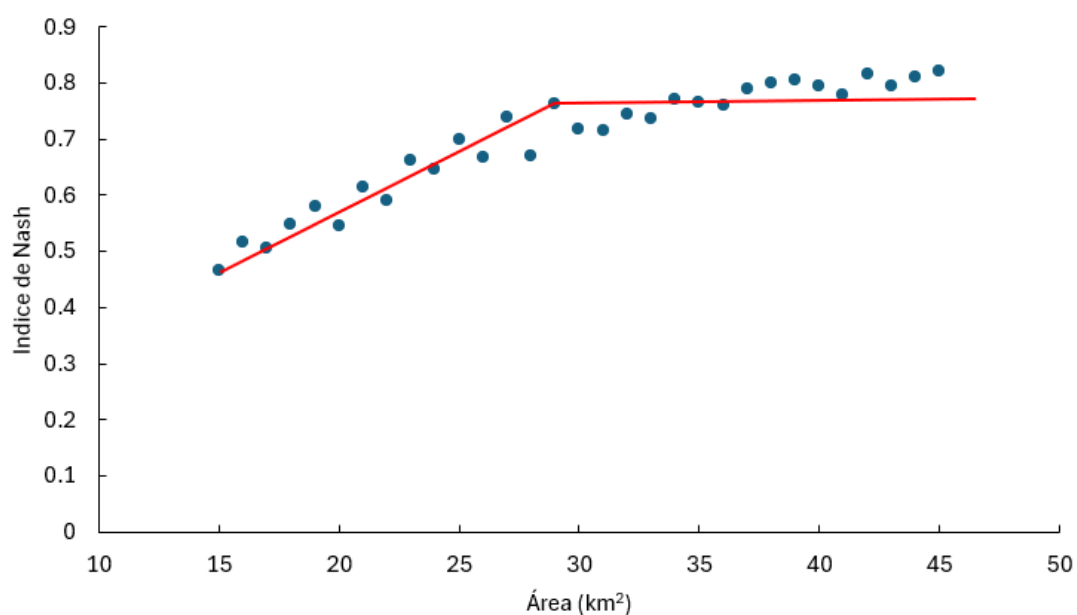


Figura 9. Resultados del índice de Nash-Sutcliffe, para la serie de valores de área de 15 a 45 km².

Tabla 4. Valores obtenidos del índice de Nash-Sutcliffe para el rango de área definido.

Área (km ²)	ENS
23	0.6634
24	0.6467
25	0.6996
26	0.6672
27	0.7401
28	0.6707
29	0.7622
30	0.7183

Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIÓN

El valle de las trancas presenta una geología compleja con depósitos de lavas y aluviales que cubren y rellenan formaciones más antiguas. Los suelos arenosos del valle, con su alta tasa de infiltración, junto con la base de rocas fracturadas, favorecen la recarga de aguas subterráneas. Esta dinámica geológica y de suelo influyen en la variabilidad de caudales en vertientes como lo es el de la vertiente de Agua Fría, donde se presentan caudales elevados en meses como octubre y mínimos en junio.

Los resultados revelan que el área aportante a la vertiente de Agua Fría se encuentra en el rango de 23 a 30 km², destacando la influencia de los suelos volcánicos permeables en el comportamiento geológico de la vertiente, además, se asimilan los valores de caudales máximos observados encontrando el sentido por la dimensión de la zona de recarga.

Aunque los resultados fueron favorables y se logra interpretar la conducta de las vertientes de manera más eficiente, en estudios futuros sería valioso profundizar en el tiempo de respuesta dentro del sistema de aguas subterráneas, para descifrar los caudales en septiembre y octubre cuando las precipitaciones ocurren en los meses de julio y agosto.

Finalmente, estos resultados contribuyen a una mejor comprensión del sistema de vertientes frías para mejorar la gestión de los recursos hídricos de la zona.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Arumí, J. L., Delgado, V., & Reicher, O. (2020). Sistemas de vertientes en el valle del Renegado: Importancia, Características y Vulnerabilidad.
- Arumí, J. L., Muñoz, E., & Oyarzún, R. (2019). Andean Mountain Groundwater, Drinking Water Sources, and Vulnerability: A Case Study in Central Chile. *IntechOpen EBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85016>
- Amir AghaKouchak, & Habib, E. (2010). Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes. *International Journal of Engineering Education*, 26(4), 963–973.
- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*, 1(1).
- Navarro, L. (2016). Estudio de caso: Análisis edafogeoambiental de la zona de Las Trancas Chillán. Tesis, Universidad de Concepción, Chile.
- Ulloa, R. (2022). Análisis hidrogeológico de dos sistemas de vertientes pertenecientes al valle del Renegado, Región de Ñuble, Chile. Tesis, Universidad de Concepción, Chile <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/10488>
- Parra, V., Arumí, J.L., & Muñoz, E. (2019). Identifying a Suitable Model for Low-Flow Simulation in Watersheds of South-Central Chile: A Study Based on a Sensitivity Analysis. *Water*, 11(7), 1506. <https://doi.org/10.3390/w11071506>

8. ANEXOS

Tabla A1. Valores obtenidos de índice de Nash-Sutcliffe para cada área simulada

Área (km²)	ENS	Área (km²)	ENS
15	0.4671	31	0.7165
16	0.5153	32	0.7438
17	0.5064	33	0.7370
18	0.5496	34	0.7715
19	0.5791	35	0.7645
20	0.5461	36	0.7606
21	0.6141	37	0.7894
22	0.5905	38	0.8001
23	0.6634	39	0.8050
24	0.6467	40	0.7948
25	0.6996	41	0.7799
26	0.6672	42	0.8148
27	0.7401	43	0.7936
28	0.6707	44	0.8117
29	0.7622	45	0.8215
30	0.7183		

Fuente: Elaboración propia