

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke

**MODELACIÓN DE LA INTERACCIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE LOS
RÍOS BUENO Y VALDIVIA**

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil**

ALEX EDWARD ANDRÉS QUIJADA VALENZUELA

Concepción, Junio de 2016.

INDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo General	4
1.1.2. Objetivos Específicos.....	4
1.2. Modelo Hidrogeológico	5
2. METODOLOGÍA	6
2.1. Antecedentes relevantes de las cuencas del río Valdivia y del río Bueno	7
2.1.1. Drenaje Principales de las cuencas	7
2.1.2. Geología General de la región de estudio	8
2.1.3. Estratigrafía General de las cuencas	8
2.1.4. Climatología	9
2.1.5. Áreas de recarga y descarga	9
2.1.6. Caracterización Hidrogeológica de las cuencas	10
2.1.7. Acuífero Principal cuenca del río Valdivia.....	10
2.1.8. Acuífero Principal cuenca del río Bueno.....	12
2.1.9. Sistema de acuífero.....	13
2.2. Construcción del Modelo	14
2.2.1. Definición del Dominio.....	14
2.2.2. Tipo de suelo del Dominio	16

2.2.3.	Definición de las Condiciones de Borde.....	17
2.2.4.	Conductividad Hidráulica	18
2.2.5.	Recarga en los acuíferos	20
2.3.	Balance hídrico del sistema acuifero	21
2.4.	Análisis de Sensibilidad	22
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
3.1.1.	Cuantificación estimativa de entrada al sistema	23
3.2.	Resultados de la modelación	24
3.3.	Balance de Masas	27
3.4.	Análisis de sensibilidad.....	31
4.	CONCLUSIONES.....	33
	BIBLIOGRAFÍA	35
	ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO A: CONCEPTOS GENERALES	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO B: ANTECEDENTES GENERALES DE LA REGIÓN DE RÍOS.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO C: ELECCIÓN DEL SOFTWARE	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO D: DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN LAS CUENCAS¡Error! Marcador no definido.	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO E: ZONAS DE BALANCES DE MASAS	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO F: BALANCES DE MASAS EN LIMITES DE CUENCAS.....	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO G: DIVISORIA DEL SENTIDO DE LAS AGUAS CON DISTINTAS RECARGAS¡Error! Marcador no definido.	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXO H: LECTURAS RECOMENDADAS.....	¡Error! Marcador no definido.

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Desarrollo de un modelo hidrogeológico.....	5
Figura N° 2. Acuífero principal cuenca del río Valdivia (DGA, 2012).....	11
Figura N° 3. Acuífero principal cuenca del río Bueno.....	12
Figura N°4. Discretización del modelo sobre Google Maps (2016).....	15
Figura N°5. Mapa Geológico de la región en estudio (DGA, 2012).....	16
Figura N° 6. Conductividades hidráulicas en zona de modelación.....	19
Figura N°7. Recarga por precipitación en ambos acuíferos.....	20
Figura N° 8. Esquema de funcionamiento del sistema hídrico.....	22
Figura N° 9. Nivel freático y sentido del flujo subterráneo.....	25
Figura N° 10. Sentido de las aguas subterráneas en limitación de cuencas.....	26

INDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Condiciones de borde a utilizar.....	17
Tabla N°2. Caudales medios anuales (Salazar, 2015) y Cotas de los ríos (Google Earth).....	18
Tabla N° 3. Resultado de Balance de Masas.....	27
Tabla N° 4. Balance de masas en área total del acuífero de la cuenca del río Valdivia.....	29
Tabla N° 5. Balance de masas en área total del acuífero de la cuenca del río Bueno.....	29
Tabla N° 6 Balance de masas en área total de los acuíferos de las cuencas del río Valdivia y Bueno con 5 % de recarga	32
Tabla N° 7. Balance de masas en área total de los acuíferos de las cuencas del río Valdivia y Bueno con 20% de recarga.....	32

MODELACIÓN DE LA INTERACCIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE LOS RÍOS BUENO Y VALDIVIA

Autor: Alex Edward Andrés Quijada Valenzuela

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío - Bío

Correo electrónico: alquijad@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo Electrónico: asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

Se desarrolla un modelo de simulación hidrológica para una fracción del acuífero en la divisoria de las cuencas de los ríos Valdivia y Bueno, en la depresión intermedia de la Región de los Ríos. Este modelo se ajusta a las características y condiciones del acuífero, construido en base a información real de la Dirección General de Aguas (DGA). Los resultados obtenidos permitieron observar el sentido y magnitud de los flujos de aguas en la divisoria de estas cuencas, mostrando la red de flujo de la zona modelada. Se simularon diferentes escenarios para observar el comportamiento de los flujos subterráneos con una variación en los datos de entradas para estimar un análisis de sensibilidad. Así también, los resultados conferidos por la simulación Modflow, establece que es el acuífero de la cuenca del río Valdivia es quien aporta al acuífero de la cuenca del río Bueno casi la totalidad de su interacción.

Palabras claves: Aguas subterráneas, simulación, acuíferos, cuencas.

6.140 Palabras Texto + 16 Figuras/Tablas*250 + 1 Figuras/Tablas*500= 10.640 Palabras.

MODELING THE INTERACTION BETWEEN AQUIFERS OF THE RIVERS BUENO AND VALDIVIA

Author: Alex Edward Andrés Quijada Valenzuela

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

E-mail: alquijad@alumnos.ubiobio.cl

Advisor: Álvaro Suazo Schwencke

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

E-mail: asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

A hydrological simulation model is developed for a fraction of the aquifer in the watershed of the basins of the rivers Valdivia and Bueno in the intermediate depression of the Region of the Rivers, Chile. This model is adjusted to the characteristics and conditions of the aquifer, built on the basis of real information from the General Directorate of Water (DGA, Chile). The results obtained allowed to observe the direction and magnitude of the water flows in the watershed of these basins, showing the network of flow of the area modeled. Simulated different scenarios to observe the behavior of the flows underground with a variation in the input data for estimating a sensitivity analysis. So also the results conferred by the Simulation Modflow Code, establishes that it is the aquifer of the basin of the river Valdivia is who brings to the aquifer of the basin of the river Bueno almost all of their interaction.

Key words: Groundwater, simulation, aquifers, basins.

1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país que presenta características diversas tanto en su geografía como en los recursos hídricos a lo largo y ancho del territorio nacional. En el Norte la mayor disponibilidad de agua se encuentra de manera subterránea, lo cual hace que sus estudios sean enfocados en la hidrogeología. Al sur de Chile, particularmente en la zona austral del país, la disposición de los recursos hídricos superficial es abundante, por lo cual sus estudios se centran en la hidrología de cuencas. La zona Centro Sur es una zona de transición, habiendo cuencas con avanzada explotación de aguas subterráneas y superficiales.

En el 2012 la Dirección General de Aguas encargó a la empresa Amphos 21 Consulting Chile Ltda. la realización del “Estudio de las cuencas principales de la región de Los Ríos” (DGA,2012), proyecto que estudió principalmente las cuencas del Río Valdivia y del Río Bueno, realizando labores de catastro de puntos de agua superficial y subterráneo, además de construir una base de datos con recopilación de antecedentes del ciclo hidrológico de la zona (hidrología, geomorfología, geología e hidrogeología).

Si bien las cuencas se definen en base a la divisoria de aguas superficiales, no siempre coincide con las aguas subterráneas. En particular las cuencas de los ríos Bueno y Valdivia comparten un acuífero en la depresión intermedia de la región, situación que no es mencionada ni estudiada en profundidad por DGA (2012), prescindiendo información significativa sobre la interacción de los acuíferos de manera subterránea de las cuencas estudiadas en aquella zona.

Es por ello que el presente proyecto de título propone complementar el estudio y/o validar la información omitida, analizando el nivel de interacción de los acuíferos de las cuencas de los ríos Bueno y Valdivia, modelando el sector entre el río San Pedro y el río Bueno para lo cual se requiere determinar el sentido y magnitud de las aguas subterráneas mediante la simulación Modflow.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General:

- Analizar el nivel de interacción de los acuíferos de las cuencas de los ríos Bueno y Valdivia, modelando el sector entre el río San Pedro y el río Bueno.

1.1.2. Objetivos Específicos:

- Identificar los acuíferos principales de las cuencas de los ríos Bueno y Valdivia.
- Desarrollar un modelo para la simulación del flujo de agua subterránea en el área de estudio mediante Modflow.
- Determinar el sentido y magnitud de la interacción de las aguas subterráneas entre los dos acuíferos.

1.2. Modelo Hidrogeológico

Un modelo hidrogeológico es una representación del balance hídrico. Recientemente se ha propuesto una definición moderna y amplia de lo que debe entenderse por un “Modelo hidrogeológico”. Riegger (2004) lo define como una estructura coherente que permite la transferencia de un sistema hidrogeológico natural complejo en un modelo, el cual permite a su vez una descripción cuantitativa del comportamiento hidrogeológico y de los procesos relacionados (Figura 1). Este concepto amplio de modelo hidrogeológico incluye además la calibración de sus parámetros y su evaluación, de manera que se considera listo para ser usado en la predicción de los impactos naturales e influencia humana. Esta idea no se limita sólo a la creación de un modelo conceptual, sino que considera una evaluación cuantitativa de la aproximación del modelo y de la precisión de los resultados de las predicciones.

Un modelo hidrogeológico debe considerar, principalmente, dos aspectos: las condiciones hidrogeológicas existentes y el problema que se quiere resolver, además de una descripción coherente del sistema incluyendo necesariamente una caracterización de la geometría, los parámetros hidrogeológicos, las condiciones de borde iniciales y un balance hídrico. Sobre la base de lo anterior, el arte de la modelación hidrogeológica radica en mantener el modelo tan simple como sea posible, conservando las características más relevantes del comportamiento del sistema en estudio.

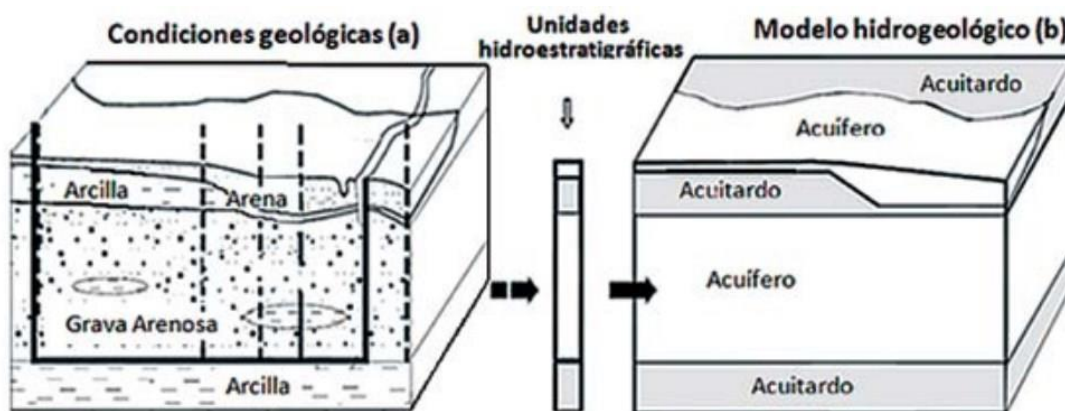


Figura 1. Desarrollo de un modelo hidrogeológico. Se aprecia (a) sistema hidrogeológico real y (b) modelo conceptual del sistema (SEA, 2012).

2. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología adoptada que permitirá alcanzar los objetivos antes mencionados, que involucra la recopilación y la evaluación de la información necesaria para completar los distintos componentes del modelo hidrogeológico conceptual que constituirán la base de un modelo numérico de acuíferos.

- ✓ Recolectar datos históricos de interés para cada zona de estudio para lo cual se recurre a los datos de diversas fuentes, entre ellas el estudio de DGA (2012) y a proyectos e informes de catastros anteriores.
- ✓ Desarrollar un modelo de las aguas subterráneas de la zona de estudio a través del software especializado Groundwater Vistas 6 con los códigos MODFLOW, de forma de poder simular con datos y características reales y actualizadas que fueron ya medidas en terreno para darle mayor validez al modelo.
- ✓ De acuerdo a lo entregado por el modelo se analizará los resultados y visualización de la simulación. Este modelo deberá ser capaz de mostrar de manera clara y concisa el flujo de las aguas subterránea en el sector de estudio.
- ✓ Por último, una vez terminada la modelación se realizará un análisis de sensibilidad con el fin de buscar resultados con una variación de los datos de entradas, dando lugar a las conclusiones y comentarios de la experiencia realizada.

2.1. Antecedentes relevantes de las cuencas del río Valdivia y del río Bueno

Los límites de la cuenca hidrográfica del río Valdivia son el río Toltén por el norte y el río Bueno por el sur. Consta de una superficie de 10.275 km² siendo los principales centros urbanos las ciudades de Valdivia, Lanco, San José de la Mariquina, Los Lagos, Panguipulli y Corral.

Por otra parte, la cuenca hidrográfica del río Bueno limita con la cuenca del río Valdivia por el norte y con el lago Llanquihue por el sur. La superficie de esta cuenca consta de 17.210 km² y abarca las provincias de Ranco, Llanquihue y Osorno.

2.1.1. Drenaje Principales de las cuencas

Una de las principales características de la geografía de la Región de los Ríos corresponde a sus cursos hidrográficos. La cuenca del río Valdivia posee alrededor de 6.900 km de ríos y esteros destacando entre ellos los ríos Valdivia, Cruces y Calle-Calle, entre otros. Además, presenta una serie de lagos y lagunas, siendo el Lago Calafquén el más extenso de la cuenca.

El río Valdivia es la unión del río Cruces que proviene del norte de la Región de Los Ríos y nace en las faldas del volcán Villarrica a partir de esteros y quebradas, y el río Calle-Calle cuyas aguas provienen principalmente de los lagos Riñihue, Panguipulli y Calafquén.

La cuenca del río Bueno posee alrededor de 10.500 km de ríos y esteros destacando entre ellos los ríos Bueno, Pilmaiquén y el Rahue, entre otros. Presenta también una serie de lagos y lagunas, siendo el Lago Ranco el más extenso de la cuenca. El río Bueno nace en el extremo poniente del lago Ranco, y tras un recorrido de 130 km en dirección general E-W, desemboca en el Océano.

2.1.2. Geología General de la región de estudio

El área de estudio presenta un conjunto de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de edades que fluctúan entre Paleozoico superior y Holoceno. Hacia el oeste, se presenta un basamento metamórfico del Paleozoico- Triásico perteneciente al Complejo Metamórfico Bahía Mansa (CMBM) o Serie Oeste que forma casi en su totalidad la Cordillera de la Costa con rocas sedimentarias Cenozoicas subordinadas. El valle central se encuentra constituido por rocas sedimentarias y volcánicas Cenozoicas, además de presentar depósitos sedimentarios glaciares, fluviales, glaciofluviales y piroclásticos cuaternarios. Hacia el este constituyendo la Cordillera de los Andes se encuentran rocas intrusivas graníticas y volcánicas Paleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas (Sernageomin, 2002).

2.1.3. Estratigrafía General de las cuencas

En términos generales, se han identificado las siguientes formaciones: depósitos no consolidados del Pleistoceno-Holoceno de origen glacial, fluvial, fluvioestuarino, litoral, eólico, entre otros; productos volcánicos del Pleistoceno-Holoceno; rocas sedimentarias marinas y continentales del Oligoceno- Plioceno; rocas intrusivas del Paleozoico, Jurásico, Cretácico y Mioceno; y rocas sedimentarias y metamórficas del Paleozoico-Triásico (DGA, 2012).

2.1.4. Climatología

La zona de estudio se caracteriza por presentar dos regímenes claramente definidos. Una zona con clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea (en el sector centro y bajo de las cuencas), que se caracteriza por presentar precipitaciones a lo largo de todo el año aunque los meses de verano presentan menor pluviosidad que los meses invernales. En otra zona el clima es templado frío lluvioso con influencia mediterránea (sector precordillerano de las cuencas), que se caracteriza por las bajas temperaturas durante todo el año y el aumento de las precipitaciones con la altura, las cuales llegan a los 3.000 mm anuales, sobre los 1.200 msnm (DGA, 2012).

2.1.5. Áreas de recarga y descarga

En base a lo definido por DGA (2012), el mecanismo principal de recarga de los acuíferos se debe a la infiltración de agua de las precipitaciones. Este mecanismo de recarga se produce de forma local en zonas anexas a los lagos Panguipulli, Calafquén y Riñihue en la cuenca del río Valdivia, como así también a las zonas próximas de los lagos Ranco, Puyehue y Rupanco en la cuenca del río Bueno.

El mecanismo de descarga principal en estas cuencas son los ríos que son de carácter efluente, vertiendo en la mayoría de los casos sus aguas al cauce. En casos puntuales en los que los materiales presentan menores conductividades hidráulicas, es posible que el nivel freático no alcance a conectar con las aguas del cauce, siendo de carácter influente y, por tanto, aportando agua al acuífero.

La descarga de agua de los acuíferos a través de pozos y norias es secundaria debido al elevado volumen de las aguas que discurren de forma superficial, pero está aumentando en los últimos años, motivo por el cual se justifica la gestión del recurso. El aprovechamiento principal de aguas subterráneas se centra en torno a los centros urbanos (APR y AP), industrias, ganadería y cultivos.

2.1.6. Caracterización Hidrogeológica de las cuencas

En los sectores altos de la cuenca del río Valdivia y del río Bueno destaca la existencia de formaciones rocosas de origen sedimentario volcánico de baja permeabilidad que forman el basamento de estos sectores de las cuencas. Por lo tanto, las infiltraciones de aguas meteóricas en la cuenca del río Valdivia escurren por el subsuelo principalmente hasta los cuerpos lacustres de Panguipulli, Calafquén, Riñihue, Peilaifa, Pirihueico y Neltume, y por los lagos Ranco, Maihue, Puyehue, Rupanco y Llanquihue en el caso de la cuenca del río Bueno. Las aguas de estos lagos se infiltran a través del material morrénico originando una fuente constante de abastecimiento del acuífero (DGA, 2012).

En el valle central de la cuenca del río Valdivia escurren dos acuíferos (Fig. 2): uno en dirección SWW paralelo al río Cruces, y el otro lo hace en dirección oeste paralelo al río Calle-Calle, juntándose ambos en las proximidades de la ciudad de Valdivia.

En el sector del valle central de la cuenca de río Bueno escurren también dos acuíferos (Fig. 3): uno en dirección WNW paralelo a los ríos Pilmaiquen y Rahue, y el otro lo hace en dirección SSW paralelo al batolito costero hasta juntarse ambos con el acuífero de la cuenca del río Maullín por el sur.

El medio por el cual escurre estos acuíferos es material de relleno o depósitos no consolidados de origen glacial, consistente en morrenas y materiales aluviales de alta permeabilidad.

2.1.7. Acuífero Principal cuenca del río Valdivia

Como se mencionó anteriormente, en el valle central de la cuenca escurren dos acuíferos, cada uno constituido por unidades hidrológicas de sistemas de acuíferos que son complejos, tanto horizontalmente como en profundidad.

Con los sistemas de acuíferos definidos en el estudio de las cuencas de DGA (2012), se realizó una interpretación hidrogeológica de acuerdo con los antecedentes de geología, hidrogeología y geofísica en el sector de la cuenca del río Valdivia dándose a conocer que tiene una cierta similitud estratigráfica, que se refleja en una serie de sistemas acuíferos, libres en el sector E y confinado en el sector W, de espesor más o menos constante e intercalados por estratos de baja permeabilidad.

El sector norte del acuífero forma un gran acuífero libre de elevada transmisividad que, en su recorrido hacia la zona sur se combina con otros materiales, pasando a formar un sistema acuífero, también libre pero con menores capacidades acuíferas definidas como (A2/A1) que es a priori la zona de modelación. Es hacia el sector de Los Lagos cuando se produce el semiconfinamiento del sistema acuífero (DGA, 2012).

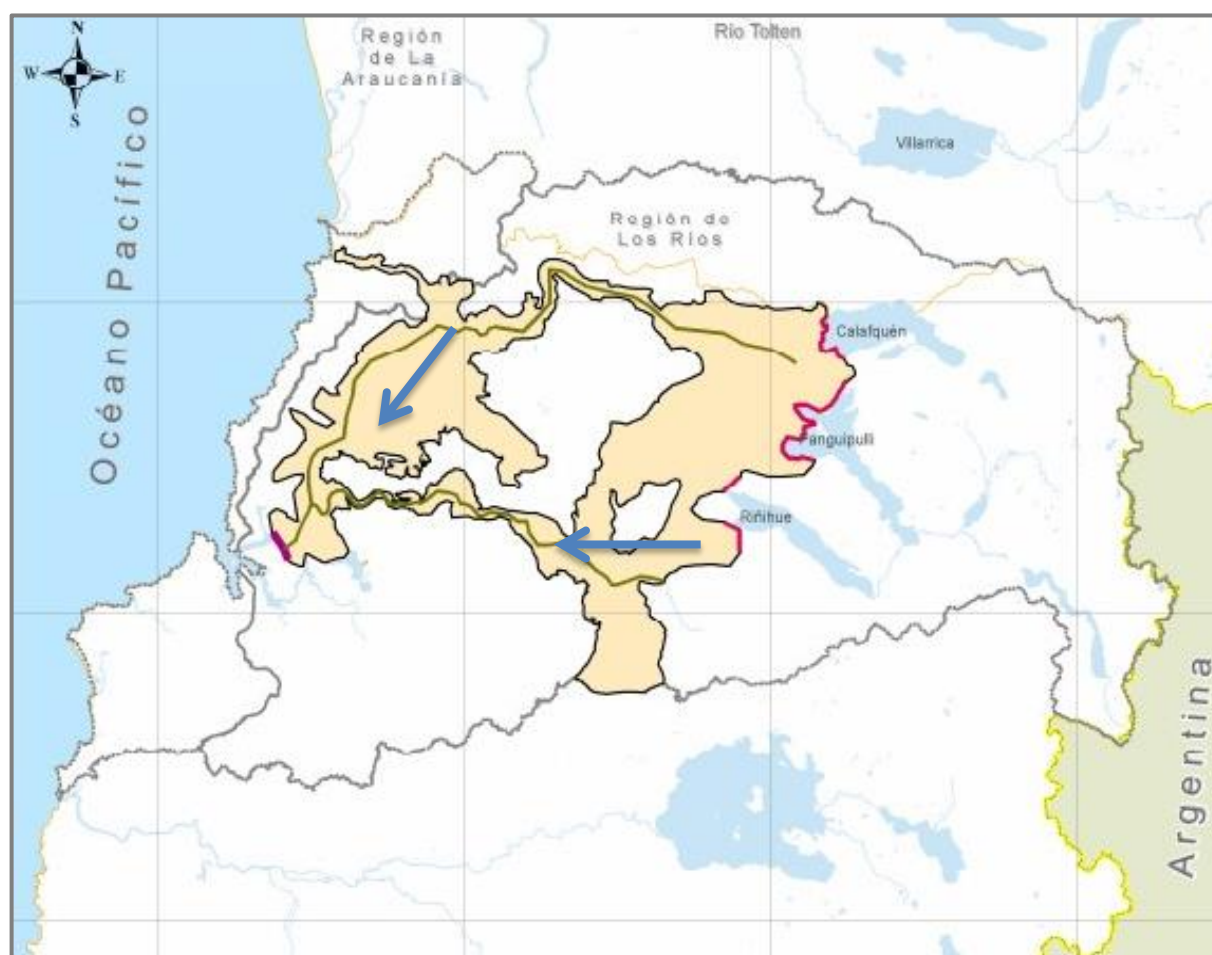


Figura 2. Acuífero principal cuenca del río Valdivia (DGA, 2012)

2.1.8. Acuífero Principal cuenca del río Bueno

De acuerdo con los antecedentes de estudio de DGA (2012), en el sector de la cuenca del río Bueno que coincide con la depresión intermedia tiene una cierta uniformidad estratigráfica, que se refleja en una serie de sistema de acuíferos libres y confinados, con una extensión horizontal máxima de 80 km (entre Osorno y San Pablo) medido perpendicularmente al borde costero. Los sectores confinados aparecen ocupando alrededor de un 50% del acuífero, dispuestas en su mayoría en los bordes E y W del acuífero, quedando libre el sector central y la unión del río Rahue con el río Bueno.

La unidad hidrogeológica que más se acerca a la zona de modelación de las aguas subterráneas corresponde al tipo de acuífero (A2/A1) que se encuentra en el sector N.E del acuífero principal.



Figura 3. Acuífero principal cuenca del río Bueno (DGA, 2012).

2.1.9. Sistema de acuífero

Se ha identificado que en la zona de estudio ambas cuencas tienen un sistema de acuíferos libres denominado (A2/A1). Corresponde a los depósitos de gravas y arenas de glaciofluviales de la Glaciación Llanquihue (Plgf1) y Santa María (Plgf2), que en su conjunto constituyen un acuífero libre (DGA, 2012).

Se extiende en el área del río Valdivia, asociado a los valles de los ríos Cruces, Leufucade y al Este de Pishuinco, en el río Calle- Calle, Quinchilca y San Pedro. En general, en esta zona posee un nivel freático variable entre 0 y 5 m y un espesor de la zona saturada entre 3 y 15 m, el que aumenta hacia el Este.

En la cuenca del río Bueno se presenta en los márgenes de valles profundos de los ríos principales, como el Pilmaiquén, Negro, Rahue y Blanco y en el sector localizado al noreste de Río Bueno hasta el Lago Ranco, los cuales en su conjunto constituyen un acuífero libre con conexión a la red fluvial local. En general, en el sector localizado al noreste de río Bueno, el nivel freático y la profundidad del agua, se encuentra, entre 10 y 20 m y el espesor saturado en agua supera los 20 m.

Este sistema a nivel regional posee transmisividades bajas a muy altas (50 a 3000 m²/d), permeabilidades bajas a altas (10^{-5} a 10^{-3} m/s), caudales de explotación variables entre 1 y 80 l/s y específicos entre 0,11 y 8,75 l/s/m (DGA, 2012).

2.2. Construcción del Modelo

Groundwater Vistas es un software que presenta una plataforma visual de trabajo con los códigos del programa MODFLOW (three-dimensional (3D) finite-difference groundwater model). Modflow, es un modelador de flujo por diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, el cual consiste de un código fuente que resuelve mediante interacciones la ecuación de flujo del agua subterránea. Se usa en hidrogeología para simular el flujo subterráneo de cualquier acuífero. Es uno de los modelos de aguas subterráneas más ampliamente usado en todo el mundo (Wikipedia, 2015).

2.2.1. Definición del Dominio

Para definir el dominio, la primera restricción que se implanta al momento de definir los límites físicos del modelo, es que éstos deben permitir que las condiciones de borde sean representativas en el dominio.

Como en este caso el sector a modelar se encuentra en la depresión intermedia de la Región de los Ríos, entre el río San Pedro y el río Bueno, las condiciones de borde a considerar son: Los Lagos Riñihue y Ranco, las formaciones montañosas de la Cordilleras de los Andes (al norte de Futrono) y de la Costa (entre Los Lagos y Paillaco) y los ríos antes mencionados como límite superior e inferior, además del río Quinchilca y una fracción del río Calle-Calle. Teniendo en cuenta lo anterior, se establecen los límites de modelación tal como es presentado en la Fig. 4.

Modflow discretiza el área en planta del modelo simulado, según un arreglo de celdas rectangulares definidas por cierto número de filas y columnas que se extienden entre los límites dados de acuerdo al área de interés.

Una vez definidos los límites del modelo se adopta una discretización espacial estableciendo en este caso que cada elemento mide 800 metros por 800 metros. Dichas dimensiones permiten trabajar con una unidad de área igual a 640.000 m^2 , generando 50 columnas y 75 filas, por lo que el modelo posee un total de 3.750 celdas y un área total de 2400 km^2 (Figura 4).

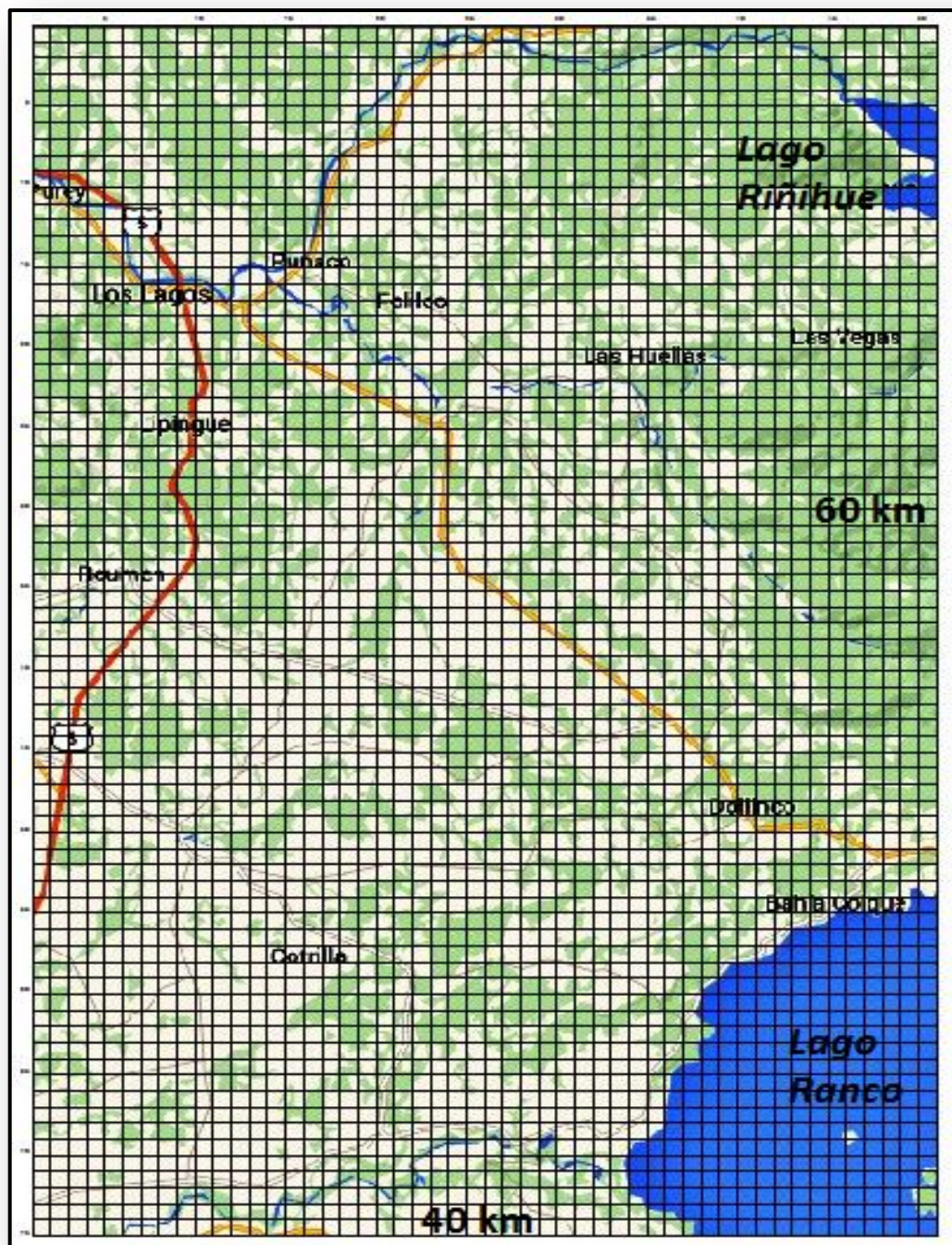


Figura 4. Discretización del modelo sobre Google Maps (2016).

2.2.2. Tipo de suelo del Dominio

Como se mencionó anteriormente en el estudio de la geología general de las cuencas de la región, ambas presentan un conjunto de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de edades que fluctúan entre Paleozoico superior y Holoceno. Se puede observar en la Figura 5 que predominan cuatro formaciones rocosas en la región de los Ríos, siendo tres de estas las que se utiliza en el desarrollo del modelo.

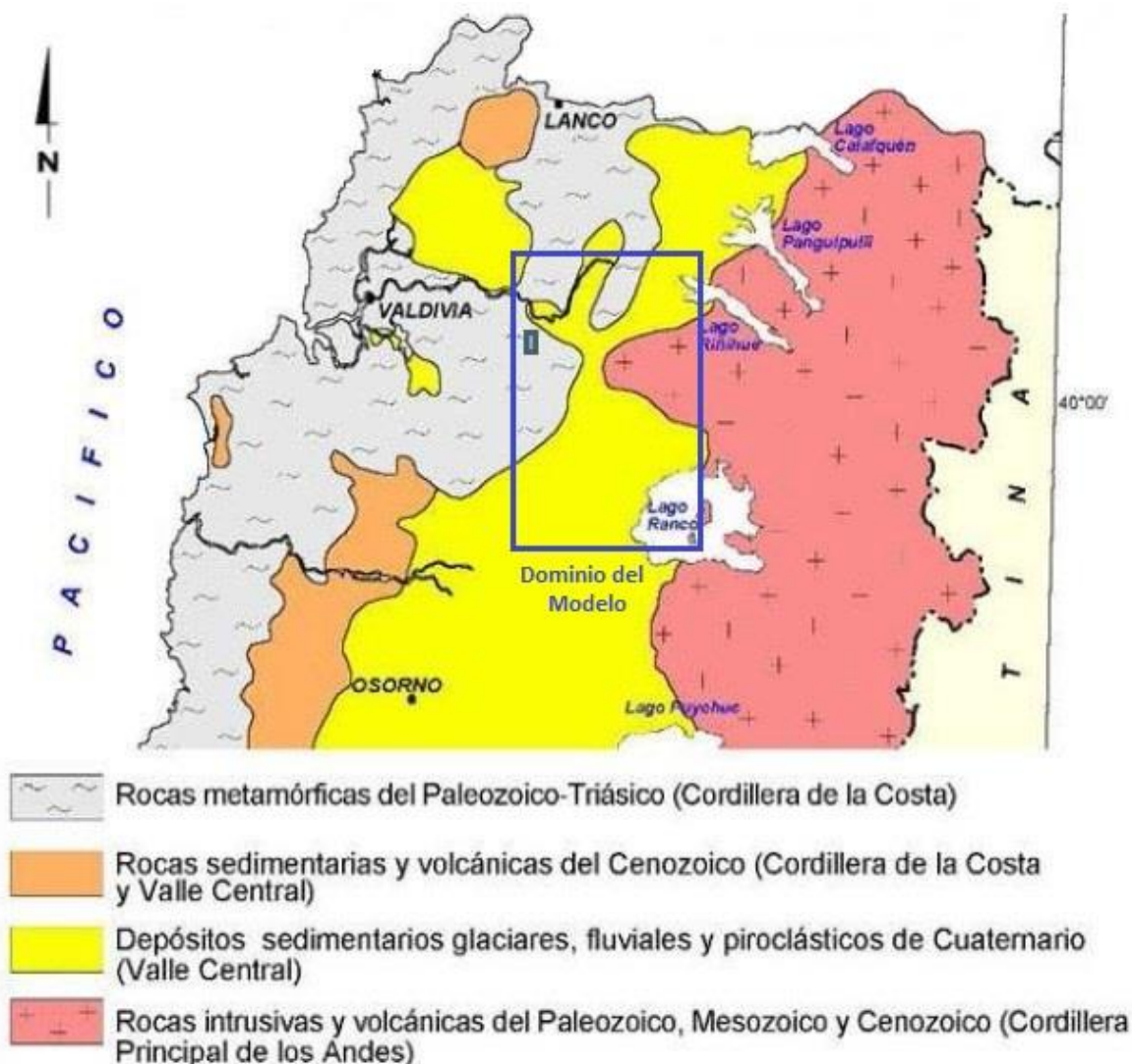


Figura 5. Mapa Geológico de la región en estudio (DGA, 2012)

2.2.3. Definición de las Condiciones de Borde

Las condiciones que rigen el flujo subterráneo en la zona de estudio también deben ser introducidas al modelo, lo que se hace definiendo condiciones de borde en MODFLOW. En el presente estudio se tiene las condiciones de flujo principales que pertenecen al dominio. En la Tabla N° 1 presenta cada una de ellas acompañadas por una breve descripción y además se indica la condición con la que se representará en GW Vistas.

Tabla N°1. Condiciones de borde a utilizar

<i>Condición Real</i>	<i>Descripción</i>	<i>Condición Modelo</i>
Río San Pedro	Río que se encuentran en el límite superior de la zona a modelar de la cuenca del río Valdivia	Constant Head
Río Bueno	Principal cauce perteneciente a la cuenca del mismo nombre en el límite inferior del modelo.	Constant Head
Río Quinchilca, Río Calle - Calle	Este curso de agua se encuentra en la zona media del dominio, siendo aporte al acuífero.	Constant Head
Lago Riñihue y Lago Ranco	Estos cuerpos de agua ubicados al oeste de la región son principales aportes de agua al acuífero.	Constant Head
Cordillera de los Andes y de la Costa	Corresponden a las zonas impermeables del modelo, donde no hay flujo de agua subterránea.	No - Flow

El nivel de cota de los lagos Riñihue y Ranco es de 108 y 70 msnm, respectivamente.

En la simulación de los ríos San Pedro, Bueno y Quinchilca (Constant Head) el nivel de la celda no varía aunque el acuífero saque de él o aporte grandes cantidades de agua, ya que se comportan como una fuente infinita de agua. En la tabla N° 2 se presentan las cotas constantes en los ríos antes mencionados.

Tabla N°2. Caudales medios anuales (Salazar, 2015)
y Cotas de los ríos (Google Earth, 2016)

Río	Caudal Medio (m³/s)	Cota inicial (msnm)	Cota final (msnm)
San Pedro	362,51	108	33
Bueno	354,57	70	45
Quinchilca	112,57	125	33
Calle - Calle	475,08	33	20

2.2.4. Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica a considerar se obtuvieron de las labores de catastros en terreno que se realizó al momento de la elaboración del informe del estudio de las cuencas de la Región de los Ríos por DGA (2012) desde los dos acuíferos principales de cada cuenca en estudio.

Los resultados de los estudios se resumen en cuatro valores para la conductividad hidráulica, cada uno correspondiente a una sección de la zona de simulación y que es expuesta en la Figura 6, cuyas propiedades físicas hacen que no dependan de la dirección de los ejes, trabajándolo como un medio isotrópico.

Las celdas de color negro (Figura 6) marcadas como inactivas, corresponden a las rocas (metamórficas, intrusivas y volcánicas), en particular recaen en las formaciones montañosas de la Cordilleras de los Andes y de la Cordillera de la Costa en los bordes izquierdo y derechos del modelo, como también en la parte superior donde no se presenta flujo de agua subterránea (zonas impermeables) y corresponde a 1.016 km² de la zona de modelación.

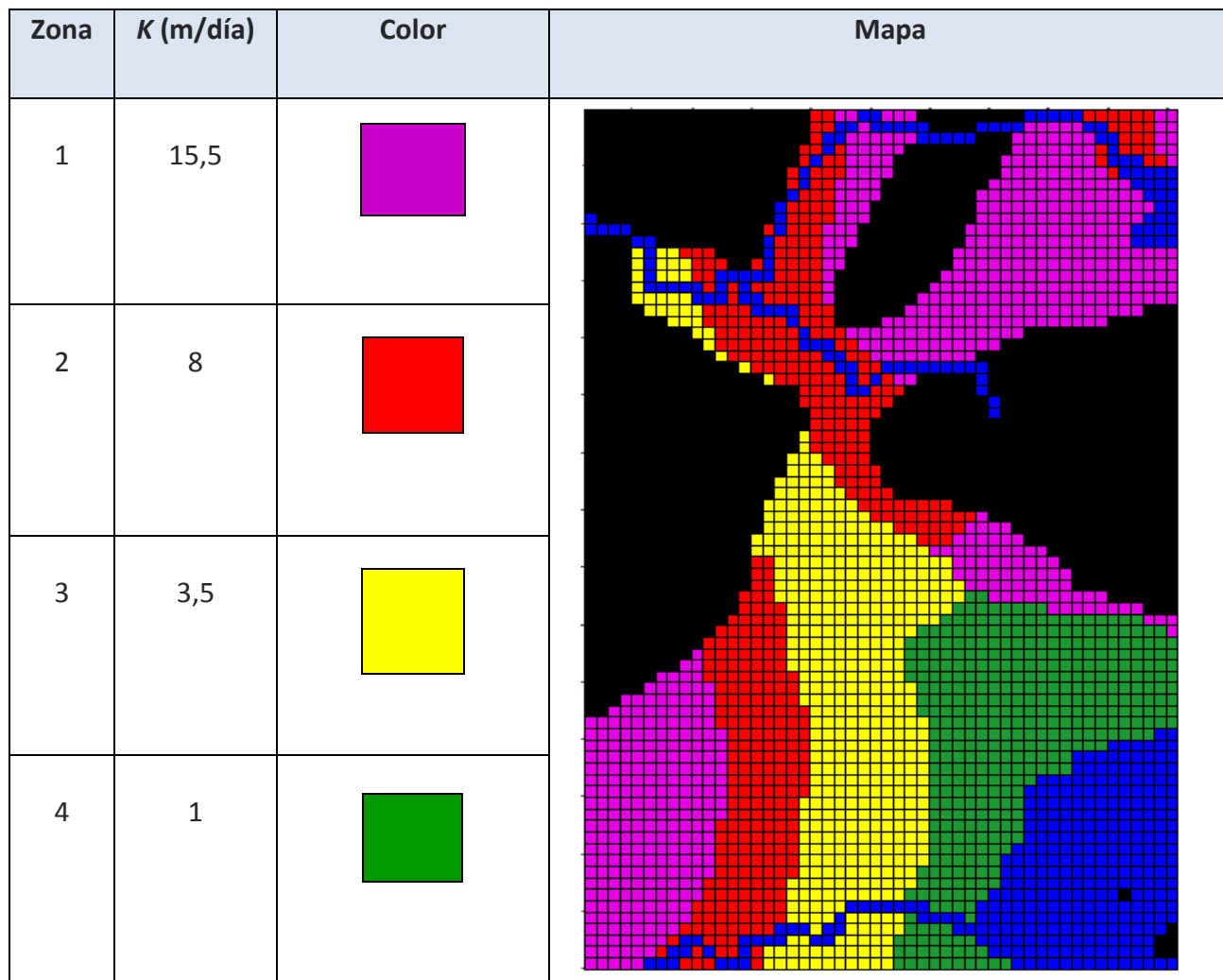


Figura 6. Conductividades hidráulicas en zona de modelación (DGA, 2012)
(En negro zona sin flujo)

2.2.5. Recarga en los acuíferos

En este punto es importante señalar que la recarga estimada es un 10% de la precipitación en los acuíferos principales, siendo en el acuífero de la cuenca del río Valdivia $16,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $40,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en el caso de la cuenca del río Bueno (DGA 2012). Este valor referencial estimado corresponde al área total de recarga de los acuíferos principales y se encuentra respaldado por el hecho que la napa se encuentra relativamente superficial en gran parte de la zona de estudio, impidiendo una percolación de mayor magnitud.

Para la recarga de acuíferos en la zona se supuso que la magnitud de la recarga es uniforme en toda el área de cada acuífero, es decir, el valor de la recarga correspondiente a cada fracción de acuífero fue dividida por su área, trabajando con una unidad de medida de $\text{m}/\text{día}$ (Figura 7).


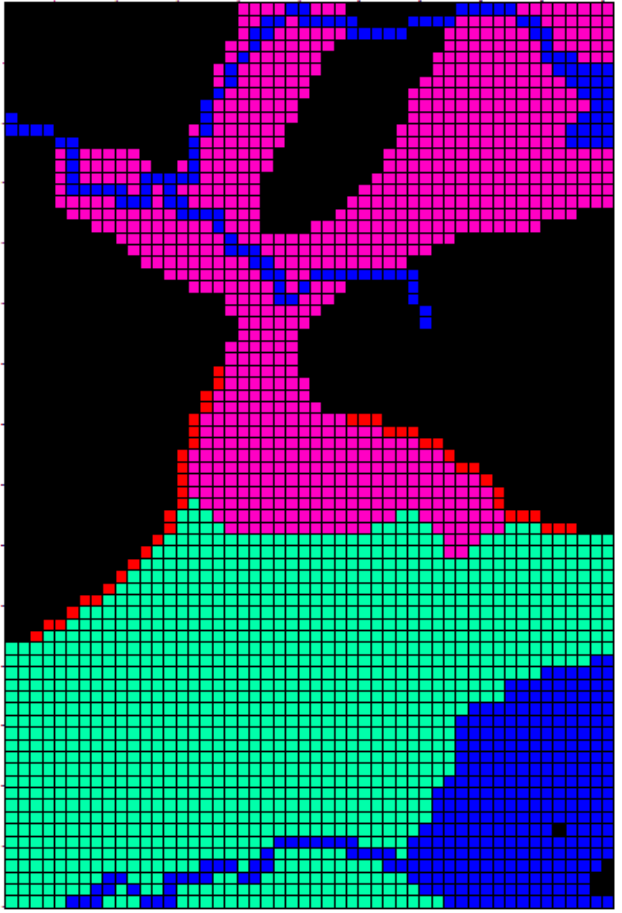
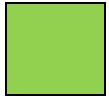
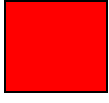
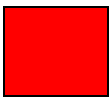
Zona	Recarga	Color	Descripción	Mapa
1	$0,357 \times 10^{-3}$ ($\text{m}/\text{día}$)		Acuífero del Río Valdivia	
2	$0,512 \times 10^{-3}$ ($\text{m}/\text{día}$)		Acuífero del Río Bueno	
Pozos de Inyección	1055 ($\text{m}^3/\text{día}/\text{celda}$)		Recarga desde C. Costa	
	2.455 ($\text{m}^3/\text{día}/\text{celda}$)		Recarga desde C. Andes	

Figura 7. Recarga por precipitación en ambos acuíferos.

2.3. Balance hídrico del sistema acuífero

Con el fin de establecer una representación de un balance hídrico en el acuífero en la zona de modelación, se ha esquematizado en términos generales la recarga y descarga de los sistemas de acuíferos. Los parámetros de la recarga en particular, se han obtenido a partir de los antecedentes existentes, y de la información en terreno realizadas por la DGA (2012).

Cabe mencionar que no se ha considerado almacenamiento en el acuífero puesto que se ha trabajado en régimen permanente, es decir, las características de la simulación no varían en el tiempo, por lo tanto en la ecuación de la continuidad los valores de entradas y salidas del sistema serán similares.

Los términos del balance que se han tenido en cuenta son los que se detallan a continuación y que se muestran en la Figura 8.

Entradas al sistema:

- Infiltración por precipitaciones y por escorrentía en cordilleras.
- Infiltración de los ríos y lagos.

Salidas del sistema:

- Drenaje de los ríos.
- Flujo Subterráneo fuera del dominio.

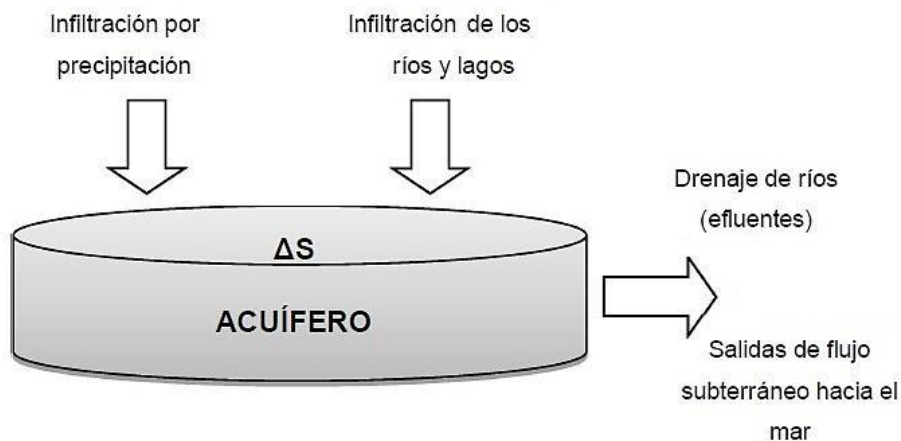


Figura 8. Esquema de funcionamiento del sistema hídrico.

2.4. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad de un modelo se realiza después que este refleje los resultados esperados acorde a la realidad. Esta etapa consiste en estimar la sensibilidad de los resultados de la simulación cambiando un parámetro en particular, la recarga en los acuíferos. Las variables afectadas en esta etapa son: La recarga por precipitación y la recarga por caudal superficial desde los cerros.

Dado que no existen antecedentes teóricos que permitan determinar con certeza un valor para el coeficiente de infiltración en esta área de estudio, se estima que este coeficiente debiese variar entre un 7 y un 15% para distintos puntos de las cuencas. La DGA y este proyecto trabajaron con el valor del 10%. Principalmente se plantearan dos escenarios a este análisis: infiltración por precipitación e infiltración por escorrentía superficial, ambos con un 5 y un 20%.

Las variables que se analizarán son principalmente el nivel interacción de las aguas subterráneas entre los dos acuíferos en la zona de limitación de cuencas, la relación de magnitud y sentido de estos con respecto a la simulación original, y el área de aporte entre acuíferos.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se darán a conocer los resultados y análisis obtenidos de la simulación. Se apreciará el comportamiento de las aguas subterráneas de una porción de los dos acuíferos principales de la Región de los Ríos con las condiciones y propiedades que se detallaron en el capítulo anterior.

3.1.1. Cuantificación estimativa de entrada al sistema

- Infiltración por precipitación: Calculada a partir de un porcentaje (10%) de las precipitaciones.

El área de recarga estimada para la fracción de los acuíferos principales de ambas cuencas son las siguientes:

- Área de Acuífero Superior es de 597,76 km² y corresponde a una recarga de 2,47 m³/s.
- Área de Acuífero Inferior es de 785,92 km² y corresponde a una recarga de 4,66 m³/s.

Por lo tanto la infiltración debido a las precipitaciones en la zona de modelación es de 7,13 m³/s.

- Infiltración por caudal superficial: Calculada a partir de un porcentaje (10%) de la esorrentía de los cerros.

- Codillera de la Costa: Precipitación media anual: 1550 mm/año (Fig. D.1 del Anexo); Área estimada de esorrentía: 62,08 km² -> Recarga: 26.384 m³/día.
- Cordillera de los Andes: Precipitación media anual: 3500 mm/año (Fig. D.2 del Anexo); Área estimada de esorrentía: 51,2 km² -> Recarga: 49.101 m³/día.

Por lo tanto la recarga total por infiltración de caudal superficial: 75.485 m³/día.

3.2. Resultados de la modelación

Al ejecutar la modelación desarrollada, se muestran en la Figura 9 las curvas de nivel estático de la simulación, que son curvas que unen los puntos de igual cota formando un mapa equipotencial. Además se muestra las flechas por celda que indican la dirección del escurrimiento en la capa. El conjunto de curvas y líneas de flujo son llamadas “Red de Flujo”.

En la Figura 9, se aprecia un claro aporte de agua desde el lago Riñihue hacia sus periferias para luego escurrir con dirección al Norte, fluyendo sin mayor dificultad y siendo aporte al río San Pedro, sabiendo también que en aquel sector la conductividad hidráulica es mayor que en otras zonas del modelo.

En la región N.O, el flujo de agua subterránea proveniente de los ríos San Pedro y Quinchilca se dirigen en sentido hacia el río Calle-Calle, que es el punto de convergencia de estos dos ríos, para luego continuar su dirección hacia la costa. El sentido de escurrimiento hacia el Oeste es básicamente debido aun mayor gradiente hidráulico por los cambios en la profundidad de los niveles piezométricos, representadas en la continuación inmediata de las curvas de nivel en aquella zona.

En la zona centro sur (Figura 9), donde se encuentra el lago Ranco, se puede observar que el flujo de agua que lo rodea va en sentido hacia el interior del lago, debido a que en aquella zona la magnitud de la conductividad hidráulica es muy pequeña dificultando en gran medida el aporte hacia la zona central del acuífero principal de la cuenca. Los aportes hacia el Lago Ranco corresponden a las recargas por precipitación en su periferia además de una incorporación mínima de recarga por infiltración de esorrentía desde la Cordillera de los Andes.

También se puede apreciar en la misma figura que el flujo de agua subterránea desde la zona intermedia al límite inferior del modelo tiene un sentido diagonal desde el N-E a S-W, debido principalmente a que el borde inferior izquierdo del límite de modelación ya no hay presencia de zona impermeable que dificulte el libre desplazamiento de estas aguas. Además que en aquella zona se encuentra el río Bueno, que es el principal cauce de la cuenca del mismo nombre donde parte de los flujos de aguas subterráneas se dirigen, y que en su recorrido total viene a desembocar al Océano Pacífico.

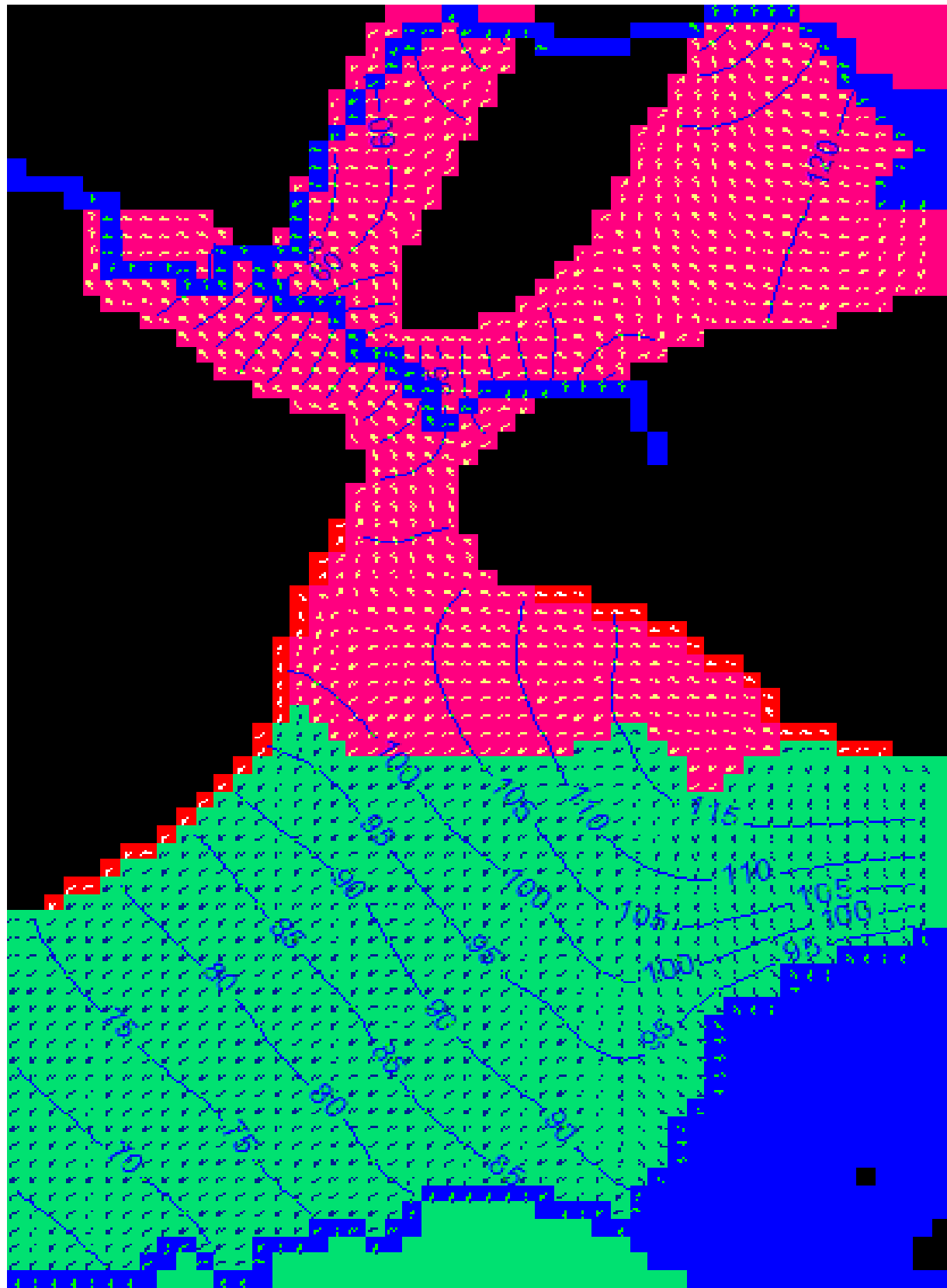


Figura 9. Nivel freático y sentido del flujo subterráneo.

En la zona de limitación de las cuencas del río Valdivia y Bueno (Figura 10), se puede apreciar que en el costado derecho del modelo cada cuenca es aporte a su propio acuífero, básicamente por la distribución de recarga de las precipitaciones en dos grandes zonas. El aporte de la cuenca del río Valdivia a su propio acuífero es de forma lateral rodeando la zona impermeable que corresponde a la Cordillera de los Andes, debido principalmente a la recarga desde los cerros. Este flujo asciende hasta alcanzar el río Quinchilca que luego se incorpora junto a los demás flujos hasta formar el río Calle-Calle, para en seguida continuar con la trayectoria hacia el Oeste. De igual manera lo realiza el acuífero de la cuenca del río Bueno, pero sus flujos de agua se dirigen al sur, hacia el Lago Ranco.

El traspaso de volumen de agua en la zona de intervención de ambos acuíferos se da desde el acuífero de la cuenca del río Valdivia al acuífero de la cuenca del río Bueno. Se observa bien en la zona media el cambio de sentido del flujo del acuífero superior de una forma semicircular recargada a la izquierda. Es ya en ese costado que a medida que se va acercando a la zona impermeable de la Cordillera de la Costa la dirección del flujo va cambiando en forma diagonal hacia el S.W buscando una salida libre sin restricciones para continuar su avance y unirse con el río Bueno.

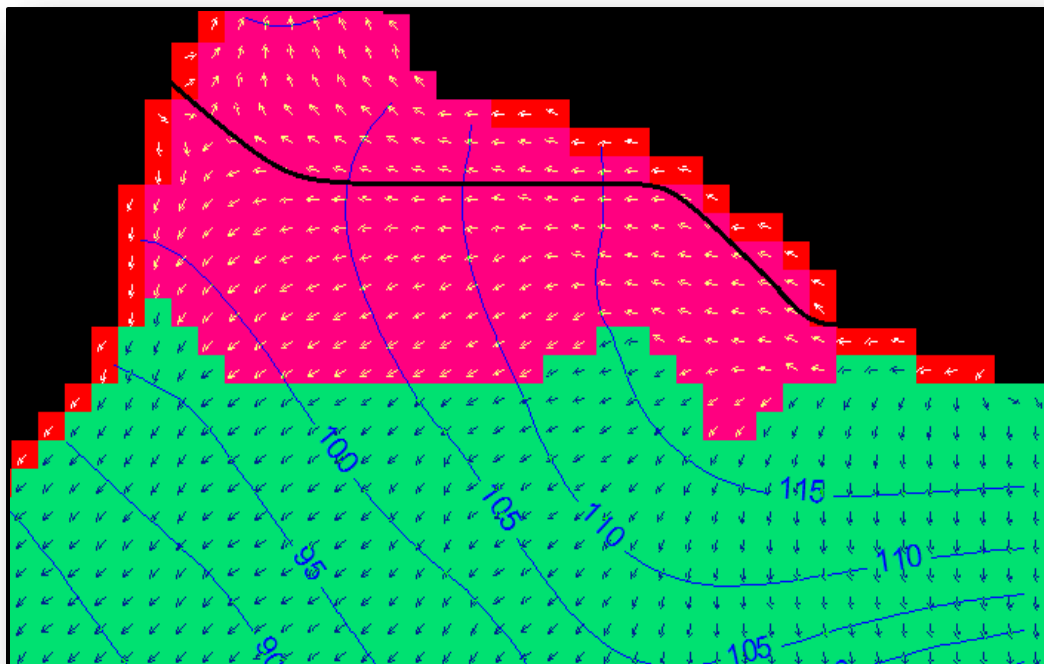


Figura N° 10. Sentido de las aguas subterráneas en limitación de cuencas

De modo de contrastar los resultados obtenidos se ha realizado asimilaciones con el informe realizado por la DGA. La simulación de este proyecto de título arrojó tener similitudes en los resultados, principalmente en las direcciones de escurrimiento y en las curvas de los niveles piezométricos en las zonas alejadas al área de estudio, tanto al norte como al sur de la delimitación de las cuencas. Es en la zona intermedia donde presentan un tanto de diferencia, esto debido básicamente a que al modelo de simulación se le las ingreso recargas por escorrentía superficial proveniente desde los cerros, situación que no es analizada por la DGA y principal motivo de las diferencias en aquella zona.

3.3. Balance de Masas

Se ha realizado un balance de masa local en el límite de los dos acuíferos estudiados que es la zona de interés de modo de cuantificar el traspaso de agua desde un acuífero a otro, de acuerdo a las características del sistema y a la geomorfología comprendida.

Se estableció dentro de este dominio de balance de masas una fila de celdas en forma de una recta horizontal involucrando una porción de área de cada acuífero en la zona de delimitación de las cuencas, de forma que los resultados que entregue el balance indique la cantidad de aporte en dicha franja (Figura E.1 del anexo), en este caso solo en sentido N-S, arrojando los resultados mostrados en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. Resultado de Balance de Masas

Fuente: GW Vistas

	<i>INFLOW (m³/día)</i>	<i>OUTFLOW (m³/día)</i>
Sur	5.187	- 67.219
Norte	58.086	- 12.251
Rec. Desde Cerros	8.420	0
Rec. Superficial	7.777	0
TOTAL	79.470	- 79.470

El mayor valor de flujo de entrada al sistema de cálculo es por el Norte con un valor de 58.086 m³/día, y el mayor valor de salida es en dirección Sur con un valor de 67.219 m³/día, con una recarga de escorrentía de 8.420 m³/día y 7.777 m³/día de infiltración por precipitación. Teniendo en cuenta esta primera aproximación de los valores de intercambio de flujo subterráneo en la zona de medición, se deduce que el aporte de un acuífero a otro se encontraría en el orden de los 58.000 m³/día y 67.000 m³/día. Esta diferencia se produce básicamente porque al flujo que entra al sistema se le incorpora las recargas, y al salir de la franja de balance el valor del escurrimiento aumenta.

El aporte que entrega el acuífero de la cuenca del río Valdivia al Bueno es por poco diez veces mayor que el volumen que aporta el acuífero del río Bueno al Valdivia con 5.187 m³/día, debido a que gran parte del volumen aportado por la cuenca del río Valdivia a su propio acuífero en la zona de delimitación se dirige de forma casi inmediata al acuífero de la cuenca del río Bueno. La otra porción de flujo continúa su trayectoria hacia el norte por la zona lateral izquierda de la región de estudio.

De forma de precisar el valor de intercambio de agua subterránea entre estas dos cuencas, se ha realizado un balance de masas en la totalidad del área de cada acuífero mostrado en las Figuras E.2 del anexo, arrojando los resultados en las tablas 4 y 5. De ambas tablas se puede interpretar que la fracción del acuífero de la cuenca del río Valdivia manipula considerablemente mayor volumen de flujo que el acuífero de la cuenca del río Bueno. Esto por tener valores superiores de aporte por alturas constantes y recarga de escorrentía desde las cordilleras con 1.035.099 m³/día vs 460.509 m³/día, una relación de diferencia aprox. de 2:1, es que la misma proporción de recarga por precipitaciones de estos dos acuíferos.

Tabla N° 4. Balance de masas en área total del acuífero de la cuenca del río Valdivia. Fuente: GW Vistas

	<i>INFLOW (m³/día)</i>	<i>OUTFLOW (m³/día)</i>
Oeste	0	- 12.431
Este	15.064	0
Sur	116	- 62.619
Norte	0	0
Recarga Cerros	50.886	0
Ríos, Lagos	784.647	- 960.049
Recarga Superficial	184.386	0
TOTAL	1.035.099	- 1.035.099

Tabla N° 5. Balance de masas en área total del acuífero de la cuenca del río Bueno. Fuente: GW Vistas

	<i>INFLOW (m³/día)</i>	<i>OUTFLOW (m³/día)</i>
Oeste	0	- 234.520
Este	12.431	0
Sur	0	0
Norte	62.619	- 116
Recarga Cerros	24.592	0
Ríos, Lagos	7.071	- 225.873
Recarga Superficial	353.796	0
TOTAL	460.509	-460.509

El intercambio de agua subterránea entre estos dos acuíferos son los siguientes: Desde el acuífero de la cuenca del río Valdivia al acuífero de la cuenca Bueno es de $62.619 \text{ m}^3/\text{día}$ en dirección N-S. Desde el acuífero de la cuenca del río Bueno al acuífero de la cuenca Valdivia es de $116 \text{ m}^3/\text{día}$ en dirección S-N. Por lo tanto, el nivel de interacción total entre estos dos acuíferos en la zona de delimitación de cuencas es de $62.735 \text{ m}^3/\text{día}$, valor dentro del rango estimado anteriormente.

De manera de tener una proporción de los flujos de agua en la simulación, se calculó el porcentaje de intercambio entre los acuíferos con respecto a la recarga total infiltrada en el área estudiada, y la relación con los caudales superficiales medios de los ríos Calle-Calle (Estación: Balsa San Javier) y río Bueno (Estación: Balsa Río Bueno) dadas en las siguientes expresiones.

$$\% \frac{\text{Intercambio}}{\text{recarga sobre acuíferos}} = \frac{62.735 \text{ m}^3/\text{día}}{691.517 \text{ m}^3/\text{día}} \times 100 = 9,1 \%$$

$$\% \frac{\text{Intercambio}}{\text{Caudal río Calle - Calle}} = \frac{62.735 \text{ m}^3/\text{día}}{41.046.912 \text{ m}^3/\text{día}} \times 100 = 0,13 \%$$

$$\% \frac{\text{Intercambio}}{\text{Caudal río Bueno}} = \frac{62.735 \text{ m}^3/\text{día}}{30.634.848 \text{ m}^3/\text{día}} \times 100 = 0,2 \%$$

El valor del intercambio de agua subterránea entre los acuíferos estudiados no alcanza a llegar a la décima parte en relación a la recarga de los acuíferos. Con respecto a los caudales superficiales de los ríos antes mencionados la diferencia de flujos es demasiada amplia, siendo el intercambio entre acuífero aproximadamente una milésima parte de los caudales de estos cuerpos de agua.

3.4. Análisis de sensibilidad

Se plantearon dos escenarios adicionales al original para establecer un análisis de sensibilidad a la recarga, con 5 y 20 % de infiltración por precipitaciones y caudal superficial representadas en las Tablas N° 6 y N° 7. En ambos casos se mantienen constantes las zonas de recargas de ambos acuíferos y las áreas de precipitación en cordilleras para el cálculo de escorrentía superficial.

Conforme a las diferencias porcentuales en la recarga, la dirección del escurrimiento en ambas situaciones conserva en el sentido inicial de N.E al S.O. También se mantiene el traspaso mayoritario de agua en el sector de delimitación de cuencas desde el acuífero de la cuenca del río Valdivia al acuífero de la cuenca del río Bueno. La disminución de la recarga induce que la línea divisoria de los flujos en la zona intermedia se traslade un tanto hacia la parte superior del modelo abarcando un área mayor de la cuenca del río Valdivia, no tanto así con el aumento de la recarga. En esta ocasión la divisoria de flujos es aproximadamente idéntica a la original tal como se muestra en las Figuras E.5 y E.6 del Anexo.

En lo que respecta al volumen de control de ambos acuíferos se observa una gran diferencia con la infiltración original trabajada, donde el acuífero de la cuenca del río Valdivia disminuye 6,2% y un 36% lo hace el acuífero de la cuenca del río Bueno, con un área de aporte de 87,7 km² de la cuenca del río Valdivia. En el otro caso, con el aumento de la recarga estos porcentajes aumentan a un 15,4% en el acuífero de la cuenca del río Valdivia y un 89% en el acuífero de la cuenca del río Bueno, esta vez con un área de aporte de 140,8 km² de la misma cuenca antes mencionada. Existe una gran diferencia entre estos dos acuíferos, principalmente debido a que el acuífero de la cuenca del río Bueno tiene un área de estudio y espesor saturado mayor, además del casi el doble de recarga que el acuífero de la cuenca del río Valdivia.

Con la disminución de recarga la interacción de estos dos acuíferos en la zona de delimitación es 22,5% menor a la original con 48,615 m³/día, 48.485 m³/día de traspaso de agua desde N a S y 116 m³/día de S a N. En la situación de aumento de recarga la interacción total es de 91.368 m³/día, 45,6% mayor al inicial, con intercambio de 91.050 m³/día de N-S y 318 m³/día de S-N.

Tabla N° 6. Balance de masas en área total de los acuíferos de las cuencas del río Valdivia y Bueno con 5% de recarga.

Fuente: GW Vistas

	Acuífero total río Valdivia		Acuífero total río Bueno	
Inf. PP	0,0001785 (m ³ /día)		0,000256 (m ³ /día)	
Inf. Q _{sup}	C. Costa: 5.803 (m ³ /día)		C. Costa: 7.385 (m ³ /día)	
	C. Andes: 19.640 (m ³ /día)		C. Andes: 4.910 (m ³ /día)	
	INFLOW (m³/día)	OUTFLOW (m³/día)	INFLOW (m³/día)	OUTFLOW (m³/día)
Oeste	0	- 9.546	0	- 225.824
Este	9.962	0	9.547	0
Sur	130	- 48.485	0	0
Norte	0	0	48.485	- 130
R. Cerros	25.456	0	12.304	0
Ríos	843.089	- 912.542	47.358	- 68.637
Recharge	91.936	0	176.897	0
TOTAL	970.573	- 970.573	294.591	- 294.591

Tabla N° 7. Balance de masas en área total de los acuíferos de las cuencas del río Valdivia y Bueno con 20% de recarga.

Fuente: GW Vistas

	Acuífero total río Valdivia		Acuífero total río Bueno	
Inf. PP	0,000714 (m ³ /día)		0,001024 (m ³ /día)	
Inf. Q _{sup}	C. Costa: 23.210 (m ³ /día)		C. Costa: 29.540 (m ³ /día)	
	C. Andes: 78.560 (m ³ /día)		C. Andes: 19.640 (m ³ /día)	
	INFLOW (m³/día)	OUTFLOW (m³/día)	INFLOW (m³/día)	OUTFLOW (m³/día)
Oeste	0	- 18.193	0	- 251.920
Este	25.276	0	18.193	0
Sur	318	- 91.050	0	0
Norte	0	0	91.050	- 318
R. Cerros	101.771	0	49.180	0
Ríos	698154	- 1.085.051	3.811	- 617.587
Recharge	368.775	0	707.591	0
TOTAL	1.194.294	- 1.194.294	869.825	- 869.825

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones consecuencia del estudio realizado se describen a continuación:

El modelo desarrollado representó de forma aproximada y simplificada la simulación de flujos subterráneos en la zona estudio, arrojando resultados claros, concisos y de fácil interpretación utilizando variables reales del estudio de la DGA en las distintas situaciones planteadas.

De acuerdo a los resultados entregados por la simulación, en la depresión intermedia de la Región de los Ríos, los acuíferos asociados a las cuencas de los río Valdivia y río Bueno se encuentran hidrológicamente conectados.

Se observó que los flujos en ambos acuíferos predomina el escurrimiento en sentido hacia la costa, manifestado en que las líneas piezométrica decrecen en sentido Este-Oeste, validando así el estudio realizado por la DGA. Los ríos Calle-Calle, San Pedro y Bueno son los principales cauce de descarga de estas aguas.

Las direcciones de los flujos en la zona de limitación de cuencas para los diferentes escenarios permitieron determinar que es el acuífero de la cuenca del río Valdivia quien aporta una mayor cantidad de agua subterránea al acuífero de la cuenca de río Bueno con un 99,8% del total de la interacción.

La magnitud del intercambio de agua subterránea entre estos dos acuíferos es de 62.735 m³/día: 62.619 m³/día desde el acuífero de la cuenca del río Valdivia al acuífero de la cuenca Bueno en dirección N-S, y 116 m³/día desde el acuífero de la cuenca del río Bueno al acuífero de la cuenca Valdivia en dirección S-N.

El área aportante del acuífero de la cuenca del río Valdivia al acuífero de la cuenca del río Bueno es de aproximadamente 110,1 km², equivalente al 1,07% del área total de la cuenca del río Valdivia y 2,81% del área total del acuífero.

El nivel de intercambio de agua subterránea entre estos dos acuíferos con respecto a los caudales superficiales de los ríos Calle-Calle y Bueno es insignificante, del orden 1:1000. En cambio, la interacción entre acuíferos se puede atribuir que corresponde a casi el 10% respecto a la recarga total en el área de estudio.

La construcción de un modelo conceptual y la simulación de varios escenarios permiten estudiar el comportamiento hidráulico de los acuíferos, y también poder establecer alternativas para el aprovechamiento sustentable de agua subterránea en la depresión intermedia de la Región de los Ríos.

BIBLIOGRAFÍA

- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, (2012). Estudio cuencas principales Región de los Ríos, Informe realizado por Amphos 21 Consulting Chile Ltda.
- DIRECCION GENERAL DE AGUAS, (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Bueno.
- DIRECCION GENERAL DE AGUAS, (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Valdivia.
- GOOGLE EARTH (2015). Version 7.1.5.1557, Earth Viewer 3D. <https://Earth.google.com>
- GOOGLE MAPS (2015). Alphabet Inc. (Accesado el día 25 de Marzo de 2016), <https://maps.google.com>.
- GROUNDWATER VISTAS (2015), Version 6. An Advanced 3D Modeling Environment for MODFLOW, Department of Geography, EE.UU.
- SALAZAR F. LEYLA, (2015). Análisis de los caudales medios mensuales y anuales registrados en la Región de los Ríos. Proyecto de título ingeniería civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- SERNAGEOMIN, (2002). Caracterización de los acuíferos del área de Valdivia. Santiago, Chile.
- SERVICIO DE EVALUCION AMBIENTAL (2012). Guía para el uso de modelos de agua subterráneas en el SEIA, Servicio de Evaluación Ambiental, SEA.
- WIKIPEDIA (2015). Modelo de agua subterránea, (Accesado el día 05 de Octubre de 2015), de https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_agua_subterránea.