



**GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

# **MIGRACIÓN DE MODELOS HIDROGEOLÓGICOS DESARROLLADOS EN VISUAL-MODFLOW Y GROUNDWATER VISTAS HACIA SU ESTADO NATIVO DE CÓDIGO MODFLOW**

**INFORME ENTREGA 1**

**REALIZADO POR:**  
Pontificia Universidad Católica

**S.I.T. N° 447**

**Santiago, 31 de diciembre de 2019**

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas  
Sr. Oscar Cristi Marfil

Jefa División Estudios y Planificación (S)  
Sra. Andrea Osses Vargas

Inspectora Fiscal  
Ingeniera Civil MSc., Sra. Andrea Osses Vargas

Inspectora Fiscal Subrogante  
Ingeniera Agrícola MSc., Sra. Pamela García Serrano

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE**

Jefe de Proyecto  
Ingeniero Civil Dr., Sr. Pedro Sanzana Cuevas

Profesionales Ingenieros de Proyecto  
Licenciada en Cs de la Ingeniería MSc, Nicole Blin  
Ingeniera Civil MSc, Josefa Sepúlveda  
Ingeniero Civil, Bruno Capponi

**Especialistas**

Ingeniero Civil Dr, Sr. José F Muñoz Pardo, Especialista en Hidrogeología  
Ingeniero Civil PhD, Sr. Francisco Suárez, Especialista en Hidrología

## CONTENIDO

1.	Introducción .....	4
2.	Objetivos.....	4
3.	Levantamiento de la información .....	4
3.1.	Estudios y modelos utilizados .....	5
3.2.	Resumen modelos MODFLOW recopilados .....	6
4.	Metodología.....	6
5.	Cuencas Piloto .....	8
5.1.	Cuenca Copiapó.....	8
5.1.1.	Modelo Subterráneo .....	8
5.2.	Cuenca Limari .....	22
5.2.1.	Estructura general del modelo.....	22
5.2.2.	<i>Propiedades hidráulicas</i> .....	22
5.2.3.	Condiciones de borde.....	24
5.3.	Cuenca Ligua-Petorca.....	28
5.3.1.	<i>Estructura general del modelo</i> .....	28
5.3.2.	<i>Propiedades hidráulicas</i> .....	29
5.3.3.	<i>Condiciones de borde</i> .....	31
5.4.	Cuenca Choapa.....	38
5.4.1.	Modelo Subterráneo .....	38
6.	Resumen de archivos nativos generados .....	48

## 1. Introducción

La Dirección General de Aguas (DGA) tiene dentro de sus funciones planificar el desarrollo del recurso hídrico de sus fuentes naturales con el fin de formular recomendaciones para su aprovechamiento. Para esto, es fundamental el aporte de herramientas que permitan a la DGA y otras organizaciones públicas llevar a cabo un rol administrador con una óptima toma de decisiones. Dentro de este marco, la DGA se propuso generar herramientas de simulación hidrológica en forma integrada, para lo cual, se llevó a cabo el acople de modelos hidrogeológicos hechos en Visual Modflow (VM) y Groundwater Vistas (GV), al modelo WEAP. El objetivo es obtener una herramienta única de simulación integrada superficial-subterránea, útil para la toma de decisiones respecto a los mecanismos más eficientes de distribución de agua por tipo de uso, análisis de escenarios de gestión, y adaptación a escenarios hidrológicos actuales y proyectados a nivel de cuenca.

En este contexto, por la calidad y disponibilidad de modelos existentes se seleccionaron las siguientes cuencas de Copiapo, Limari, Choapa, Ligua y Petorca en plataformas VM, GV, y WEAP. Cuando el acople es realizado con éxito, datos y resultados fluyen entre WEAP y Modflow en el mismo timestep de cálculo, proporcionando una capacidad ampliada de análisis de flujos superficiales, subterráneos, y sus interacciones (Yates et al., 2005a; Yates et al., 2005b).

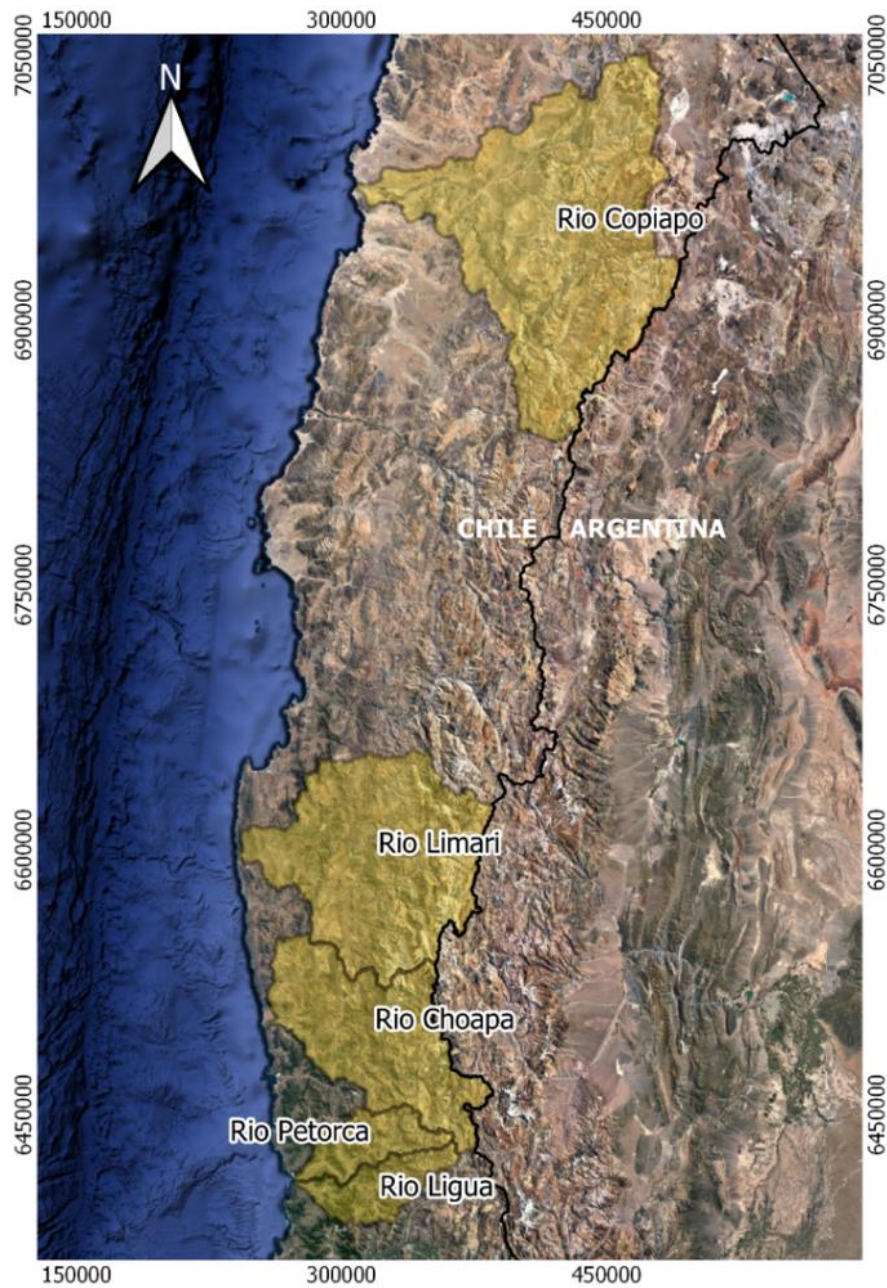
Para realizar el acople en WEAP, los modelos construidos en VM y GW deben migrarse a sus estados nativos de código Modflow, es decir, se deben preparar los archivos de entrada para que los paquetes básicos que lee MODFLOW a través de WEAP. Esta tarea requiere de conocimiento y amplio manejo en plataformas de modelación hidrológica e hidrogeológica, en el que se debe considerar una dedicación especial para llevar a cabo esta actividad. El actual proyecto fue llevado a cabo por la Universidad Católica para generar insumos específicos requeridos por la DGA en la Resolución Exenta 1917.

## 2. Objetivos

El objetivo de este estudio corresponde a generar los archivos nativos del primer Stress Period a partir de los modelos hidrogeológicos construidos en VM y GV para las cuencas de Copiapó (GV), Lmarí (VM), Choapa (VM), Petorca (GV y VM), y Ligua (GV y VM), a su estado nativo de código libre Modflow USGS para el formato de acople con WEAP. Es importante mencionar que WEAP sólo requiere el primer Stress Periodo de la modelación, ya que en los pasos de tiempo posteriores todas las series de recarga e interacción río-acuífero pasa a ser resultado de la interacción superficial-subterránea en cada paso de tiempo entre WEAP y MODFLOW.

## 3. Levantamiento de la información

En este trabajo se consideraron tres cuencas en estudio correspondientes a: i) río Copiapó; ii) río Limarí; y iii) río Choapa (Figura 3-1).



**Figura 3-3-1. Cuencas de estudio. Coordenadas en UTM - WGS 84 (actualmente en este estudio sólo están Copiapó y Choapa)**

Fuente: Elaboración propia con información DGA-BNA

### 3.1. Estudios y modelos utilizados

### 3.2. Resumen modelos MODFLOW recopilados

Por otra parte, se recopilaron los modelos MODFLOW disponibles y desarrollados en las cuencas en estudio (Tabla 3-1).

**Tabla 3-1 Modelos MODFLOW recopilados.**

Cuenca	Software	Versión	Nombre del Estudio
Copiapó	GroundWater Vistas	2005	“Herramientas de gestión y actualización de los modelos numéricos del acuífero de Copiapó” (DGA, 2018)
Choapa	Visual MODFLOW	96	“Investigación Recarga Artificial de Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo” (DGA-AC, 2012)
Limarí	Visual MODFLOW	96	“Estudio geofísico e hidrogeológico en la cuenca del río Limarí” (Innova Chile CORFO & GFC Ingenieros, 2015)
Ligua-Petorca	Visual MODFLOW	96	“Modelación Hidrológica de los Acuíferos de Ligua y Petorca” (DGA-AC, 2014)

## 4. Metodología

Para generar archivos nativos en modflow que tuvieran el formato necesario para hacer en enlace con WEAP se utilizó la metodología esquematizada en las figuras 4-1 y 4-2. A modo general, se elaboraron dichos archivos nativos a partir de un modelo antiguo existente de cada cuenca, generado con la interfaz Visual Modflow (VM), el cual se importó a las interfaces Groundwater Vistas (GV) y Modelmuse (MM), con el fin de crear un nuevo set de datasets o paquetes de MODFLOW que tuvieran el formato requerido para el posterior enlace con el modelo WEAP.

Para lograr lo anterior, el primer paso consiste en importar el archivo .in, generado por el antiguo modelo de la cuenca en VM, a la interfaz GV para poder modificarlo. La razón de usar GV y no importar el archivo .in directamente a MM es que muchos de los modelos antiguos elaborados en VM fueron creados utilizando MODFLOW 2000, y MM, al ser una herramienta más nueva que las otras interfaces, utiliza versiones más recientes de MODFLOW (desde MODFLOW 2005 en adelante). Si bien existe la opción de importar un modelo creado con versiones anteriores de MODFLOW, se generan errores al realizar la importación. Es por esto que se trabaja el modelo previamente en GV para poder cambiar de MODFLOW 2000 a 2005, y luego pueda ser importado a MM.

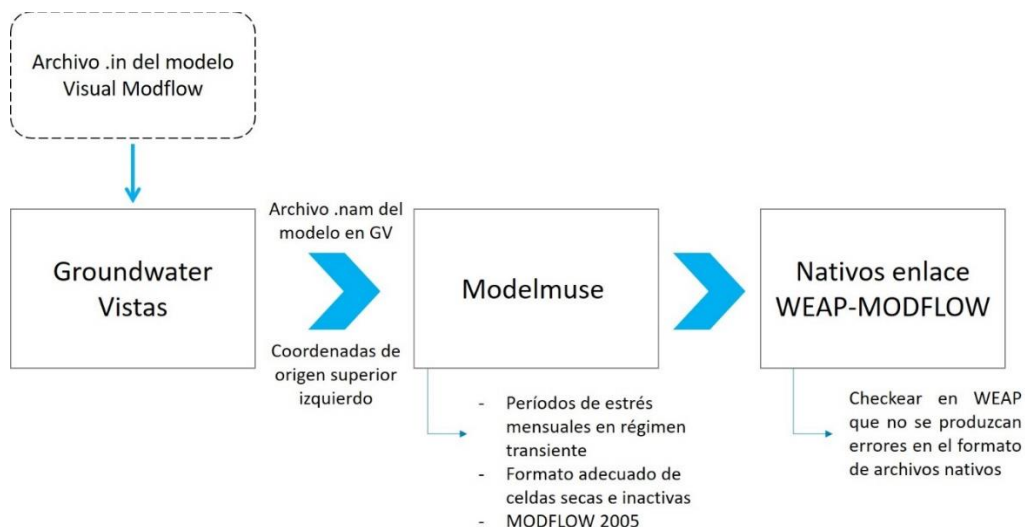
Una vez que se actualizó la versión de MODFLOW y se modificaron las propiedades necesarias en GV, se generan los paquetes por medio de dicha interfaz del modelo modificado. Posteriormente,

se importa a MM el archivo .nam generado por GV, dicho archivo, al igual que el .in de VM, contiene la información del set de paquetes que conforman el modelo a importar. Para finalizar correctamente el proceso de importación, es necesario entregar a MM la coordenada de origen del modelo en cuestión. Para esto es importante tener presente que GV utiliza la coordenada inferior izquierda como coordenada de origen.

Ademas de lo anterior, para hacer el enlace WEAP - MODFLOW, es necesario que el modelo cumpla con determinados formatos, detallados a continuación:

- Discretización temporal: los time steps de ambos modelos deben coincidir. Para eso se modificaron los modelos MODFLOW tal que los time steps sean mensuales, con duración de 30 días (se define un time step por período de estrés, por lo que al hablar de time step se está hablando también de período de estrés). Es importante destacar que WEAP únicamente tomará el primer período de estrés de MODFLOW para hacer el enlace.
- Tipo de simulación: otro aspecto importante con el que debe cumplir MODFLOW es que debe ser una simulación de tipo transiente, es decir que permite el almacenamiento, de modo que las entradas no necesariamente tienen que ser iguales a las salidas del sistema. En caso de que se tenga un modelo en régimen permanente, es necesario ingresarle valores de almacenamiento (almacenamiento específico y/o rendimiento específico, según el tipo de acuífero en cuestión).
- Unidades: al igual que en WEAP, las unidades en MODFLOW deben estar expresadas en metros y días.

Posteriormente se corre el modelo en MM para que así el programa genere los paquetes en el formato adecuado para ser importados a WEAP, que indicará al usuario en caso de que existan errores de formato que se deban corregir nuevamente en MM.



*Figura 4-1 Diagrama de Flujo de Pasos para Generación de Archivos Nativos de MODFLOW para acople con WEAP*



## 5. Cuencas Piloto

### 5.1. Cuenca Copiapó

#### 5.1.1. Modelo Subterráneo

Se exponen a continuación las principales consideraciones del modelo Groundwater Vistas según el estudio “Herramientas de gestión y actualización de los modelos numéricos del acuífero de Copiapó” (DGA, 2018).

El modelo numérico MODFLOW 2005 posee una gran resolución espacial (268.180 celdas totales, de ellas, 15.840 celdas activas) y temporalmente se discretizó en 304 periodos de definición de variables temporales (stress), el primero consideró un día de duración (régimen permanente, estado inicial corresponde al promedio de los niveles freáticos de los 5 años previos, 1988-1992) y los siguientes un mes calendario (régimen transiente de simulación, enero 1993- marzo 2018).

La calibración se realizó teniendo en cuenta 69 pozos de observación en el acuífero del río Copiapó. Se evaluó cualitativamente tendencias en hidrogramas de pozos observados y simulados, consistencias en mapas de isofreáticas con relación a direcciones de flujo y descensos, y verificación de flujos en sectores respecto de lo realizado en DGA (2013). Se observó un buen ajuste entre los datos simulados y observados con estadígrafos de calibración, un error medio absoluto (MAE) normalizado de 0,59% y un error cuadrático medio (RMS) normalizado de 0,84%, siendo el criterio de aceptación MAE normalizado inferior al 5% cumpliendo con lo establecido por la “Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)” del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y RMS normalizado inferior al 10%.

Se muestra en la Tabla 5-1 el balance hídrico general del modelo numérico transiente del periodo 1993-2018 para las diferentes componentes de flujo, tal como se reportó en el informe respectivo (DGA, 2018). Sin embargo, con los archivos entregados por la DGA se realizó una simulación, la cual entrega el balance señalado en la Tabla 5-2. Las discrepancias son menores, pero el modelo sigue siendo consistente, con bajo error en el balance.



**Tabla 5-1. Balance Hídrico Régimen Transiente – Promedio 1993-2018 - Calibración Conjunta.**

<b>Entradas (l/s)</b>	
Flujo subterráneo	587
Recarga	4.386
Total	4.973
<b>Salidas (l/s)</b>	
Flujo subterráneo	0
Afloramiento	1.303
Pozos de bombeo	4.451
Total	5.754
<b>Balance</b>	
Variación de Almacenamiento (l/s)	-781
Error de Balance (l/s)	-0.08
Error de Balance (%)	0,00%

Fuente: DGA, 2018

**Tabla 5-2. Balance Hídrico Régimen Transiente – Promedio 1993-2018 - Calibración Conjunta.**

ENTRADAS [l/s]	
Almacenamiento	1994.42329
Carga Constante	1764.53523
Drenes	0
Pozos	0
Recarga	1839.68316
Total ENTRADAS	5598.64168
SALIDAS [l/s]	
Almacenamiento	484.967986
Carga Constante	0
Drenes	1453.18269
Pozos	3660.44199
Recarga	0
Total SALIDAS	5598.59266
Error	0.04901389
% discrepancia	1.01E-07

Fuente: Elaboración propia

En la cuenca del Copiapó se han definido 6 Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento Común (SHAC, Figura 5-1):

- Sector 1: Ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta el Embalse Lautaro.
- Sector 2: Embalse Lautaro hasta la Puerta.
- Sector 3: La Puerta hasta Mal Paso.
- Sector 4: Mal Paso hasta Copiapó.
- Sector 5: Copiapó hasta Piedra Colgada.
- Sector 6: Piedra Colgada hasta Angostura.

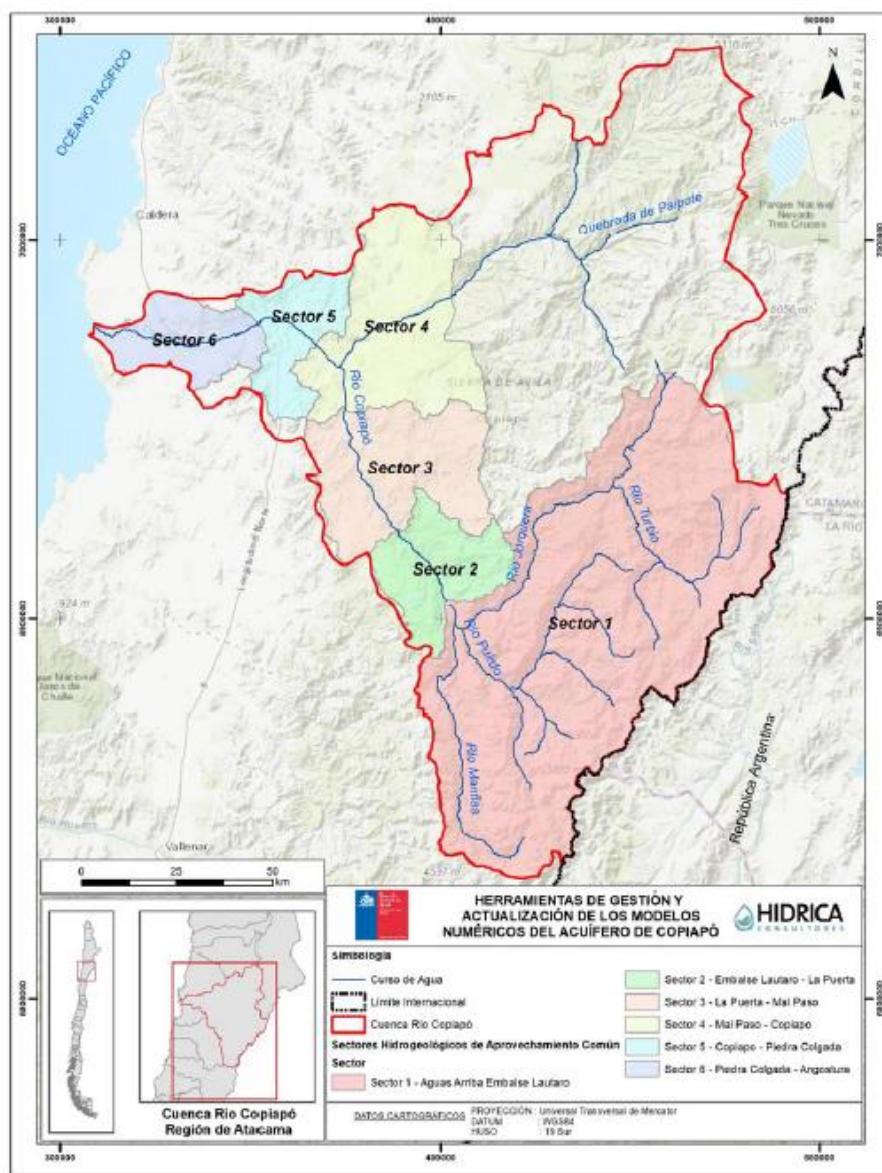


Figura 5-1. Cuenca Río Copiapó y Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC).

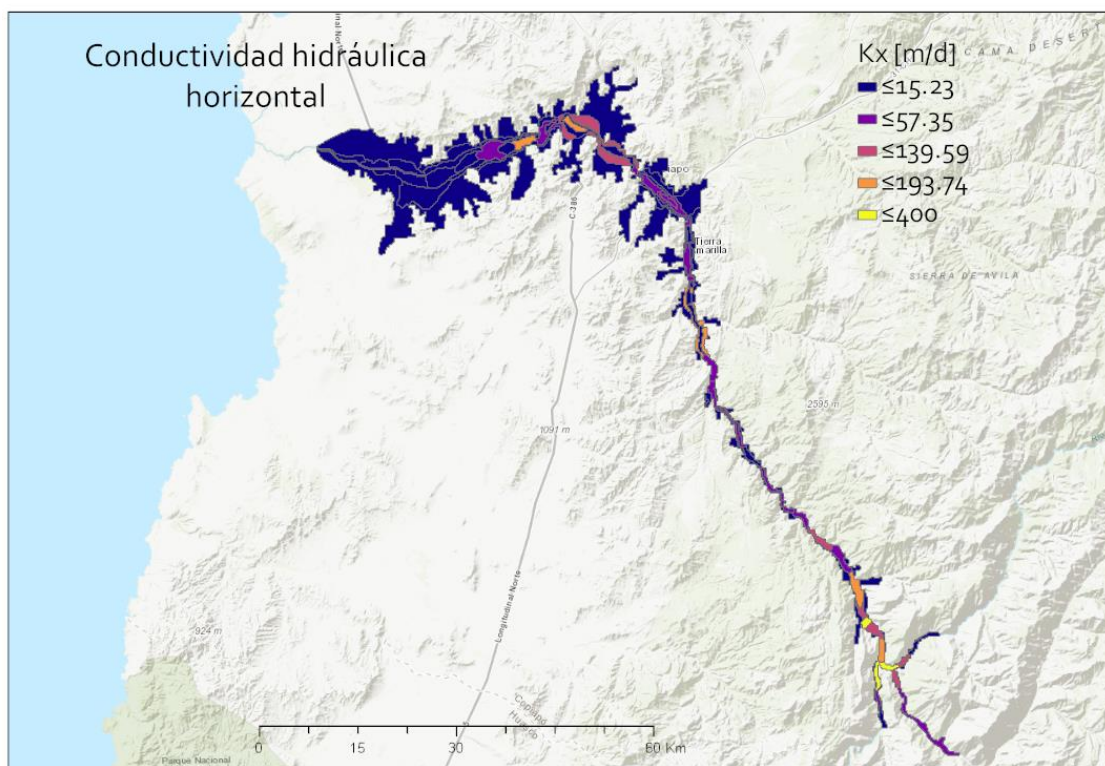
Se dividió en subsectores el SHAC 1 correspondiente a Ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta el Embalse Lautaro. Para esto se realizó una campaña de prospecciones de gravimetría y electromagnéticas (Strata GEM) en el Sector 1 con el ánimo de complementar la información existente en cuanto al espesor del relleno sedimentario potencial de constituirse como acuífero mediante la determinación de la profundidad que alcanza el basamento rocoso. Las prospecciones gravimétricas se distribuyeron así: Río Jorquera: 1 perfil longitudinal, 9 perfiles transversales y 120 estaciones; Río Pulido: 2 perfiles longitudinales, 5 perfiles transversales y 73 estaciones; y Río Manflas: 1 perfil longitudinal, 5 perfiles transversales y 121 estaciones. Estas prospecciones se ubicaron espacialmente hasta 10 km aguas arriba del modelo hidrogeológico DGA (2013) en río Jorquera, 7 km en el río Pulido y 4 km en el río Manflas. Se dividió así:

- Subsector 01 – Río Copiapó (SS01-RC)
- Subsector 01 – Río Jorquera (SS01-RJ)
- Subsector 01 – Río Pulido (SS01-RP)
- Subsector 01 – Río Manflas (SS01-RM)

Considerando los antecedentes estratigráficos para la modelación hidrogeológica se implementó el acuífero como uno de tipo **no confinado mono-capa**. Se utilizó como límite superior la topografía de la superficie, y como límite inferior la profundidad a la que se estimó la existencia del basamento rocoso impermeable importadas desde el modelo numérico DGA realizado en el 2013. A efectos de no generar problemas numéricos asociados a inestabilidad numérica, se estableció un espesor mínimo del estrato de 65 metros para el caso del sector del río Jorquera, 100 metros para el río Pulido y 85 metros para el río Manflas.

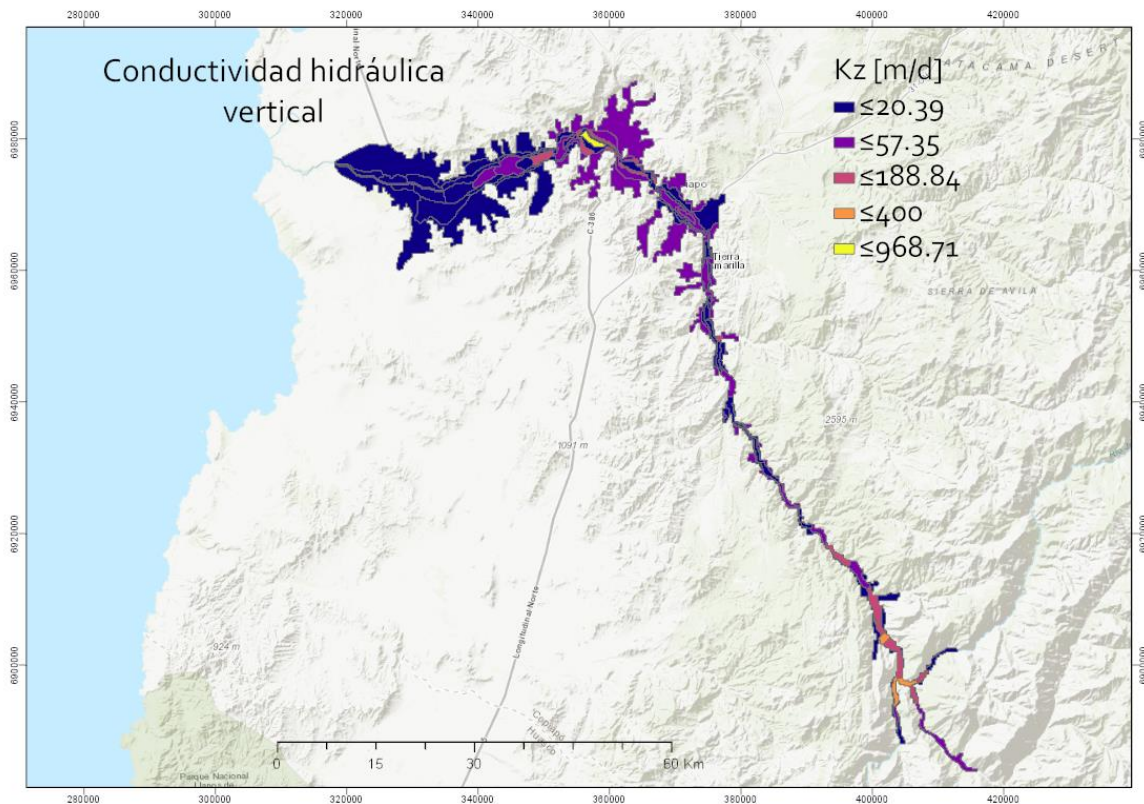
#### 5.1.1.1. Propiedades hidráulicas

- i. **Conductividad hidráulica:** El modelo tiene 62 zonas de conductividad hidráulica. El acuífero es isotrópico en el plano horizontal ( $K_x = K_y$ ), sin embargo, la conductividad vertical varía. En la Figura 5-2 y Figura 5-3 se observa en las figuras la distribución de las conductividades horizontales y verticales, respectivamente. Los valores reportados para las zonas oscilan entre los 0.69 a 183.3 m/d (Tabla 5-3).



**Figura 5-2: Conductividad hidráulica horizontal, MODFLOW Copiapó.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-3: Conductividad hidráulica vertical MODFLOW Copiapó.**

Fuente: Elaboración propia

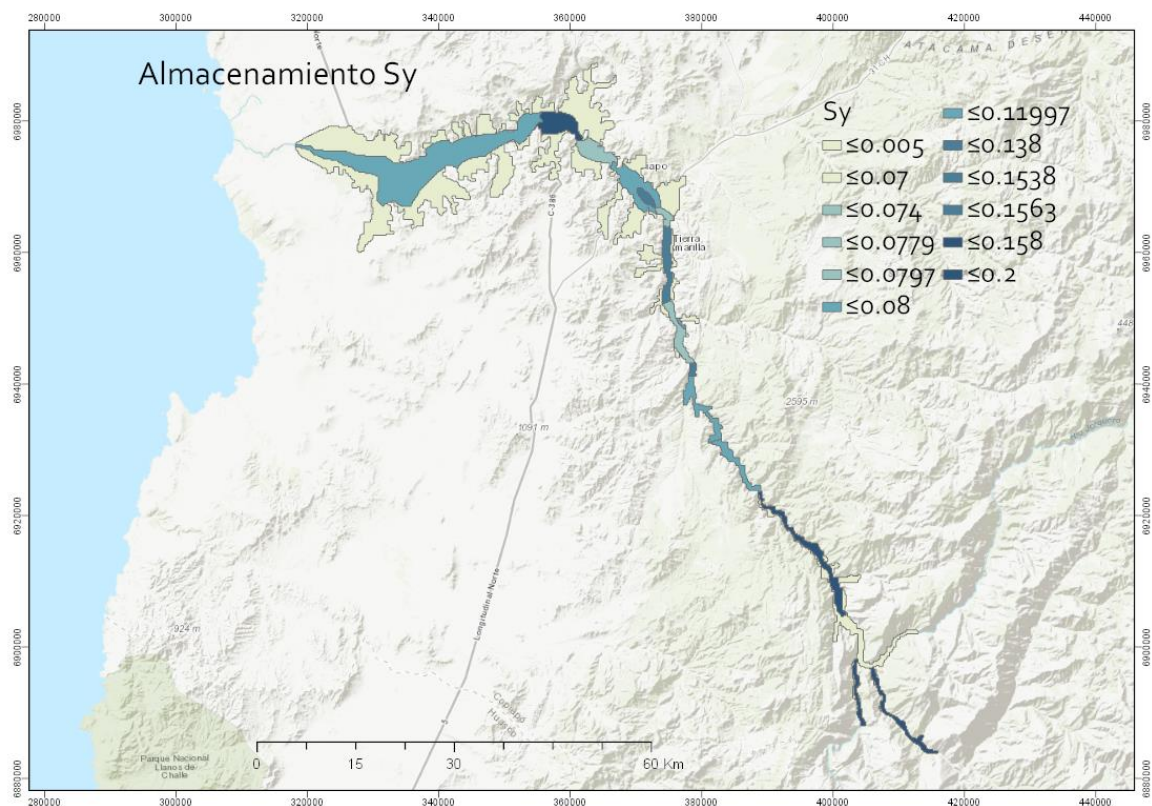
**Tabla 5-3. Permeabilidades Calibradas en Modelo MODFLOW (m/d).**

Sector	Permeabilidad
1a	133.4
1b	39.1
1c	63.6
1d	183.3
2a	55.6
3a	13.9
3b	55
4a	9.42
5a	27.8
6a	11.24
6b	0.69

Fuente: DGA, 2018



- ii. **Almacenamiento:** Debido al carácter transiente del modelo, se definió la propiedad de almacenamiento del acuífero, compuesta por el almacenamiento específico ( $S_s$ ) y por el rendimiento específico ( $S_y$ ), en 12 zonas distintas. El  $S_s$  tiene un valor constante para todo el acuífero igual a  $1 \cdot 10^{-5} [m^{-1}]$ , mientras que la distribución de  $S_y$  se puede observar en la Figura 5-4. Finalmente, los valores de coeficiente de almacenamiento se presentan en la
- iii. **Tabla 5-4.**



**Figura 5-4: Rendimiento específico  $S_y$  del acuífero MODFLOW Copiapó.**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-4. Coeficiente de Almacenamiento Calibrado en MODFLOW. Fuente: DGA, 2018.**

Sector	Coeficiente de almacenamiento
1a	0.16
1b	0.2
1c	0.06
1d	0.01
2a	0.11

Sector	Coefficiente de almacenamiento
3a	0.11
3b	0.09
4a	0.08
5a	0.09
6a	0.08
6b	0.07

Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.1.2. Condiciones de borde

Específicamente las condiciones de borde corresponden a:

- Condición de Carga Hidráulica Conocida (condición de frontera tipo 1, Dirichlet): aplicada en las cabeceras del modelo.
  - Condición de Flujo Especificado (condición de frontera tipo 2, Neuman): en zonas donde no ingresa flujo al modelo (celdas inactivas y fondo de modelo); y zonas de recargas naturales, antrópicas, y extracciones.
  - Condiciones Tipo Dren (condición de frontera tipo 3, Cauchy): en flujos que son dependientes del nivel freático: afloramientos en cauce del río Copiapó.
- i. **Recarga:** Como se muestra en la Tabla 5-5, Se definieron 14 zonas de recarga en el modelo. En la Figura 5-5 se muestra la distribución de dichas zonas y el valor de recarga definido para el primer SP simulado.

**Tabla 5-5. Recarga Promedio Sectores Acuíferos Implementada en Modelo Migrado (1993-2018).**

Sector	Recarga (m <sup>3</sup> /s)	Sector	Recarga (m <sup>3</sup> /s)
SSA01a	0.3	SA03b	0.55
SA01b	0.26	SA04a	0.73
SA01c	0.14	SA05a	0.25
SA01d	0.22	SA06a	0.07
Embalse	0.73	SA06b	0.01
SA02a	0.14	AP A04a	0.14
SA03a	0.45	PTAS A05a	0.16

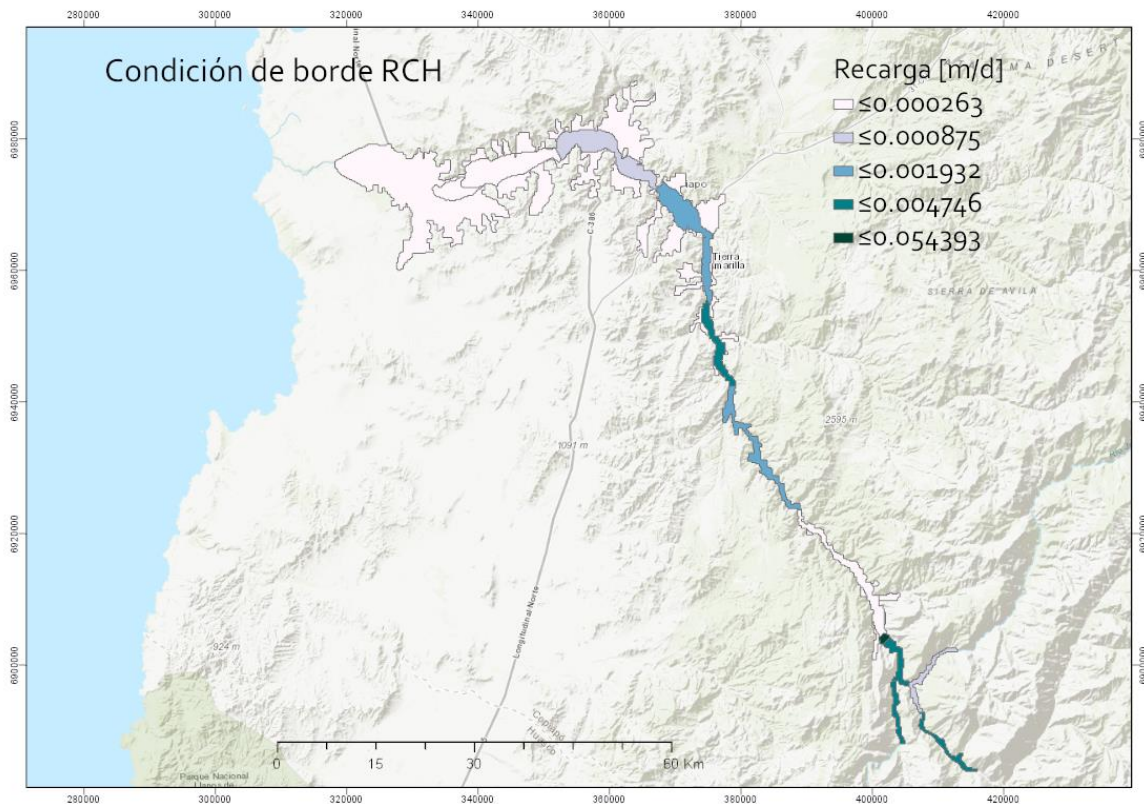
Fuente: DGA, 2018

Se mantuvieron las condiciones de borde del modelo SERNAGEOMIN (2011) para el Sector Alto, con condición de nivel constante en la cabecera de los ríos Pulido, Jorquera y Manflas. También se mantuvo la condición de drenaje, para reflejar afloramientos en el sistema. La



consideración de condición de nivel constante como entrada de flujo subterráneo de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas se realizó mediante la incorporación de la cota de terreno en las celdas de cabecera como nivel fijo ajustado al registro de nivel freático, siendo calibrado y ajustado los flujos promedios en base a los registros de pozos DGA cercanos a las cabeceras de cada cauce (pozos Fundo Rodeo, Quebrada Seca y Hacienda Manflas respectivamente). Con esta implementación, se incorporó el flujo subterráneo que recarga el acuífero en la parte alta, el cual es una importante componente para el balance hídrico.

Se preservaron las tasas de recarga del acuífero estimadas por la DGA en el estudio realizado en el 2013 a partir de los resultados del modelo AQUATOOL y después de la calibración conjunta, se incorporaron las recargas efectivas calculadas en WEAP. Se asignó un monto de recarga a nivel mensual por cada elemento del acuífero integrado, siendo definidas como: infiltración de zonas agrícolas, infiltración de canales e infiltración de los tramos de río; las cuales se agruparon totalizando un monto de recarga en el acuífero. Se incorporaron los flujos de infiltración desde el embalse Lautaro en el SHAC 1 para el modelo Sector Alto, pérdidas del sistema de distribución del sistema de agua potable en el SHAC 4, la infiltración asociada a la descarga de la planta de tratamiento de aguas servidas en el SHAC 5.



**Figura 5-5: Recarga al acuífero MODFLOW Copiapó.**

Fuente: Elaboración propia

No se consideraron recargas naturales por precipitación debido a que no son significativas (5% de la precipitación, 112 l/s, 0.8% del total de la recarga del acuífero), sin embargo, si se incorporó la infiltración de la escorrentía en la cuenca identificada en los tramos del río Copiapó. Se eliminó del modelo hidrogeológico la zona de recarga asociada a la descarga de la PTAS, pasando de recargar el acuífero a descargar directamente el río Copiapó.

- ii. **Borde impermeable:** El borde impermeable en el modelo se fijó en todas las celdas que se encuentran fuera del acuífero y que se observan en gris en la Figura 5-6, obtenida del modelo en GV.

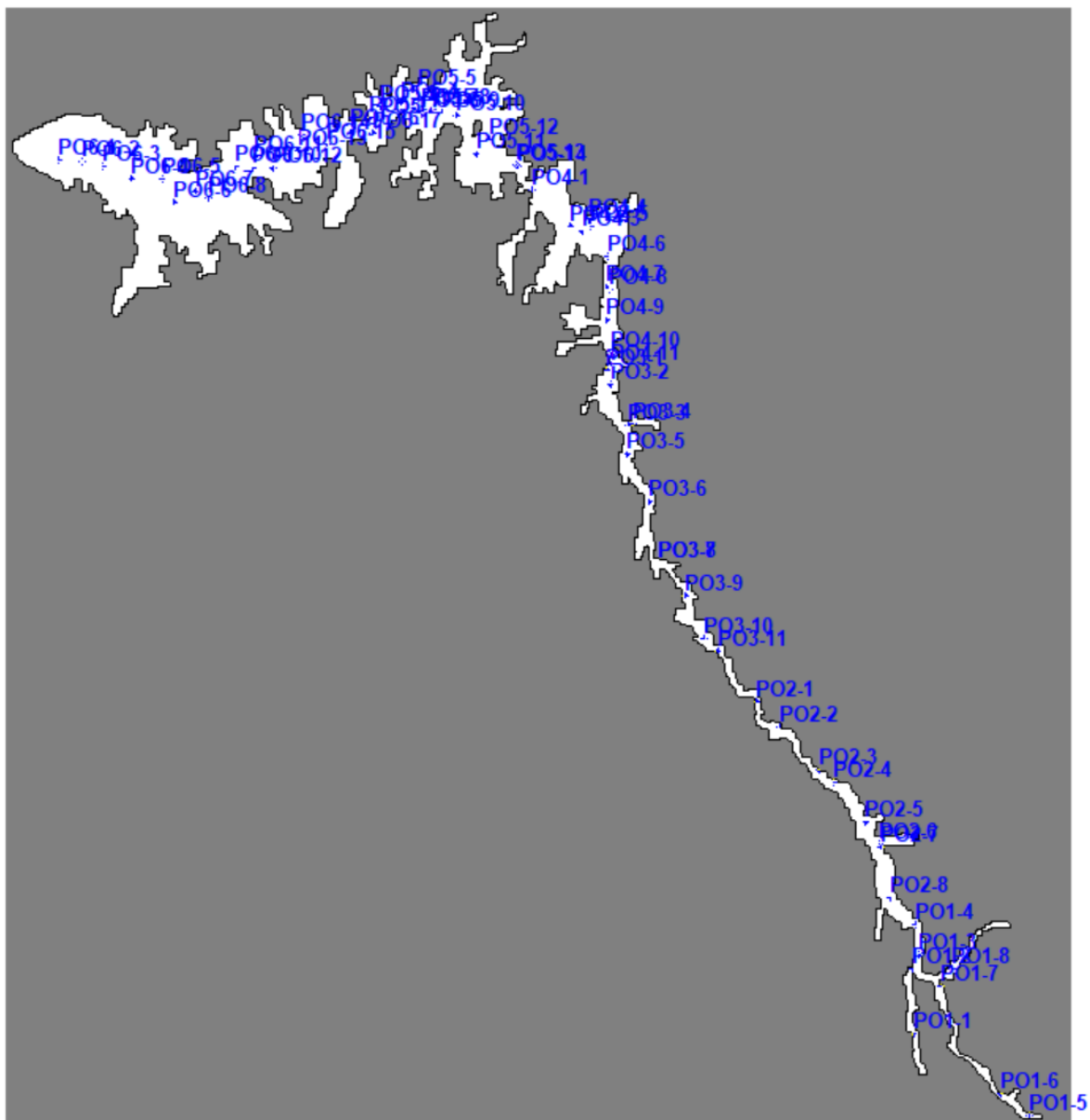
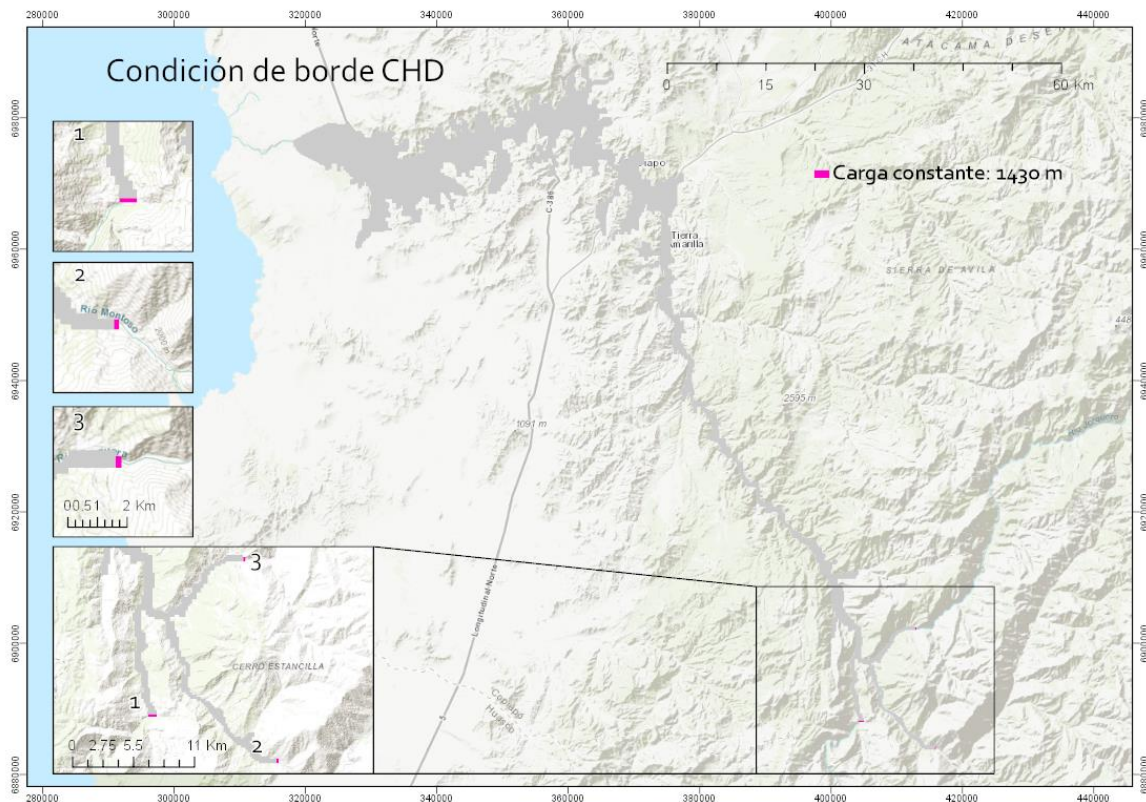


Figura 5-6: Borde impermeable MODFLOW Copiapó.

Fuente: Elaboración propia

- iii. **Carga constante:** La condición de carga constante (Figura 5-7) se definió en 8 celdas del modelo a las cuales se les asignó una carga hidráulica de 1433 m para todo el período de simulación.



**Figura 5-7: Condición de borde de carga constante MODFLOW Copiapó.**

Fuente: Elaboración propia

- iv. **Drenes:** La condición de dren se definió en 681 celdas del modelo. La cota que se le asignó a esta condición fue la elevación del terreno, la que se mantuvo constante para todos los períodos simulados (Figura 5-8).

La implementación del dren en el eje del cauce del río Copiapó reflejó de buena manera los afloramientos identificados en el SHAC 2, en particular en la localidad de los Loros, aguas arriba de la estación fluviométrica de Copiapó en La Puerta. Respecto al modelo Sector Bajo, se mantuvo la condición de borde tipo dren desde el modelo SERNAGEOMIN (2011). Con esta implementación, a lo largo del eje del cauce se representó de buena manera los afloramientos identificados aguas abajo de la localidad de Piedra Colgada hasta la zona de Angostura.







**Tabla 5-6. Extracción Promedio implementada en Modelo Migrado (1993-2018).**

Uso	Flujo de extracción promedio (m3/s)
Agrícola	3.97
Potable	0.47
Minero	0.47

Fuente: DGA, 2018

## 5.2. Cuenca Limari

### 5.2.1. Estructura general del modelo

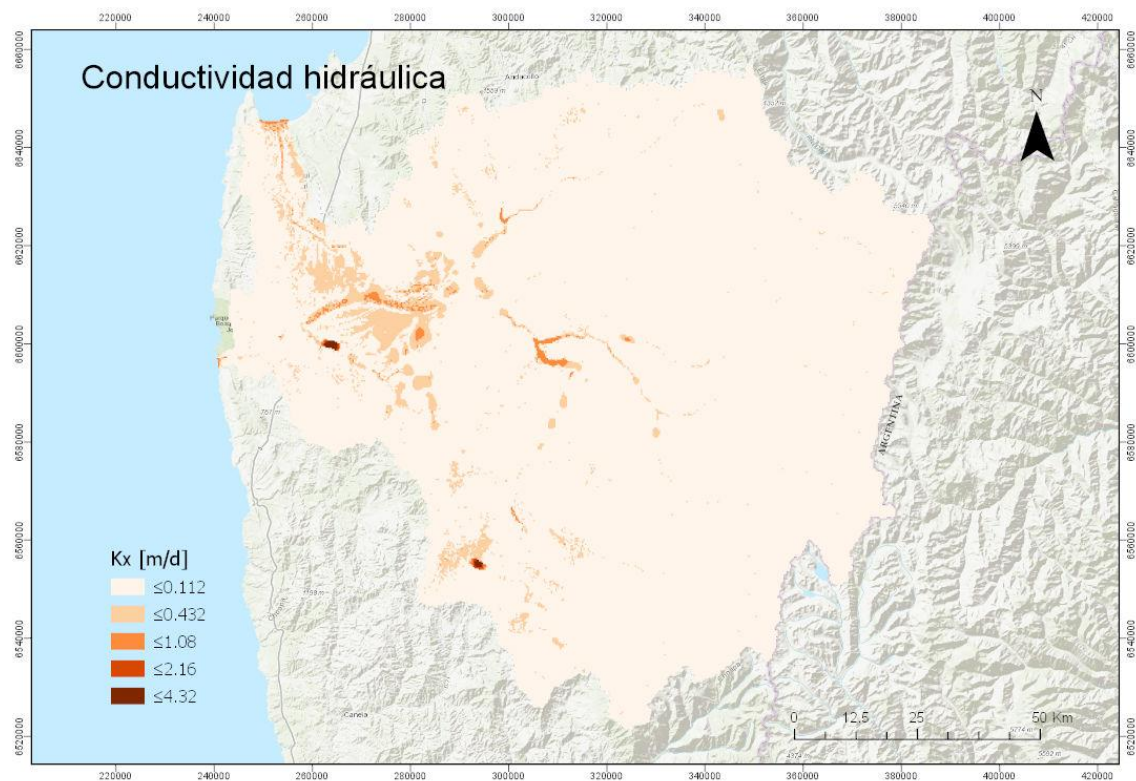
- Propiedades de la grilla
  - i. Filas: 464
  - ii. Columnas: 497
  - iii. Layers: 1
  - iv. Total de celdas: 230608
  - v. Celdas activas: 135766
  - vi. Coordenadas UTM de origen del modelo (inferior izquierda):
    - a. X: 239000
    - b. Y: 6520000
- Modflow: 2005
- Unidades:
  - i. Tiempo: días
  - ii. Espacio: metros
- Tipo de simulación: Régimen transiente
- Solver: PCG2

### 5.2.2. Propiedades hidráulicas

- a. Conductividad hidráulica

El acuífero es isotrópico ( $K_x = K_y = K_z$ ). A continuación se observa en la figura la distribución de la conductividad.

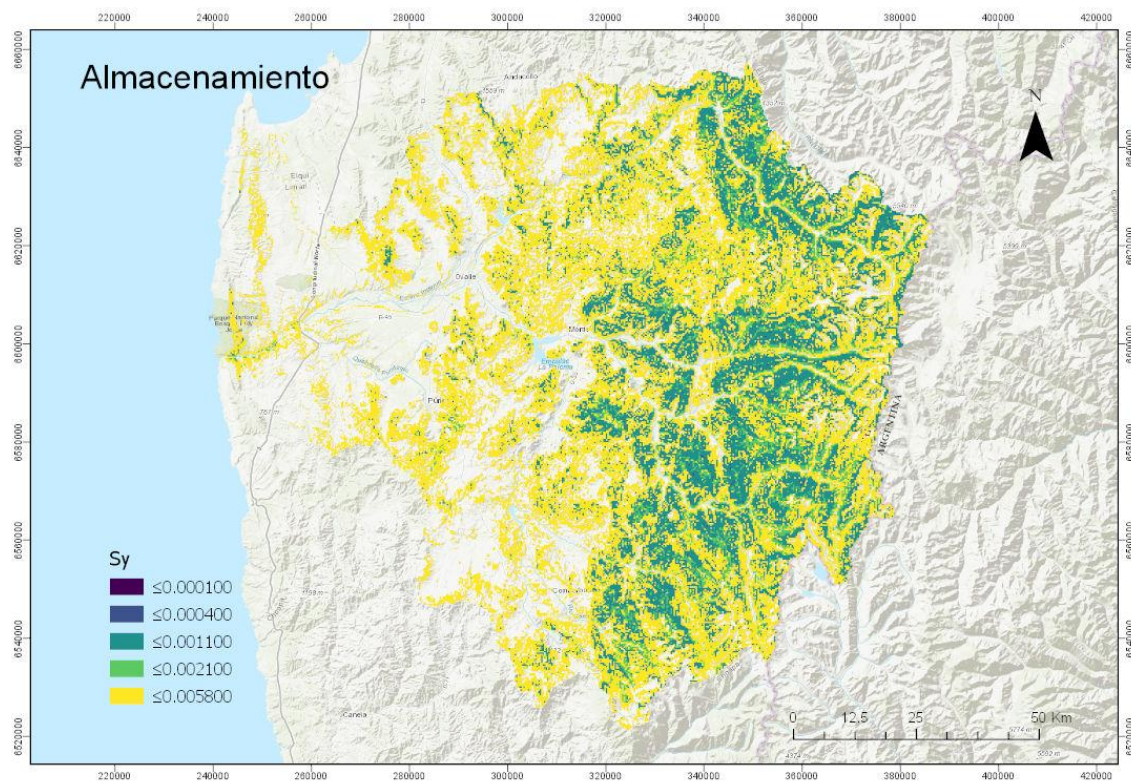




**Figura 5-10: Conductividad hidráulica.**

**b. Almacenamiento**

Debido al carácter transiente del modelo, se definió la propiedad de almacenamiento del acuífero, compuesta por el almacenamiento específico ( $S_s$ ) y por el rendimiento específico ( $S_y$ ). Al ser un acuífero libre se tiene que  $S_s \ll S_y$ , por lo que en la figura a continuación se representa solo este último.



**Figura 5-11: Rendimiento específico  $S_y$  del acuífero.**

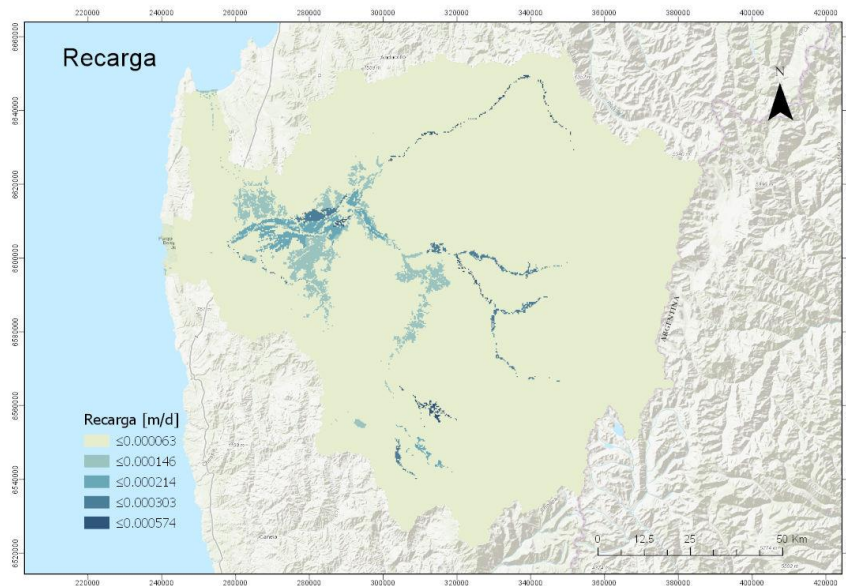
c. Altura inicial

La altura inicial del modelo se fijó en 5000 m de manera uniforme.

### 5.2.3. Condiciones de borde

a. Recarga

Existen 48 zonas con igual tasa de recarga en [m/d] en el modelo. En la imagen a continuación se muestra la distribución de dichas zonas y el valor de recarga definido para el primer SP simulado.



**Figura 5-12: Recarga al acuífero.**

#### **b. Borde impermeable**

El borde impermeable en el modelo se fijó en todas las celdas que se encuentran fuera del acuífero y que se observan en gris en la siguiente figura, obtenida del modelo en GV.

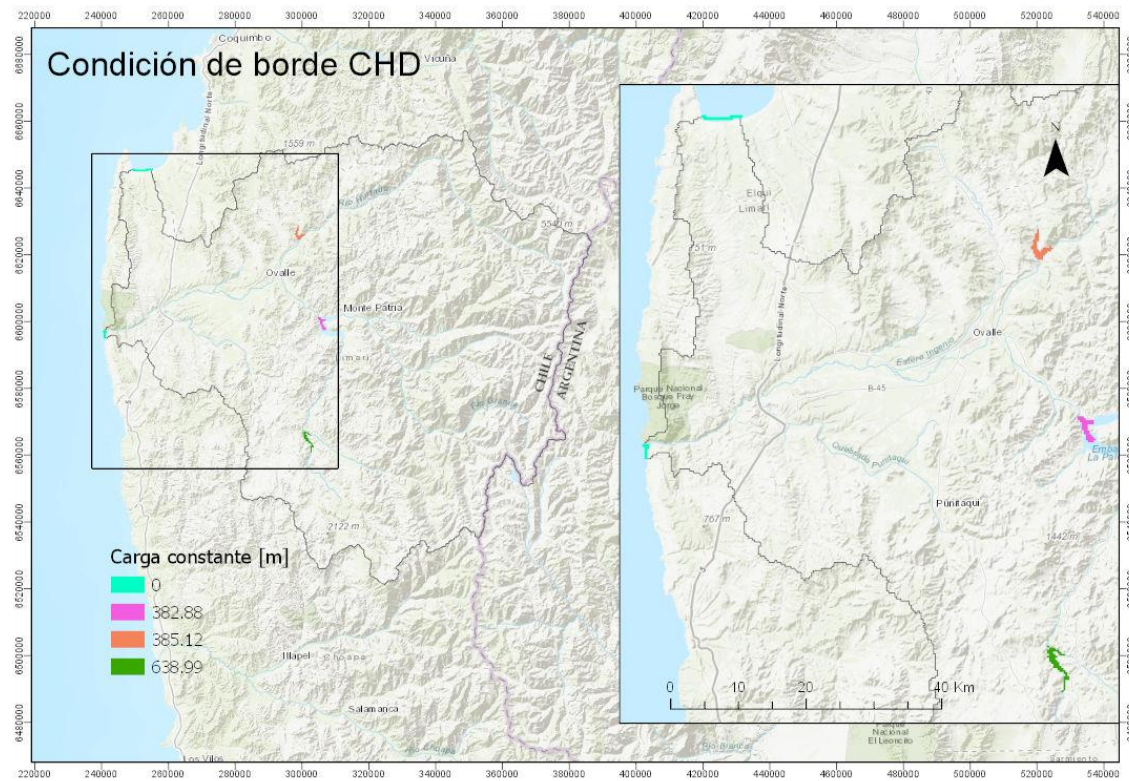


**Figura 5-13: Borde impermeable.**

#### **c. Carga constante**



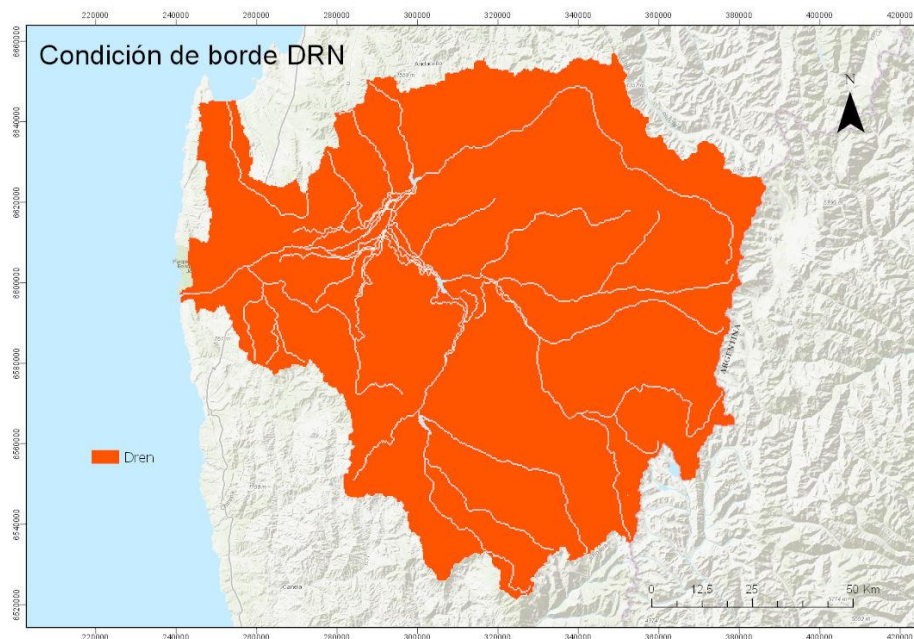
La condición de carga constante se definió en 201 celdas del modelo.



**Figura 5-14: Condición de borde de carga constante.**

#### **d. Drenes**

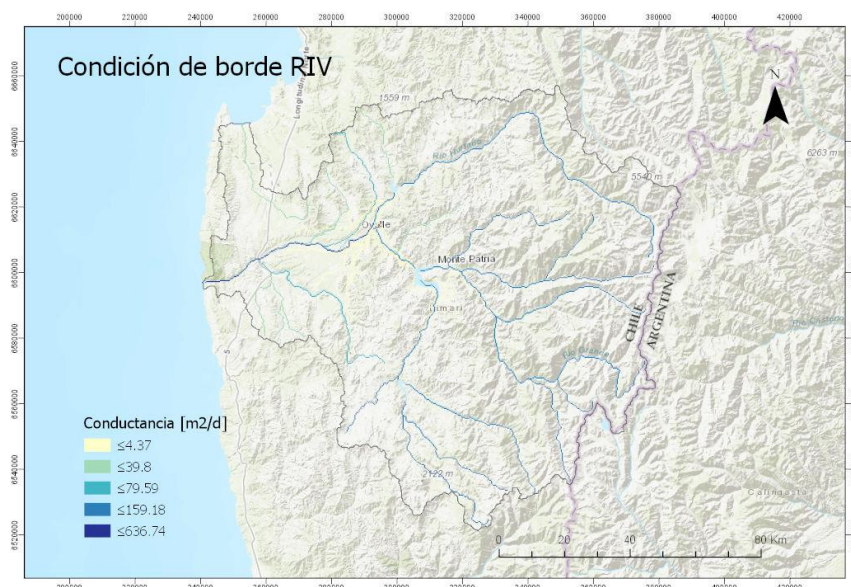
La condición de dren se definió en 131261 celdas del modelo. La conductancia de los drenes es igual en todas las celdas y tiene un valor de  $50 \text{ m}^2/d$ . Se definieron los drenes en todas las celdas del modelo que no forman parte del río.



**Figura 5-15: Conductancia de los drenes.**

#### e. Río

En la figura a continuación se muestra la condición de río, que fue asignada a 4303 celdas del modelo, donde se definieron 5 zonas de conductancia.



**Figura 5-16: Condición de río.**



## f. Pozos

En el modelo existen pozos de extracción definidos en 1017 celdas. El caudal que extrae cada pozo es distinto para cada período de estrés.

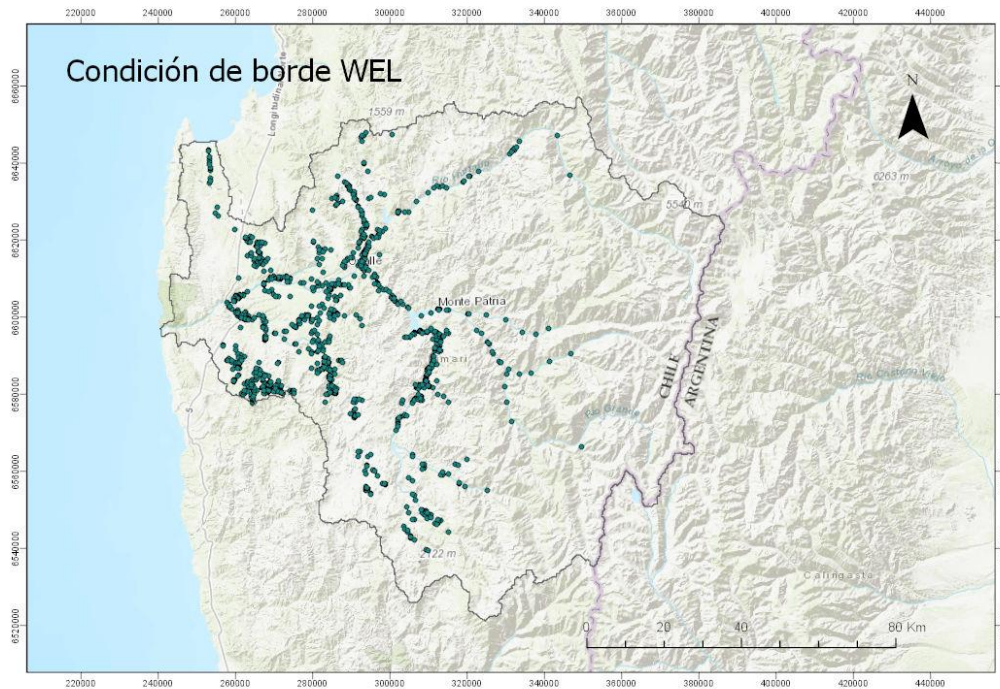


Figura 5-17: Ubicación de los pozos de bombeo en el modelo.

### 5.3. Cuenca Ligua-Petorca

Para generar el modelo que se utilizará para enlazar los programas de WEAP y MODFLOW se utilizó como base el modelo creado por Ayala, Cabrera y Asociados LTDA. (2014) en Visual Modflow.

#### 5.3.1. Estructura general del modelo

- Propiedades de la grilla
  - vii. Filas: 350 de 200m de alto
  - viii. Columnas: 476 de 200m de ancho
  - ix. Layers: 1
  - x. Períodos de estrés (SP): Se limitó a un solo periodo de estrés de 30 días (mensual) que es lo requerido por WEAP para el enlace.
  - xi. Total de celdas: 166600
  - xii. Celdas activas: 101099

xiii. Coordenadas UTM de origen del modelo (inferior izquierda):

- a. X: 272200 m
- b. Y: 6386600 m

Coordenadas UTM de origen del modelo (superior izquierda):

- a. X: 272200 m
- b. Y: 6456600 m

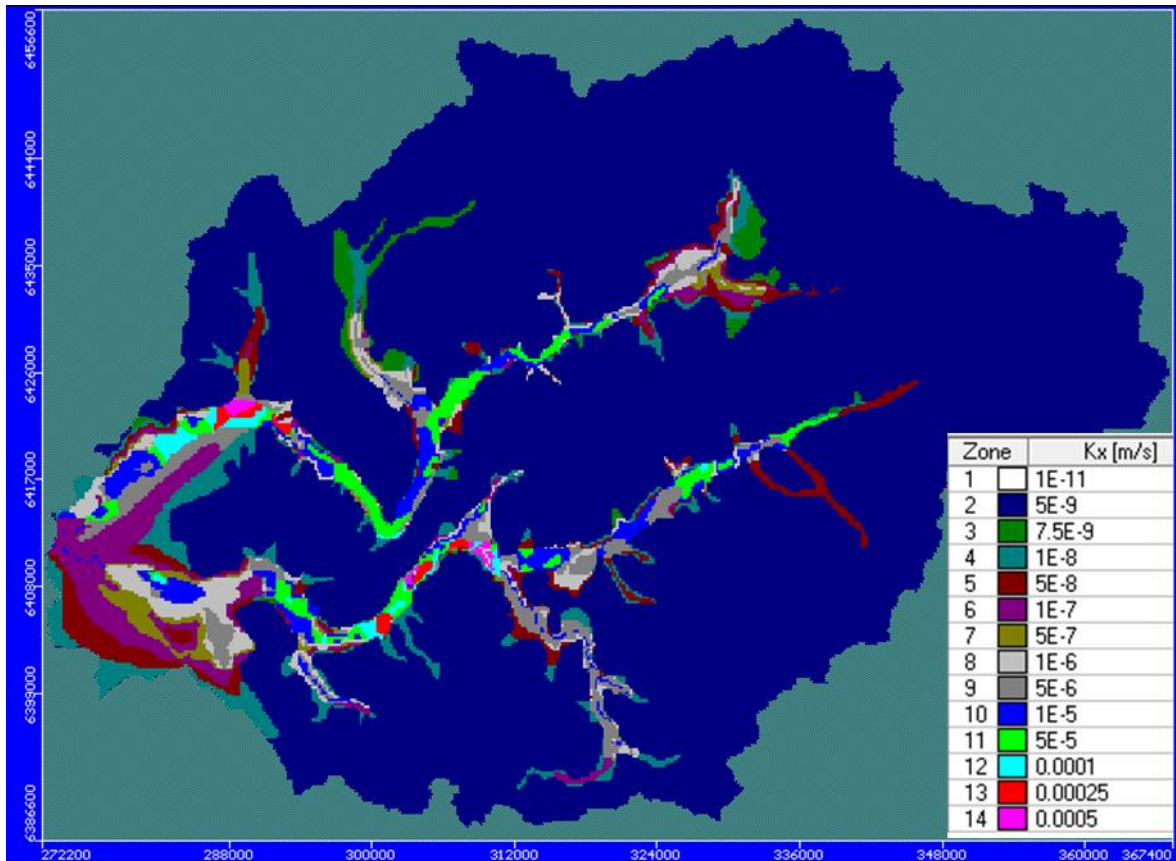
- Unidades:
  - iii. Tiempo: días
  - iv. Espacio: metros
- Tipo de simulación: Régimen transiente
- Solver: PCG

### *5.3.2. Propiedades hidráulicas*

#### **a. Conductividad Hidráulica**

El modelo contiene 14 zonas de conductividad hidráulica. El acuífero se modeló con propiedades isotrópicas. A la zona montañosa y sus laderas se le asignó una conductividad de  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s. La Figura 5-18 muestra el detalle de conductividades impuestas.



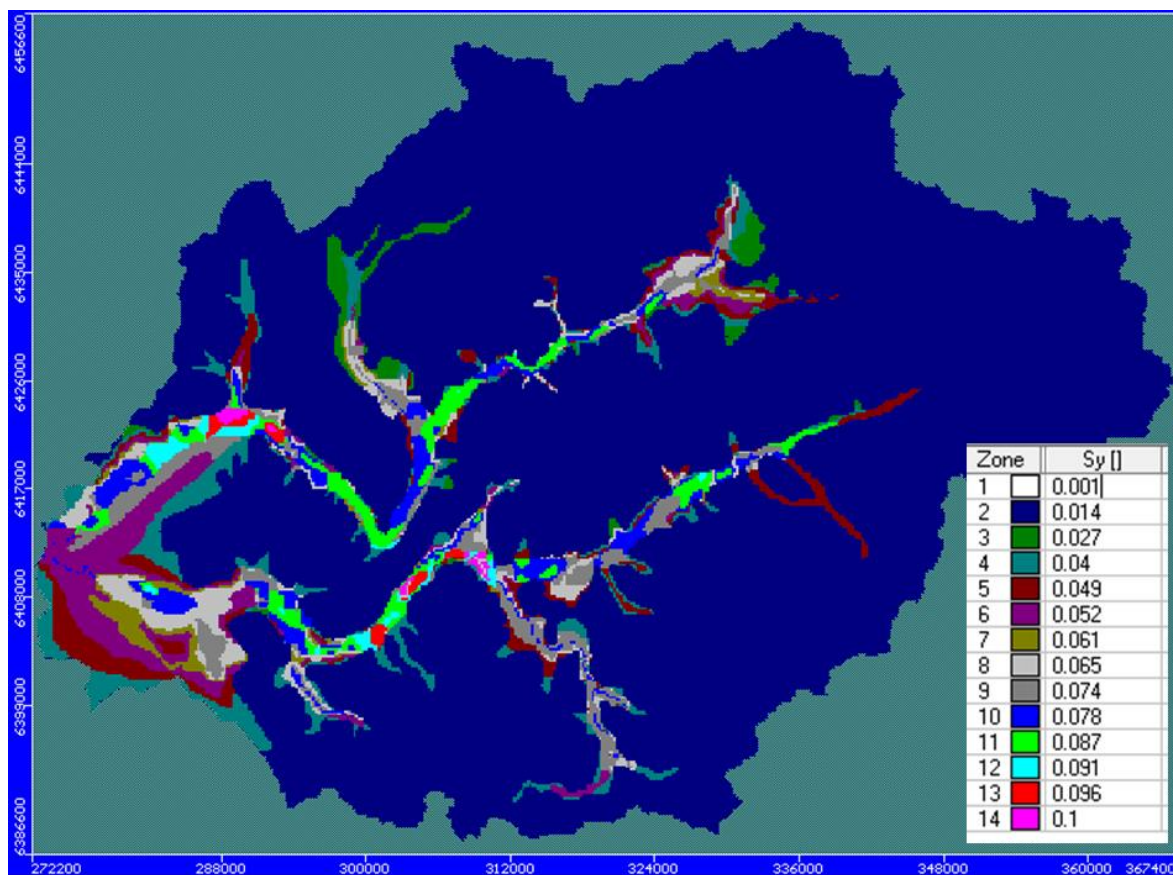


**Figura 5-18: Conductividad hidráulica modelo original Ligua-Petorca.**

#### **b. Almacenamiento**

Debido al carácter transiente del modelo, se definió la propiedad de almacenamiento del acuífero, compuesta por el almacenamiento específico ( $S_s$ ) y por el rendimiento específico ( $S_y$ ). Al ser un acuífero libre se tiene que  $S_s \ll S_y$ , por lo que en la Figura 5-19 a continuación se representa solo este último.

El almacenamiento se divide en 14 zonas de acuerdo con las propiedades del modelo desarrollado por DGA-AC (2014).



**Figura 5-19: Almacenamiento en el acuífero Ligua-Petorca.**

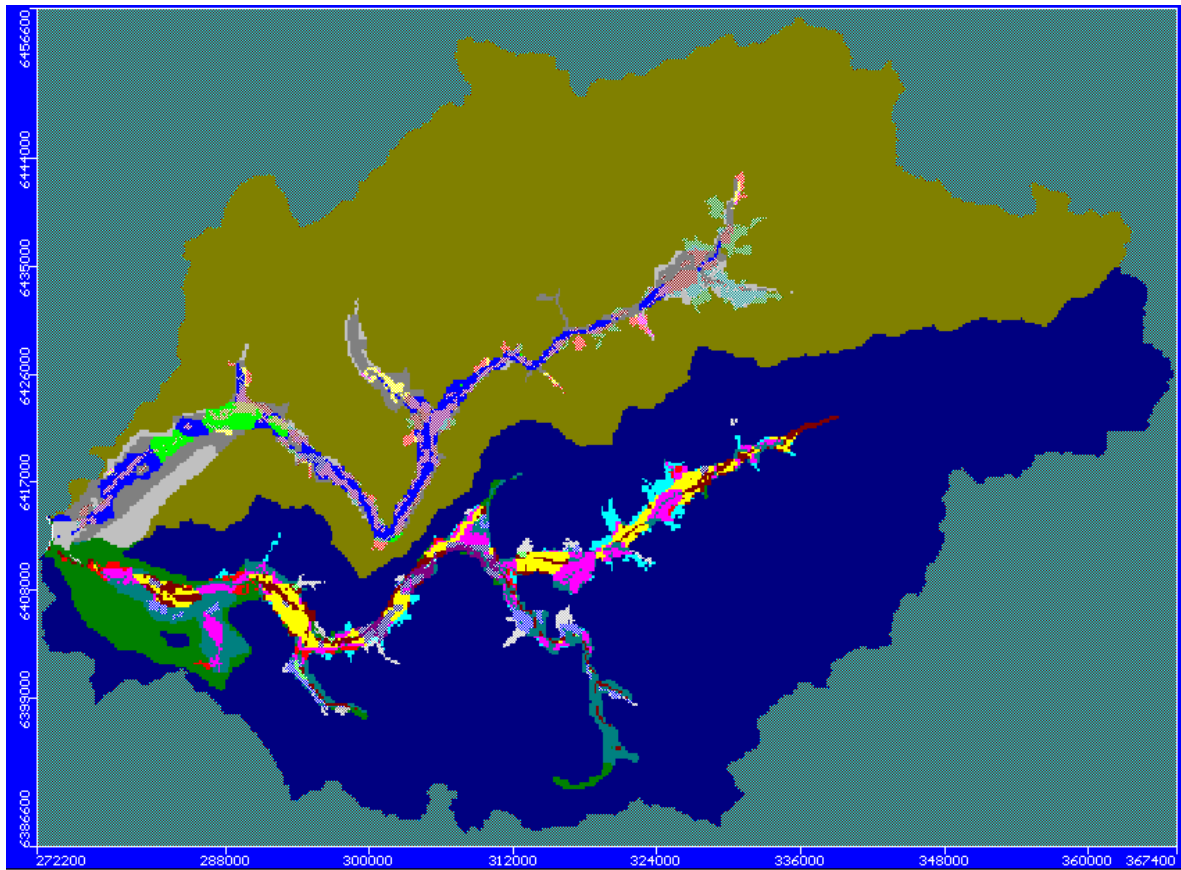
### 5.3.3. Condiciones de borde

#### c. Alturas iniciales

La condición de altura inicial considerada en el estudio DGA-AC (2014) fue de 0 m.s.n.m. Sin embargo, en la actual consultoría se decidió fijar esta altura igual a la cota de terreno, es decir, igual al TOP del modelo.

#### d. Recarga

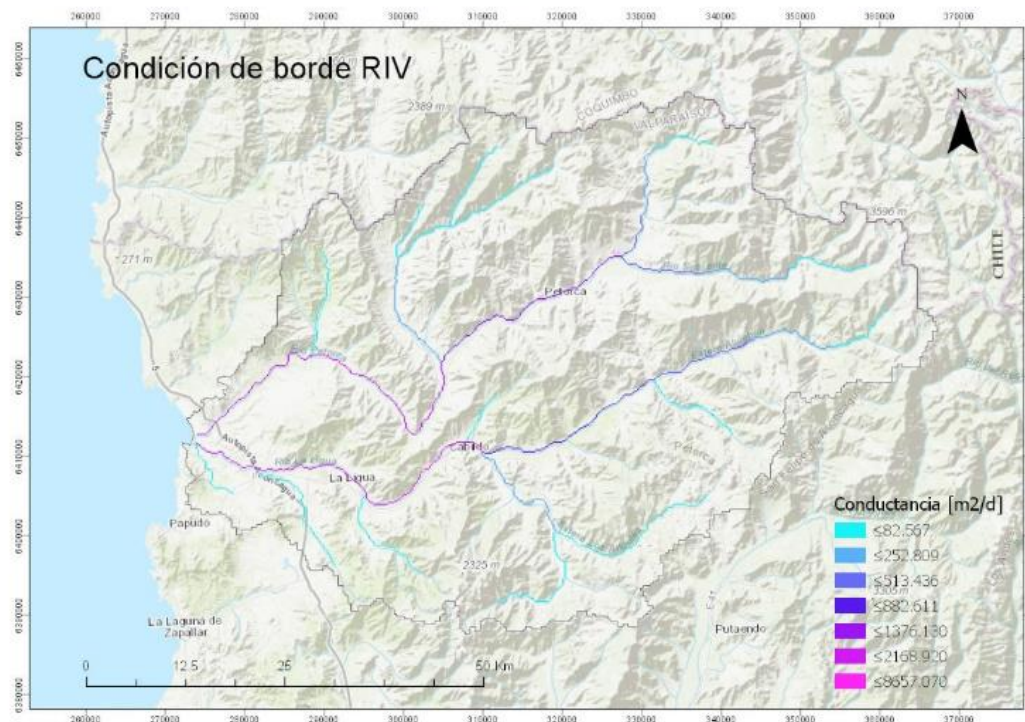
La recarga impuesta en el modelo DGA-AC (2014) fue por zonas (31), siguiendo la sectorización por conductividad hidráulica. La Figura 5-20 muestra la asignación por zona. Se ingresaron series temporales de recarga por zona. El detalle se puede revisar en el modelo MODFLOW original.



**Figura 5-20: Recarga por zonas (Ligua-Petorca).**

#### **e. Río**

El río está compuesto por 1906 celdas con diferentes conductancias, distribuidas como se muestra en la Figura 5-21.



**Figura 5-21: Conductancia en el río.**

#### **f. Borde impermeable**

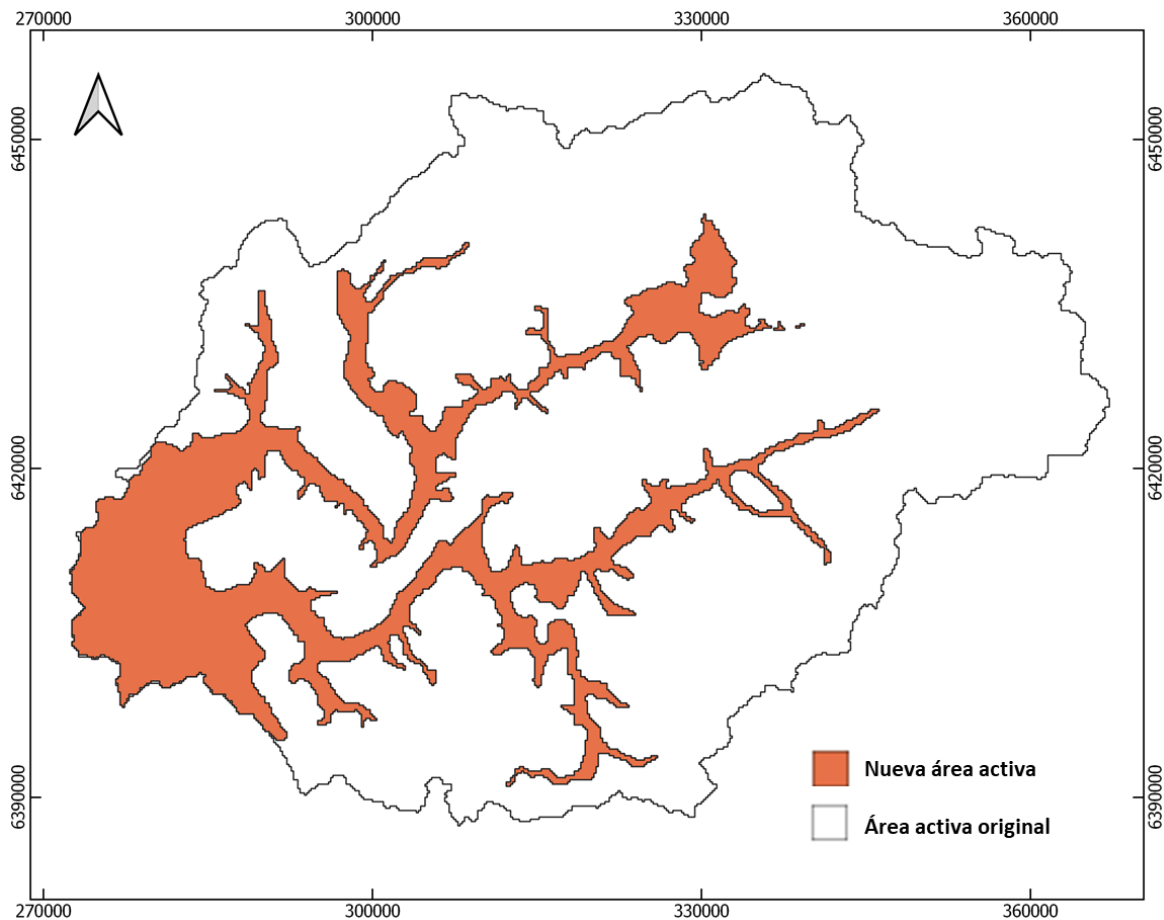
El borde impermeable en el modelo original se fijó en todas las celdas que se encuentran fuera del acuífero y que se observan en negro en la Figura 5-22, obtenida del modelo en GV.





**Figura 5-22: Borde impermeable original Ligua-Petorca.**

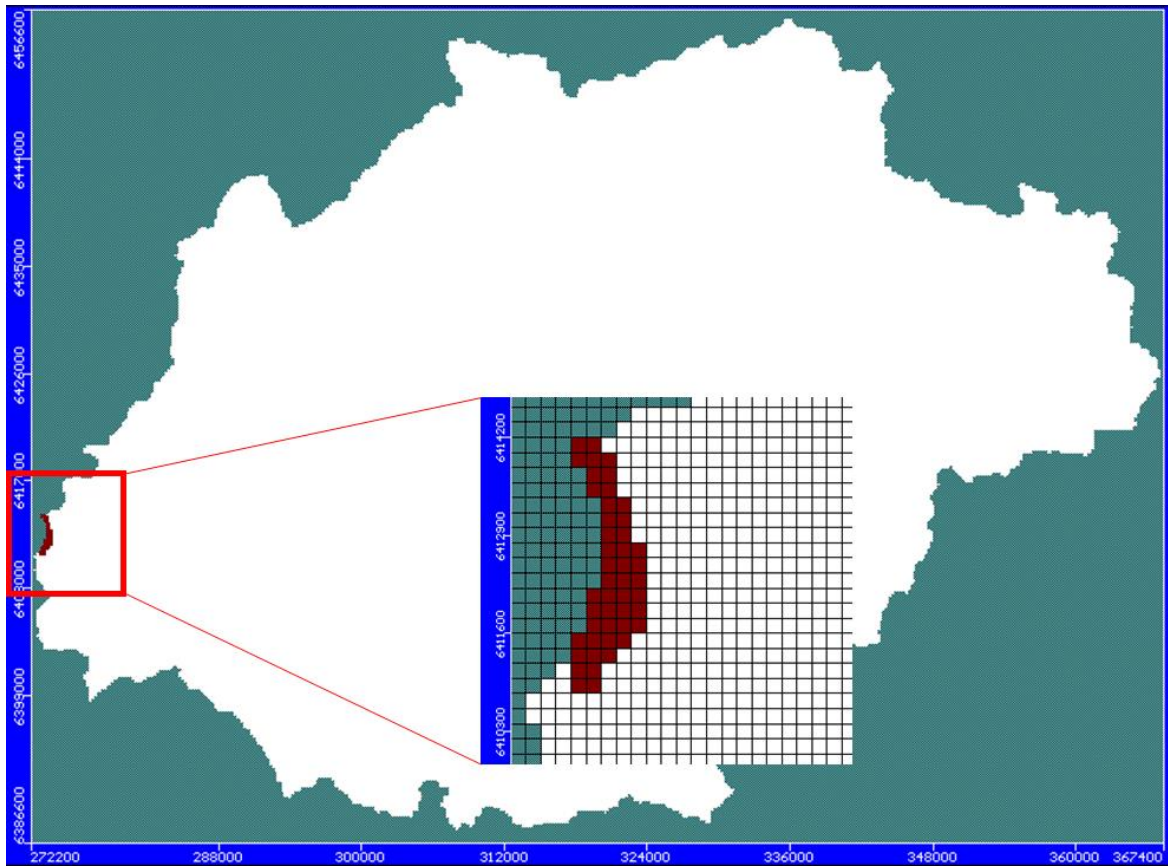
En la presente consultoría se tomó la decisión de restringir el área activa del modelo Visual MODFLOW proveniente del estudio DGA-AC (2014). Se dejó activa el área que contiene depósitos fluviales con mayor proporción (Figura 5-23), definido según la conductividad. Se dejaron las celdas con conductividad mayor o igual a  $7,5 \cdot 10^{-9}$  m/s, quedando un nuevo total de 18940 celdas activas.



**Figura 5-23: Área activa modificada MODFLOW Ligua-Petorca.**

#### **g. Carga constante**

La carga constante está definida en las celdas el sector de la desembocadura del río La Ligua y Petorca al mar, según muestra la Figura 5-24. La altura constante se fijó en 0 m.s.n.m.

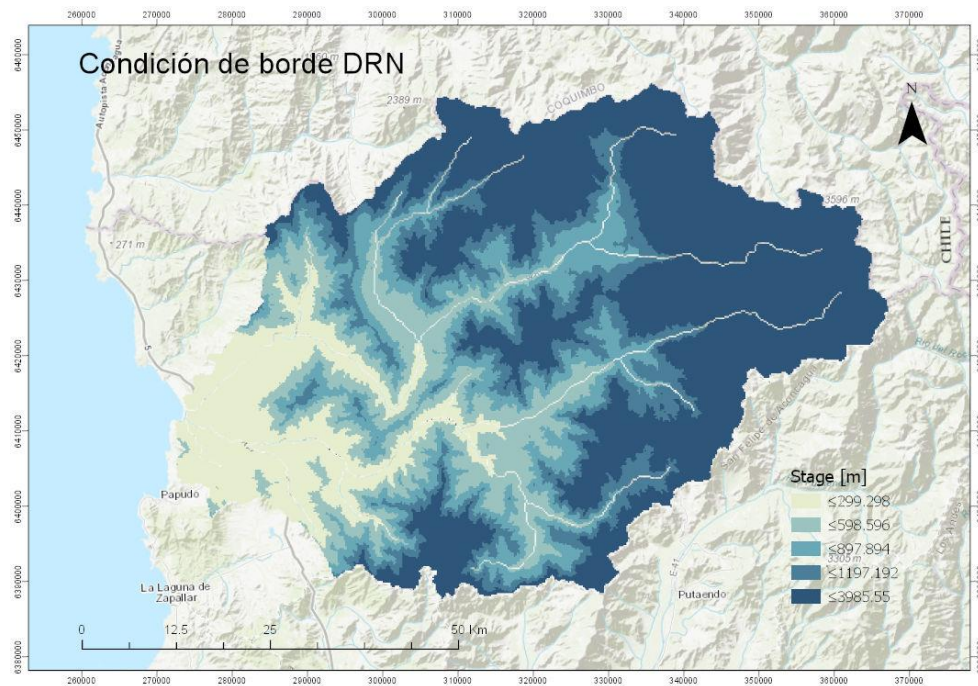


**Figura 5-24: Carga constante modelo Ligua-Petorca.**

#### **h. Drenes**

Se definieron como celdas de dren a todas aquellas que no forman parte de la condición de río ni de carga constante. A todas las celdas se les puso el mismo valor de conductancia, igual a  $50 \text{ m}^2/d$ , mientras que la cota del dren se fijó entre 0,5 m y 1,8 m bajo la elevación del terreno.



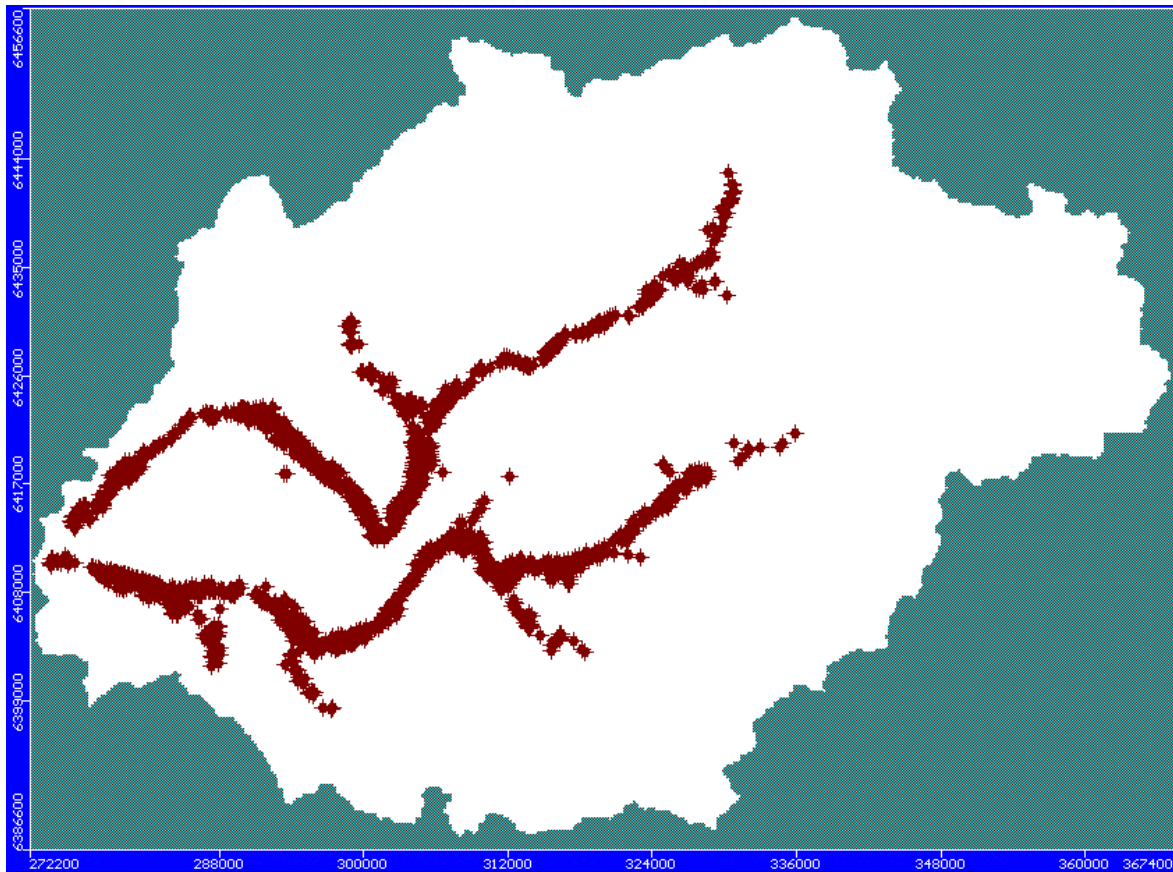


**Figura 5-25: Condición de borde de dren según el Stage definido en cada celda (Ligua-Petorca).**

En la presente consultoría, para una mejor representación del balance hídrico de la cuenca, se tomó la decisión de eliminar la condición de dren a las celdas activas del modelo subterráneo.

#### **i. Pozos**

El modelo El modelo incluye 2186 pozos de bombeo distribuidos en el sector acuífero con mayor conductividad, cercano al río, donde hay más depósitos fluviales. La Figura 5-26 muestra su distribución espacial.



**Figura 5-26: Pozos de bombeo en el modelo Ligua-Petorca.**

## **5.4. Cuenca Choapa**

### **5.4.1. Modelo Subterráneo**

En este capítulo se presentan las principales componentes y consideraciones del modelo hidrogeológico desarrollado el año 2012 por AC Ingenieros Consultores LTDA para la DGA en el estudio “Investigación Recarga Artificial de Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo”. El objetivo principal del estudio fue la identificación de zonas de infiltración relevantes de los acuíferos de las cuencas del Choapa y Quilimarí para la implementación de obras de recarga artificial en el cauce principal o en otros sectores según lo identificado. Para el cumplimiento de los objetivos se desarrolló un modelo hidrogeológico de flujo que permite representar el flujo subterráneo del sistema acuífero de la cuenca del río Choapa.

La plataforma usada por AC Ingenieros Consultores para desarrollar el modelo subterráneo fue Visual Modflow. En la presente consultoría se migró de esta plataforma a Groundwater Vistas con el fin de facilitar el acople de este modelo hidrogeológico con el modelo hidrológico de gestión WEAP existente en la cuenca del Choapa.

#### 5.4.1.1. Estructura General del Modelo

Las propiedades de la Grilla se muestran en la Tabla 5-7.

**Tabla 5-7: Propiedades de la grilla MODFLOW Choapa.**

Propiedad	Valor
Filas	295
Columnas	485
Layers	1
Periodos de Estrés	1
Total de celdas	143560
Celdas Activas	6321
Coordenadas UTM de origen del modelo (inferior izquierdo)	X: 255000 Y: 6457000

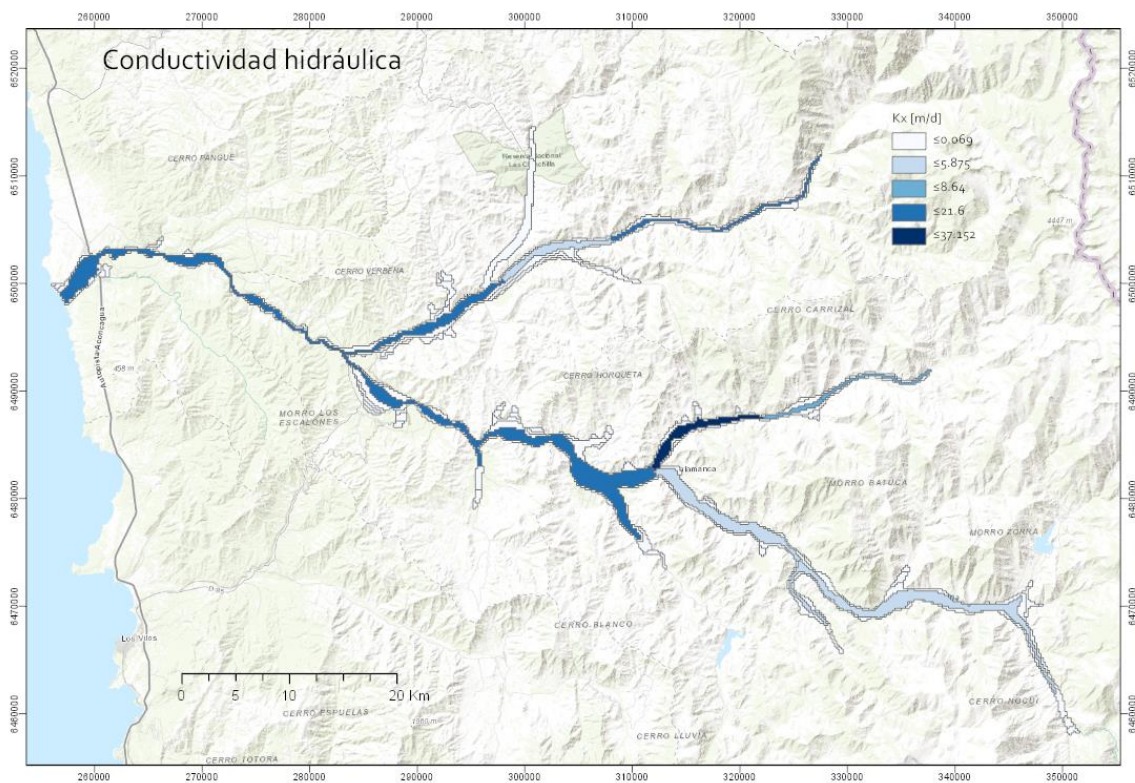
Fuente: Elaboración propia

El motor de resolución usado por el modelo es MODFLOW 2005. La unidad temporal es de días y espacial en metros.

El régimen de simulación es de tipo permanente y el solver usado para resolver es SIP.

#### 5.4.1.2. Propiedades Hidráulicas

Existen 15 zonas de conductividad hidráulica, como se observa en la Figura 5-27.



**Figura 5-27: Conductividad Hidráulica modelo Visual Modflow Choapa.**

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-8 se observa el detalle de la conductividad mostrada en la figura anterior. A partir de los valores presentados, se puede ver que el acuífero se considera isotrópico.

**Tabla 5-8: Valores de conductividad hidráulica impuestas en modelo Choapa.**

Zona	Kx		Ky		Kz	
	[m/d]	[m/s]	[m/d]	[m/s]	[m/d]	[m/s]
1	0,0001	1 E-09	0,0001	1 E-09	0,0001	1 E-09
2	0,0004	5 E-09	0,0004	5 E-09	0,0004	5 E-09
3	0,0007	8 E-09	0,0007	8 E-09	0,0007	8 E-09
4	0,0069	8,0 E-08	0,0069	8,0 E-08	0,0069	8,0 E-08
5	0,0691	8,0 E-07	0,0691	8,0 E-07	0,0691	8,0 E-07
6	3,46	4,0 E-05	3,46	4,0 E-05	3,46	4,0 E-05
7	4,75	5,5 E-05	4,75	5,5 E-05	4,75	5,5 E-05
8	5,88	6,8 E-05	5,88	6,8 E-05	5,88	6,8 E-05
9	6,91	8,0 E-05	6,91	8,0 E-05	6,91	8,0 E-05
10	8,64	1,0 E-04	8,64	1,0 E-04	8,64	1,0 E-04



Zona	Kx		Ky		Kz	
	[m/d]	[m/s]	[m/d]	[m/s]	[m/d]	[m/s]
11	13,82	1,6 E-04	13,82	1,6 E-04	13,82	1,6 E-04
12	14,69	1,7 E-04	14,69	1,7 E-04	14,69	1,7 E-04
13	19,01	2,2 E-04	19,01	2,2 E-04	19,01	2,2 E-04
14	21,6	2,5 E-04	21,6	2,5 E-04	21,6	2,5 E-04
15	37,15	4,3E-04	37,15	4,3E-04	37,15	4,3E-04

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.1.3. Condiciones de borde

Las condiciones de borde impuestas en el modelo hidrogeológico de la cuenca del río Choapa son las siguientes:

##### Recarga

Se impuso en formato matricial. La Figura 5-28 muestra la distribución espacial de la recarga en la zona activa del modelo.

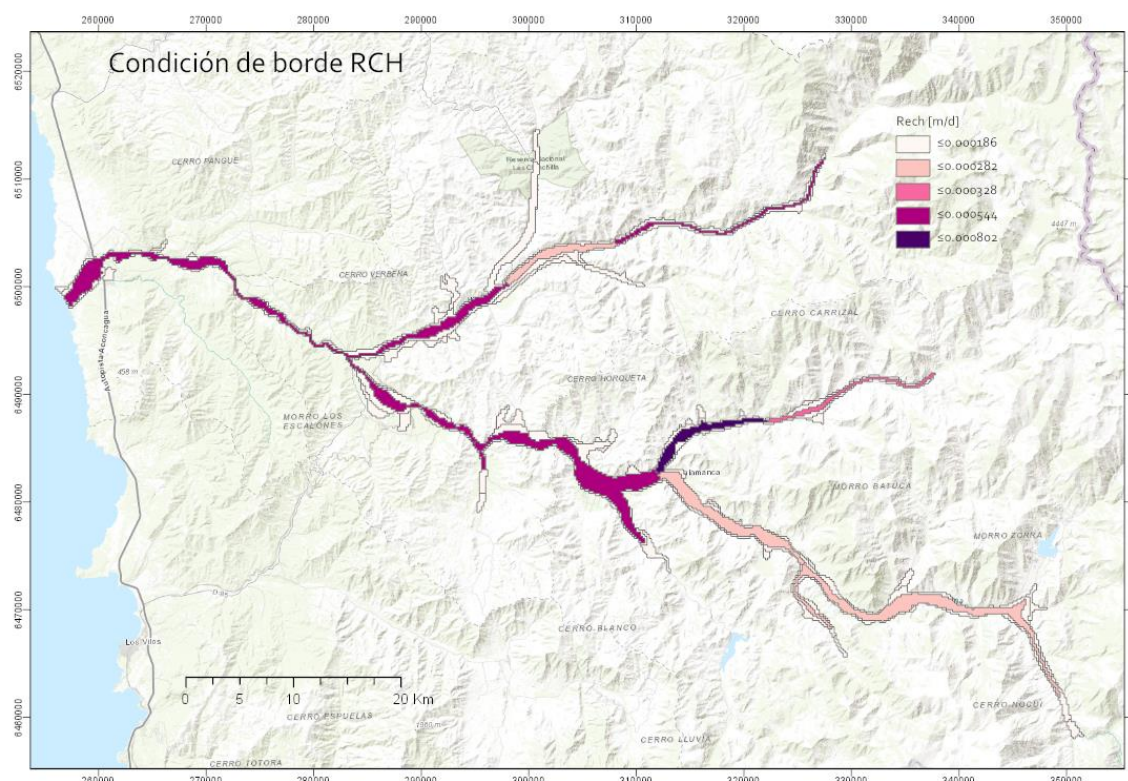


Figura 5-28: Recarga impuesta por zonas.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-9 se detallan las tasas de recargas ingresadas por zona al modelo.



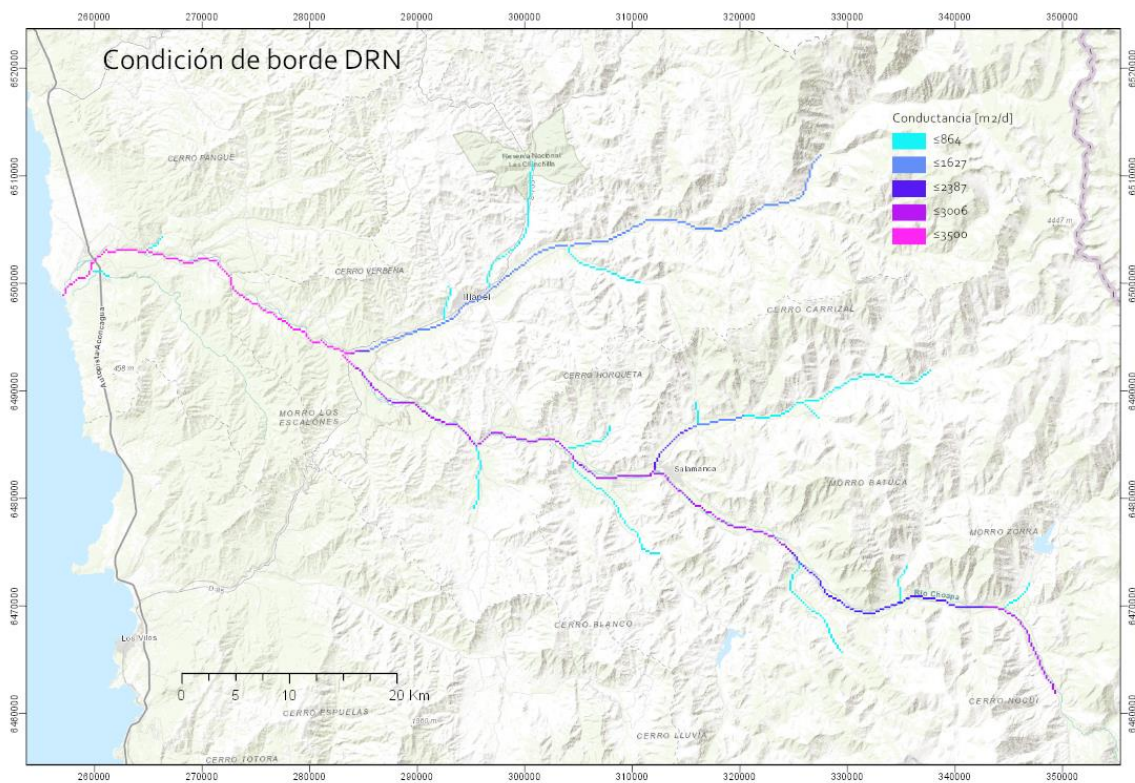
**Tabla 5-9: Tasas de recarga impuestas por zonas.**

<b>Zona</b>	<b>Recarga (mm/año)</b>	<b>Recarga (m/día)</b>
1	67,399	1,847 E-04
2	67,401	1,847 E-04
3	67,403	1,847 E-04
4	67,44	1,848 E-04
5	67,818	1,858 E-04
6	88,369	2,421 E-04
7	92,233	2,527 E-04
8	103,049	2,823 E-04
9	109,34	2,996 E-04
10	119,825	3,283 E-04
11	151,282	4,145 E-04
12	156,524	4,288 E-04
13	182,738	5,007 E-04
14	198,466	5,437 E-04
15	292,834	8,023 E-04

Fuente: Elaboración propia

### **Ríos**

El río está compuesto por 1196 celdas y tiene 1 m de profundidad (entre Stage y Bottom). Se extiende a lo largo de todo el acuífero modelado. De las 1196 celdas que lo componen, 9 de ellas tienen una profundidad distinta a 1, cuyo valor corresponde a 0.5 m. La profundidad a la que se encuentra el río (i.e. la diferencia entre el stage del río y el Top del modelo) es diferente para las celdas que lo componen y varía entre 0.43 m y 24.76 m sin un orden particular. La Figura 5-29 presenta valores de conductancia a lo largo del río.

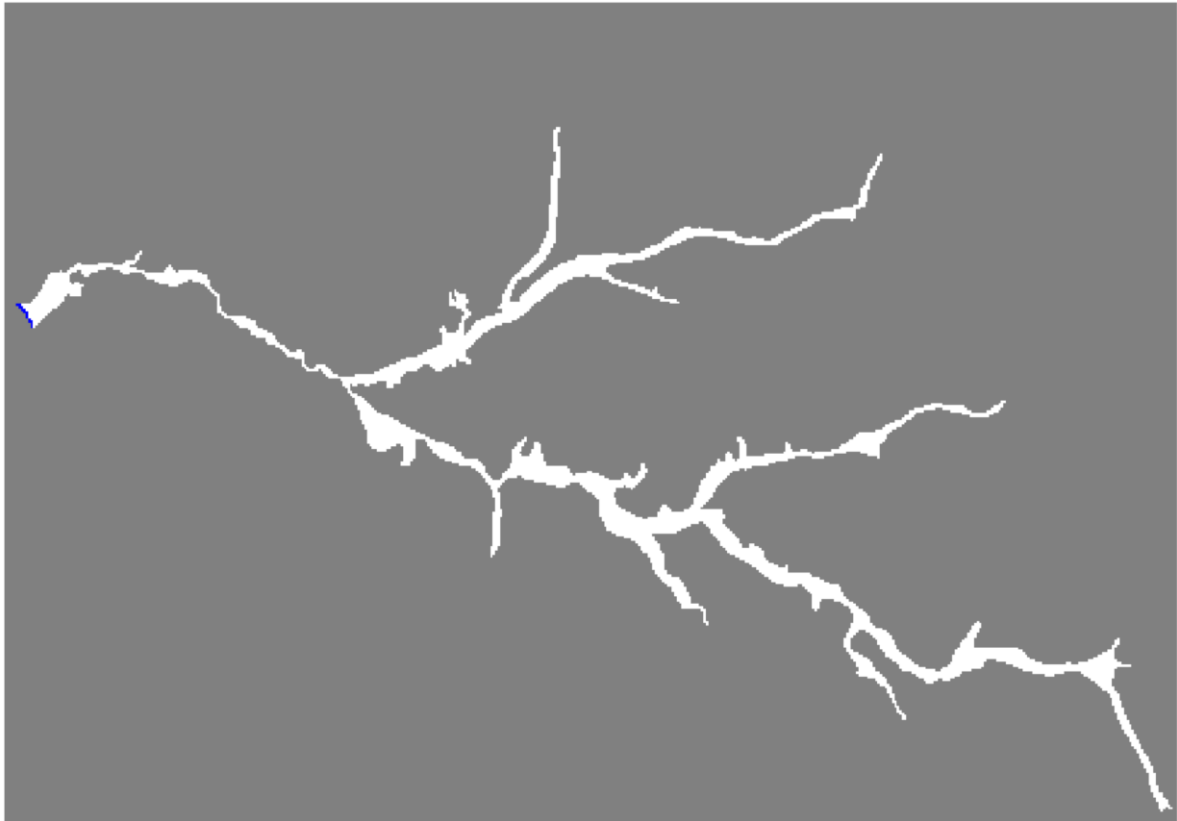


**Figura 5-29: Conductancia en el río del modelo subterráneo del Choapa.**

Fuente: Elaboración propia

### Borde impermeable

El borde impermeable en el modelo se fijó en todas las celdas que se encuentran fuera del acuífero y que se observan en gris en la Figura 5-30, obtenida del modelo en Groundwater Vistas.

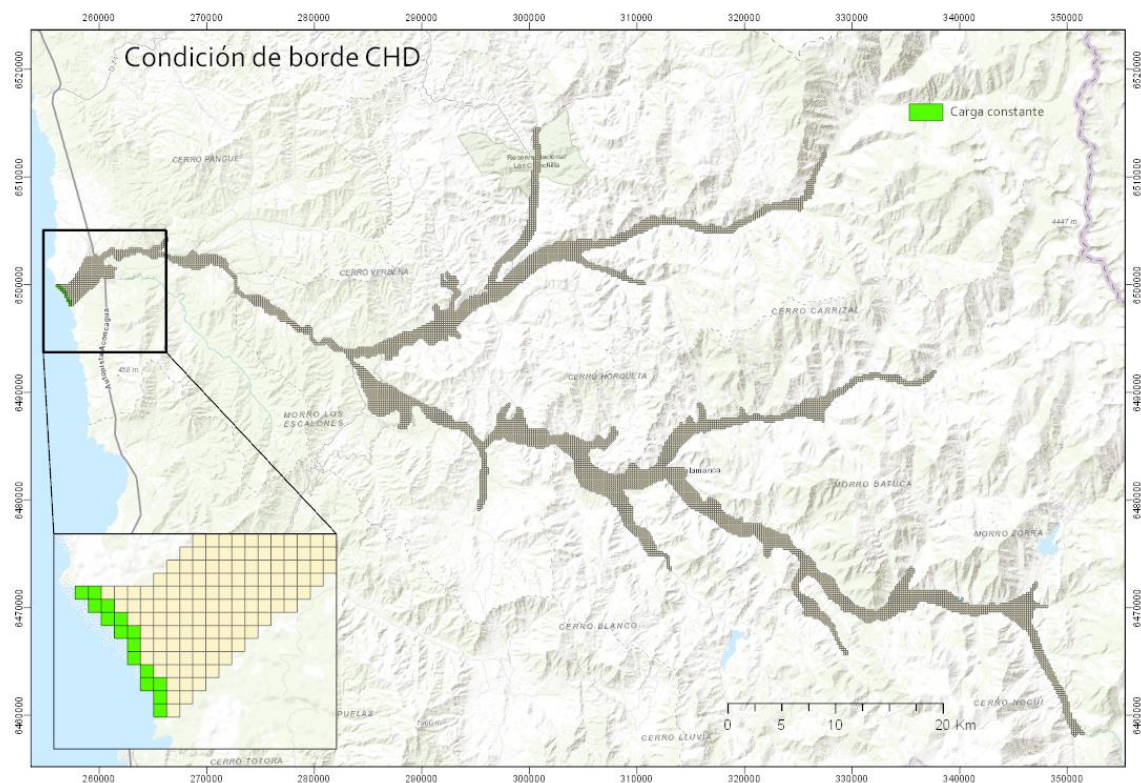


**Figura 5-30: Borde impermeable del modelo subterráneo del Choapa.**

Fuente: Elaboración propia.

#### **Carga constante**

La carga constante se fijó en 0 m para representar el nivel del mar (Figura 5-31).



**Figura 5-31: Carga constante del modelo subterráneo del Choapa.**

Fuente: Elaboración propia

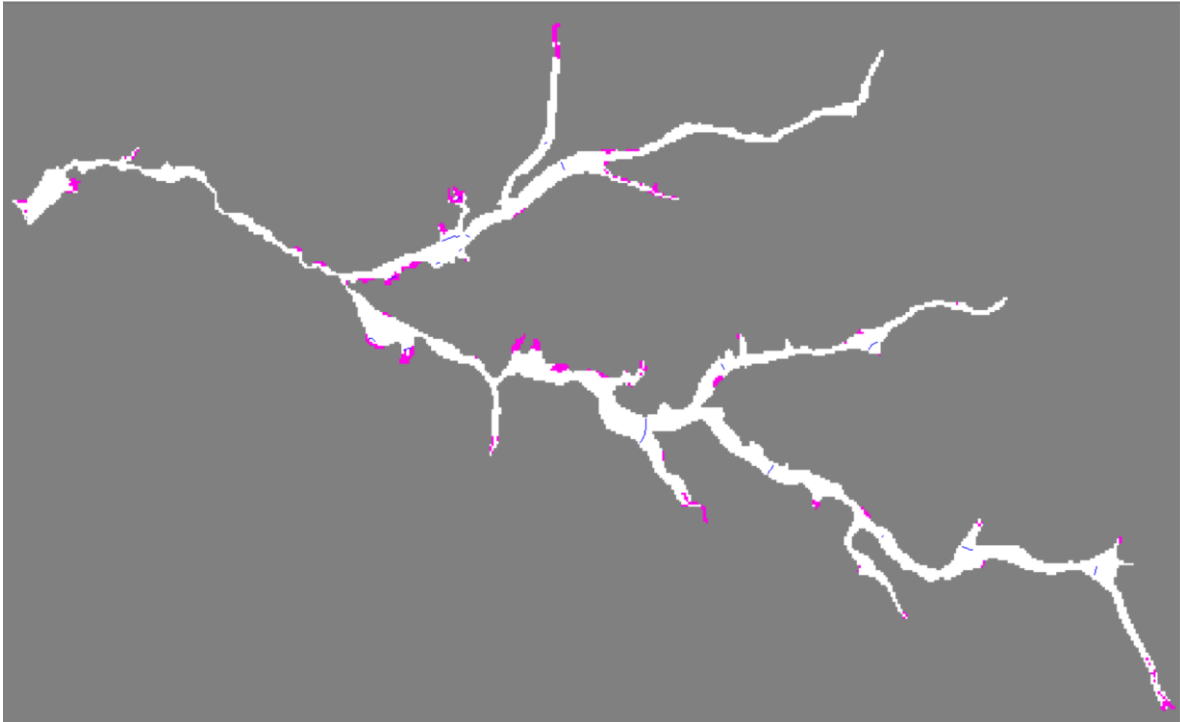
### Drenes

Se definieron como celdas de dren a todas aquellas que no forman parte de la condición de río. A todas las celdas se les puso el mismo valor de conductancia de 50 m/d. El stage usado corresponde al Top del modelo. La Figura 5-32 muestra la distribución de las celdas dren.









**Figura 5-33: Drenes activos en el modelo subterráneo del Choapa.**

Fuente: Elaboración propia

Al correr el modelo migrado a Groundwater Vistas se obtienen diferencias menores en el balance de masa en comparación con el modelo recibido en la plataforma Visual Modflow. Estas se detallan en la Tabla 5-10.

**Tabla 5-10: Balances de masa en ambos modelos**

Modelo VM		Modelo GV	
IN [m3/d]		IN [m3/d]	
Carga Constante	0	Carga Constante	0
Drenes	0	Drenes	0
Río	551215.6875	Río	551215.938
Recarga	76110.2266	Recarga	76110.2266
Total IN	627325.9141	Total IN	627326.164
OUT [m3/d]		OUT [m3/d]	
Carga Constante	2581.6519	Carga Constante	2581.652
Drenes	3436.3826	Drenes	3436.41
Río	621301.375	Río	621302.063
Recarga	0	Recarga	0
Total OUT	627319.4095	Total OUT	627320.125
IN-OUT	6.5046	IN-OUT	6.0391
% discrepancia	1.04E-05	% discrepancia	9.63E-06

Fuente: Elaboración propia

## 6. Resumen de archivos nativos generados

La Tabla 6-1 muestra el listado de archivos nativos MODFLOW generados para cada cuenca. El anexo digital incluye estos archivos finales.

**Tabla 6-1: Archivos nativos generados para cada modelo.**

Cuenca/Modelo	Archivos nativos
Copiapó	Copiapo_corto_corregido.bas Copiapo_corto_corregido.cbc Copiapo_corto_corregido.chd Copiapo_corto_corregido.dis Copiapo_corto_corregido.drn Copiapo_corto_corregido.fdn Copiapo_corto_corregido.fhd Copiapo_corto_corregido.gsf Copiapo_corto_corregido.ini Copiapo_corto_corregido.lpf Copiapo_corto_corregido.lst Copiapo_corto_corregido.nam

Cuenca/Modelo	Archivos nativos
	Copiapo_corto_corregido.nam.archive Copiapo_corto_corregido.oc Copiapo_corto_corregido.pcg Copiapo_corto_corregido.rch Copiapo_corto_corregido.wel
Choapa	Choapa_corregido_transiente4.xml Choapa_corregido_transiente4.bak Choapa_corregido_transiente4.bas Choapa_corregido_transiente4.bcf Choapa_corregido_transiente4.cbc Choapa_corregido_transiente4.chd Choapa_corregido_transiente4.dis Choapa_corregido_transiente4.drn Choapa_corregido_transiente4.fdn Choapa_corregido_transiente4.fhd Choapa_corregido_transiente4.gsf Choapa_corregido_transiente4.ini Choapa_corregido_transiente4.lst Choapa_corregido_transiente4.nam Choapa_corregido_transiente4.oc Choapa_corregido_transiente4.pcg Choapa_corregido_transiente4.rch Choapa_corregido_transiente4.riv pozo_ficticio.wel
Limarí	Limari_mm_3sp.xml Limari_mm_3sp.bas Limari_mm_3sp.bcf Limari_mm_3sp.cbc Limari_mm_3sp.chd Limari_mm_3sp.dis Limari_mm_3sp.drn Limari_mm_3sp.fdn Limari_mm_3sp.fhd Limari_mm_3sp.gsf Limari_mm_3sp.ini Limari_mm_3sp.lst Limari_mm_3sp.mmZLib.tmp Limari_mm_3sp.nam Limari_mm_3sp.nam.archive Limari_mm_3sp.oc Limari_mm_3sp.pcg

Cuenca/Modelo	Archivos nativos
Ligua-Petorca	Ligua_Petorca_model_muse_v2.axml Ligua_Petorca_model_muse_v2.bas Ligua_Petorca_model_muse_v2.cbc Ligua_Petorca_model_muse_v2.chd Ligua_Petorca_model_muse_v2.dis Ligua_Petorca_model_muse_v2.fdn Ligua_Petorca_model_muse_v2.fhd Ligua_Petorca_model_muse_v2.gsf Ligua_Petorca_model_muse_v2.ini Ligua_Petorca_model_muse_v2.lpf Ligua_Petorca_model_muse_v2.lst Ligua_Petorca_model_muse_v2.nam Ligua_Petorca_model_muse_v2.nam.archive Ligua_Petorca_model_muse_v2.oc Ligua_Petorca_model_muse_v2.pcg Ligua_Petorca_model_muse_v2.rch Ligua_Petorca_model_muse_v2.riv

En los archivos nativos de la cuenca del río Choapa se incorporó un archivo del paquete de pozos “pozo\_ficticio\_wel”. Este cumple una función práctica para la manipulación de resultados de la vinculación WEAP-MODFLOW. Si se considera necesario, se puede omitir este paquete sin afectar la modelación.

## Bibliografía

Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A., and Galbraith, H., (2005a). "WEAP21-A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 2: Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation." *Water Int.* 30(4), 501-512, 10.1080/0250806508691894.

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., and Huber-Lee, A. (2005b). "WEAP21-A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 1: Model Characteristics." *Water Int.*, 30(4), 487-500, 10.1080/02508060508691893. a tool for integrated flood management, associated programme on flood management. Technical report.