



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

# **MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA CUENCA ESTERO LOS PUERCOS, REGIÓN DEL MAULE**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR:  
GCF Ingenieros  
S.I.T. N° 319**

**Santiago, Noviembre 2013**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Sra. Loreto Silva

Director General de Aguas  
Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe de División de Estudios y Planificación  
Sr. Adrián Lillo

Inspector Fiscal  
Sr. Juan Carlos Salgado

### GCF INGENIEROS

Jefe de Proyecto  
Ingeniero Civil Guillermo Cabrera

#### Profesionales:

Ingeniero Civil Lem Mimica  
Ingeniero Civil Iván Rivera  
Ingeniero Civil Sergio Matus  
Ingeniero Civil Juan Pablo Ulloa  
Constructor Civil Genaro Cárcamo  
Cartógrafo Salomón Vielma  
Topógrafo Luis Duque  
Topógrafo Antonio Duque  
Hidromensor Farid Muza

## Índice

I	Generalidades.....	1
II	Recopilación de antecedentes.....	3
II.1	Referencias bibliográficas .....	3
II.2	Pruebas de bombeo .....	3
II.3	Red canal Pencahue.....	3
III	Hidrología .....	5
III.1	Red de drenaje .....	5
III.2	Precipitaciones.....	5
III.3	Fluviometría .....	7
III.4	Curvas de Variación Estacional de Caudales Medios Mensuales.....	7
III.5	Aforos .....	8
IV	Calidad físico-química del agua.....	9
IV.1	Aguas superficiales .....	9
IV.2	Aguas subterráneas .....	9
V	Hidrogeología .....	13
V.1	Geofísica.....	13
V.2	Catastro de captaciones subterráneas .....	13
V.3	Geología .....	14
V.4	Geometría acuífera .....	14
V.5	Propiedades físicas de los acuíferos.....	18
V.6	Niveles de agua subterránea .....	18
V.7	Flujos subterráneos .....	18
VI	Demandas hídricas .....	24
VI.1	Demandas de riego por subcuenca.....	24
VI.2	Uso actual de las aguas subterráneas.....	26
VII	Modelos .....	28
VII.1	Modelo conceptual del sistema acuífero .....	28
VII.2	Modelo de recargas .....	30
VII.2.1	Modelo de distribución de precipitaciones ( <i>MDEP</i> ) .....	31
VII.2.2	Recarga potencial por riego .....	31
VII.2.3	Caudales en cauces naturales.....	31
VII.2.4	Sistema de riego .....	32
VII.3	Modelo de flujo subterráneo (MFS).....	32
VII.4	Recarga superficial .....	35
VII.4.1	Recarga por precipitaciones .....	35

---

VII.4.2	Recarga por riego.....	35
VII.4.3	Zonas de recarga en MFS .....	36
VII.5	Calibración en régimen permanente .....	37
VII.6	Calibración en régimen impermanente.....	37
VII.7	Operación de MFS .....	38
VII.7.1	Escenario 1: Base.....	39
VII.7.2	Escenario 2: Uso actual prolongado.....	40
VII.7.3	Escenario 3: Demanda futura.....	40
VII.7.4	Escenario 4: Derechos constituidos .....	41
VII.7.5	Escenario 5: Derechos constituidos + pendientes .....	41
VII.8	Resultados de los escenarios simulados .....	41
VIII	Conclusiones y recomendaciones .....	44

## **I Generalidades**

En este resumen ejecutivo se describen las actividades realizadas durante el desarrollo del estudio "Modelación hidrogeológica cuenca estero Los Puercos, Región del Maule", el cual incluyó hidrología, geología, hidrogeología y modelación del sistema hídrico.

Entre los modelos elaborados se cuentan el modelo conceptual, el modelo para la cuantificación de las recargas y el modelo de flujo subterráneo.

En la Figura I-1 se muestra la zona de estudio, que incluye íntegramente la cuenca del estero Los Puercos y las riberas norte de los ríos Maule y Claro. Estas últimas, se incluyeron como áreas de interés, porque los ríos Maule y Claro constituyen condiciones de borde adecuadas para el modelo de flujo subterráneo.

Se identificaron las unidades acuíferas y fueron delimitadas tridimensionalmente. Se estimaron sus propiedades físicas (permeabilidades y transmisibilidades) y sus capacidades de conducción (flujos pasantes).

Se elaboraron figuras con curvas equipotenciales, para visualizar la variación de los niveles piezométricos en el área de interés.

La información base usada en la caracterización hidrogeológica incluye antecedentes de estudios anteriores, información obtenida de expedientes de solicitudes de derechos de agua subterránea, los datos obtenidos en el catastro de captaciones subterráneas<sup>1</sup> y los resultados de la exploración gravimétrica<sup>2</sup>.

Con el conocimiento adquirido en el desarrollo de las actividades mencionadas, se logró entender el funcionamiento del sistema acuífero para elaborar el modelo conceptual.

Se estudió la red de drenaje y riego superficial, se identificaron las zonas cultivadas y se rellenaron los caudales en las estaciones fluviométricas del área. Integrando esa información, se elaboró un modelo para la cuantificación de las recargas al sistema acuífero, por riego, precipitaciones y desde los cauces superficiales.

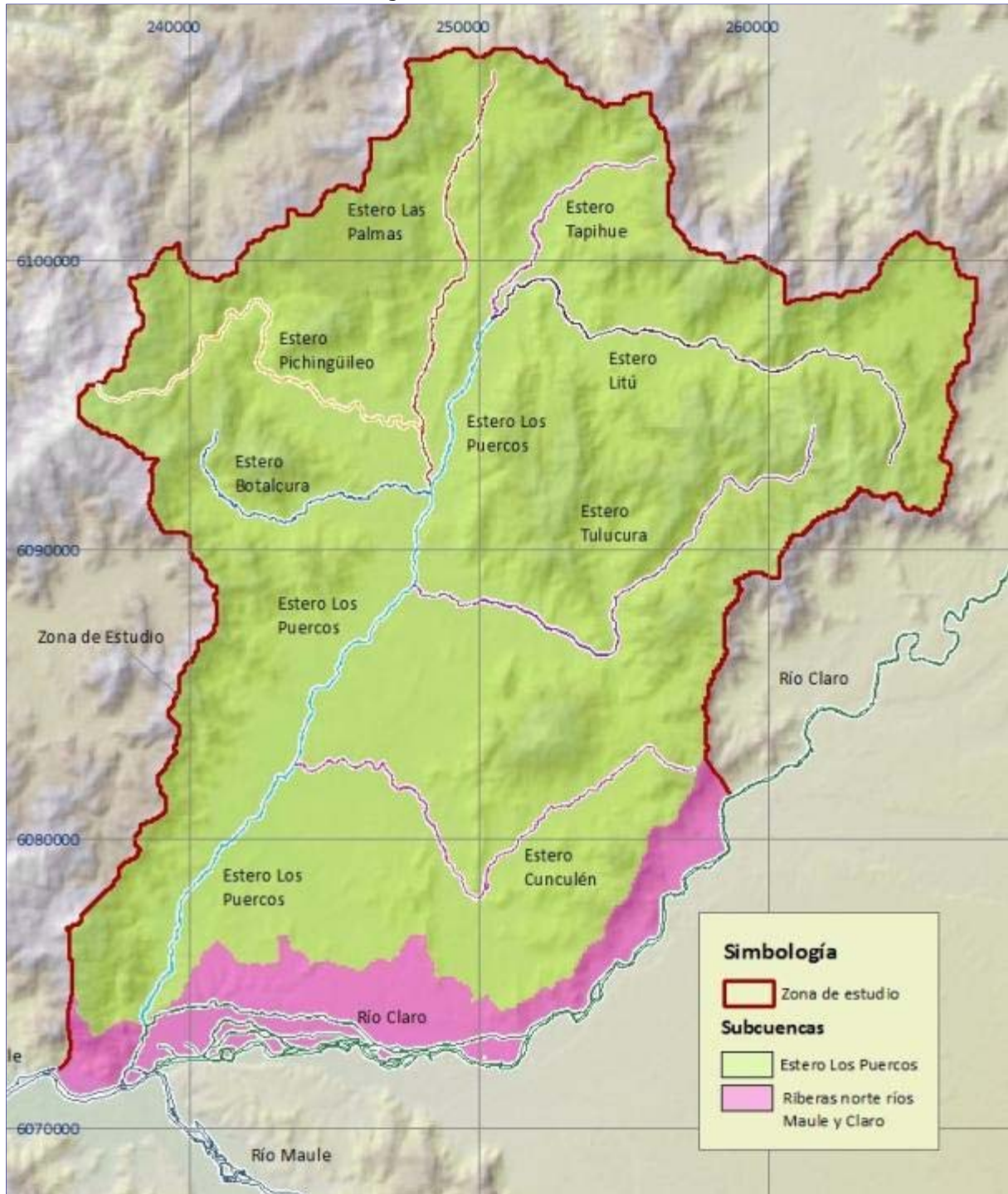
Con el fin de analizar el funcionamiento del sistema subterráneo para 5 casos diferentes, se operó el modelo de flujo subterráneo ante distintas condiciones de extracción.

---

<sup>1</sup> Realizado por GCF en julio de 2013.

<sup>2</sup> Efectuado por Geodatos en julio de 2013.

Figura I-1. Zona de estudio



Datum: WGS84 huso 19S

## **II Recopilación de antecedentes**

### **II.1 Referencias bibliográficas**

Se recopilaron los siguientes estudios de utilidad para el trabajo:

- 1) Estudio hidrogeológico del secano interior y costero. Regiones VI, VII Y VIII. INDAP-IICA - GCF Ingenieros, 2002.
- 2) Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Cauquenes. DARH DGA, 2011.
- 3) Modelación Hidrológica de Cuencas Pluviales, Hoya Hidrográfica del Río Maule. Depto. de Estudios y Planificación DGA y U. de Chile, 2005.

En todos ellos se desarrolló análisis hidrológicos para definir series de precipitaciones mensuales y de caudales medios mensuales que permitieron caracterizar las cuencas, entre otras la del estero Los Puercos.

Adicionalmente en estos trabajos se realizaron estudios de geología regional y local, junto con estudios hidrogeológicos en los que se evaluó parámetros como permeabilidad y transmisibilidad, además de catastros de captaciones de aguas subterráneas (situación legal, ubicación y usos), basados en antecedentes anteriores y verificación en terreno en algunos sectores. De igual modo, al menos en dos de estos trabajos se realizaron exploraciones geofísicas.

En el primero de los trabajos mencionados se efectuó un estudio de suelos, basado en antecedentes de Ciren-Corfo, CNR, DOH, etc. Además, se hizo un estudio agroclimático de la Región del Maule.

### **II.2 Pruebas de bombeo**

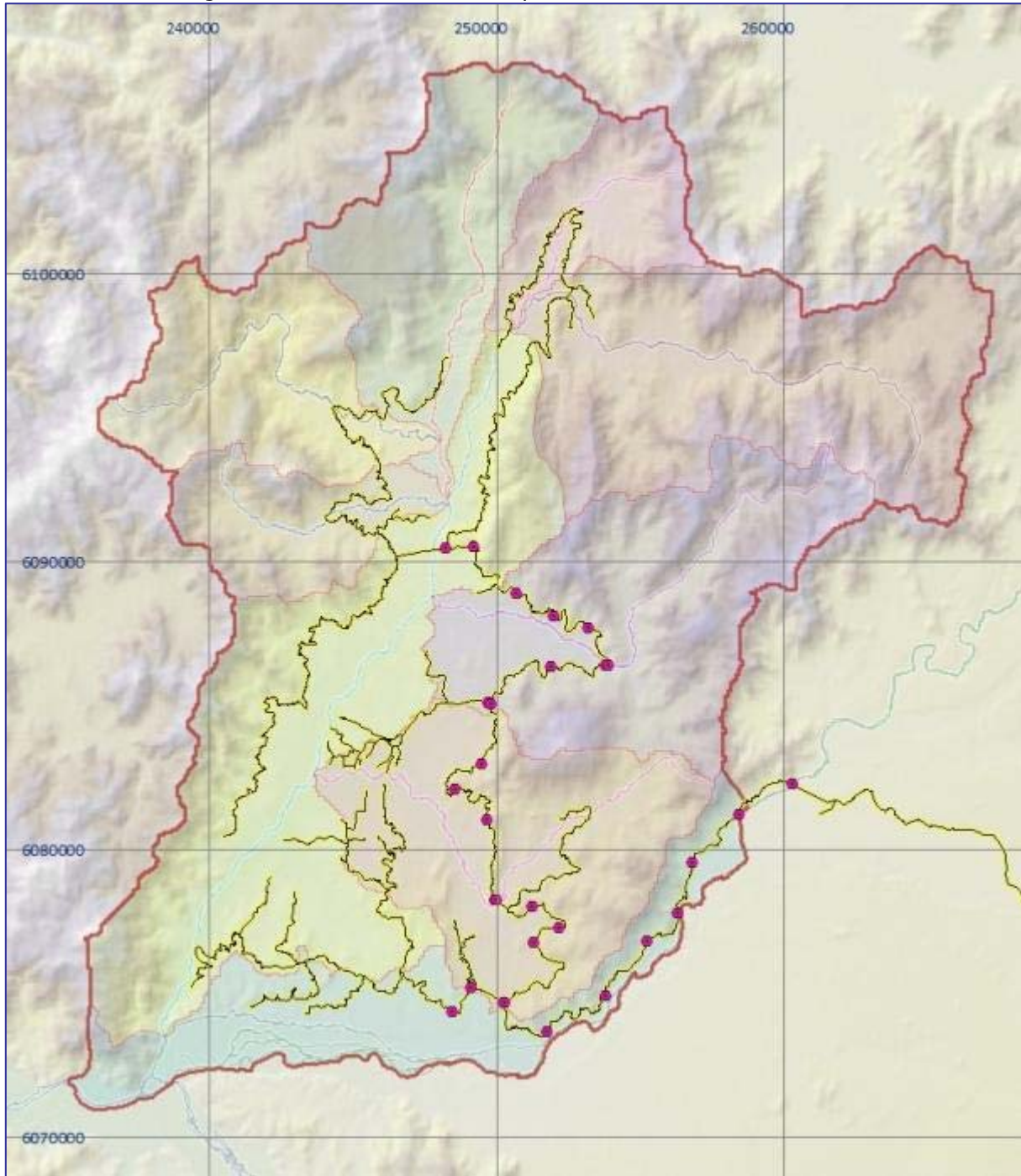
Se recopilaron y analizaron los planos de construcción de pozos, datos de pruebas de bombeo de gasto variable y de gasto constante. La información fue obtenida de expedientes, estudios anteriores y bases de información de este consultor.

### **II.3 Red canal Pencahue**

El canal Pencahue es la principal fuente de recursos de agua para riego en la cuenca del estero los Puercos. Los recursos hídricos provienen de un trasvase desde el río Lircay.

En julio de 2013 se realizó un recorrido por el canal Pencahue, en el que se registraron las principales características de las secciones y sus coordenadas UTM. En la Figura II-1 se puede apreciar el trazado de la red de canales y las secciones medidas. El trazado del canal se dibujó manualmente observando las imágenes satelitales de Google Earth.

Figura II-1. Red canal Pencahue y secciones medidas en terreno



Datum: WGS84 huso 19S



### III Hidrología

#### III.1 Red de drenaje

De norte a sur, existen 7 subcuencas principales afluentes al estero los Puercos: Estero Las Palmas, Estero Tapihue, Estero Litú, Estero Pichingüileo, Estero Botalcura, Estero Tulucura y Estero Cunculén. Dentro del área de interés se incluyó además, las riberas norte de los ríos Maule y Claro (ver Figura III-1), dado que éstos constituirán condiciones de borde del modelo de flujo subterráneo.

#### III.2 Precipitaciones

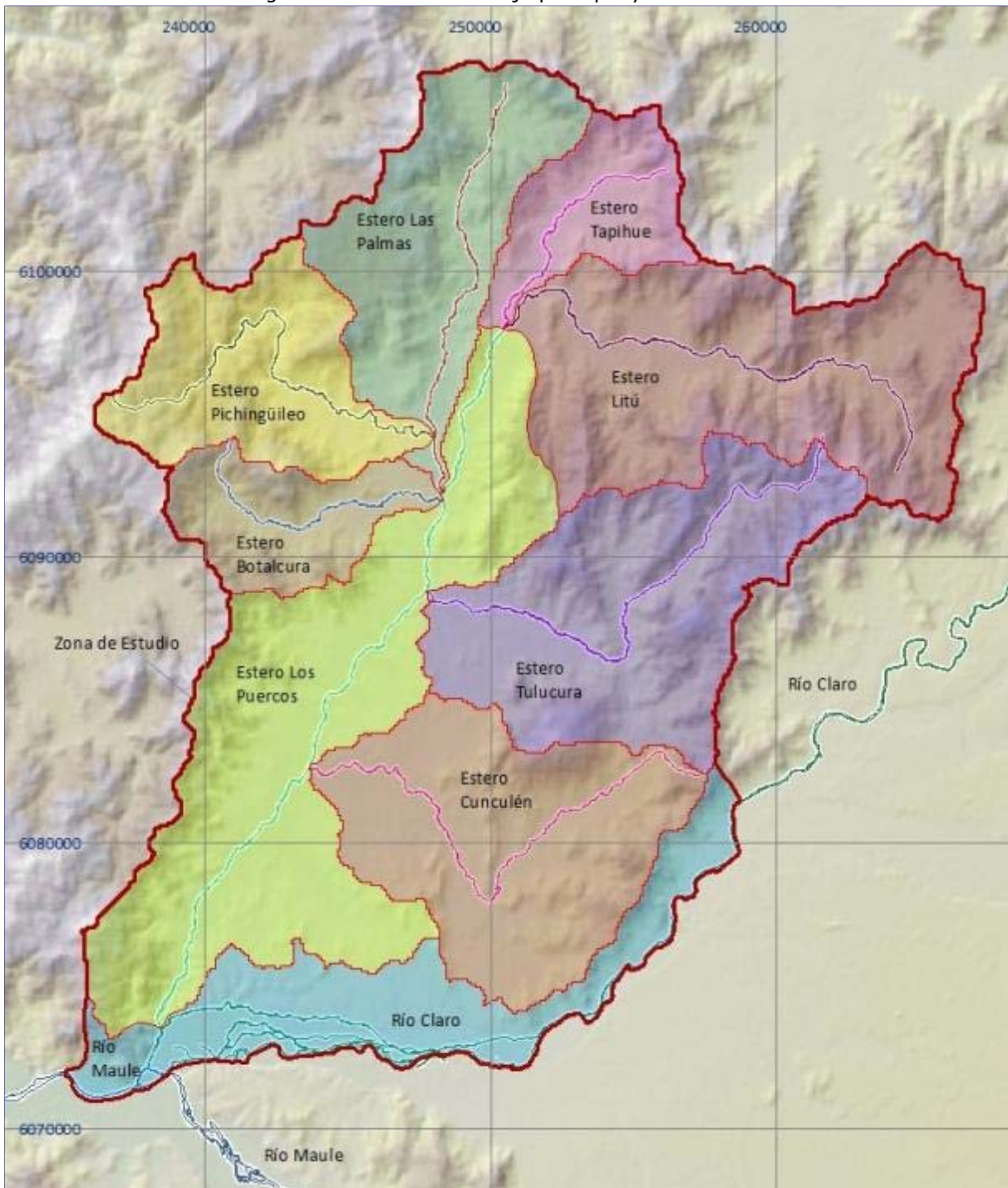
Las estaciones meteorológicas de la DGA en el entorno al área de estudio son 30. Se identificaron 21 estaciones para ser usadas en este trabajo. En la Tabla III-1 se presentan las estaciones seleccionadas y los períodos cubiertos por cada una. Las estaciones fueron seleccionadas para el modelo de relleno según un criterio geográfico, procurando cubrir todo el entorno del área de interés. Se adoptó una envolvente de 50 km desde el límite de la zona de estudio.

Tabla III-1. Estaciones meteorológicas

Nº	Nombre de la estación	Coordenada UTM este [m]	Coordenada UTM sur [m]	Período cubierto	Región
1	[°] Constitución	190.187	6.085.616	1992-2013	VII
2	El Álamo	192.036	5.998.055	1994-2013	VII
3	[°] Gualleco	228.826	6.095.776	1961-2013	VII
4	[°] Huerta del Maule	233.293	6.049.544	1992-2013	VII
5	[°] La Estrella	211.949	6.035.425	1992-2013	VII
6	[°] Linares	265.580	6.030.839	1967-2013	VII
7	Los Huinganes en Curipeumo	234.651	6.018.432	1994-2013	VII
8	Mangarral	197.428	5.984.817	1992-2013	VII
9	[°] Melozal	248.358	6.037.495	1950-2013	VII
10	[°] Nirivilo	219.738	6.062.734	1956-2013	VII
11	Parral	245.623	5.990.920	1964-2013	VII
12	[°] Pencahue	242.660	6.081.900	1966-2013	VII
13	[°] Putú	200.969	6.098.191	1992-2013	VII
14	Quella	221.755	6.005.223	1961-2013	VII
15	[°] Río Claro en Rauquén	247.394	6.072.475	1999-2013	VII
16	[°] Río Maule en Forel	208.655	6.077.035	2001-2013	VII
17	[°] San Javier	259.056	6.057.345	1970-2013	VII
18	[°] Talca + Talca U.C.	260.178	6.077.061	1964-2013	VII
19	Tutuvén Embalse	195.507	6.022.189	1975-2013	VII
20	Coelemu	168.497	5.955.943	1961-2013	VIII
21	Millauquén	220.136	5.970.491	1992-2013	VIII
22	San Agustín de Puñual	178.557	5.963.642	1993-2013	VIII
23	[°] El Membrillo	259.305	6.144.993	1981-2013	VI
24	[°] La Candelaria	278.885	6.148.229	1974-2013	VI
25	Ñlahue Barahona	246.120	6.170.326	1969-2013	VI
26	[°] Ranguili	248.534	6.137.981	1981-2013	VI
27	[°] Talca	258.425	6.077.126	1964-1982	VII
28	[°] Talca U.C.	261.931	6.076.996	1982-2013	VII
29	[°] Curicó	295.678	6.126.392	1971-2013	VII
30	[°] La Palma	263.621	6.129.369	1981-2013	VII
31	[°] Villa Prat	261.721	6.113.018	1992-2013	VII

[°]: Estaciones seleccionadas para modelo de relleno de precipitaciones mensuales  
 Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura III-1. Red de drenaje principal y subcuencas



Nota: El relleno se ha destacado en cada subcuenca con color más intenso

Se elaboró un modelo estocástico multivariado, para el relleno de las series de precipitaciones mensuales de las 21 estaciones elegidas. El modelo permite rellenar los registros de una estación, en función de los datos medidos en las restantes. La influencia de los datos medidos en una estación sobre los valores generados en otra depende de la calidad de la correlación entre ambas. En los gráficos obtenidos se pudo observar que los

datos rellenados mantienen las tendencias de los tramos medidos en cuanto a distribución y meses sin precipitaciones.

### III.3 Fluviometría

Para el análisis hidrológico realizado en el presente trabajo se eligieron las siguientes 7 estaciones fluviométricas: estero Los Puercos en puente Los Puercos, río Cauquenes en El Arrayán, río Cauquenes en desembocadura, río Mataquito en Licantén, río Perquilauquén en Quella, río Purapel en Nirivilo y río Purapel en Sauzal. Se excluyeron las estaciones suspendidas que cuentan con períodos breves de registro, al igual que Maule en Forel por estar influida por la operación del embalse Colbún

La razón para considerar en el análisis las estaciones Mataquito en Licantén y otras que se ubican al sur de la cuenca del estero Los Puercos, se debió a que en la cuenca misma hay sólo una estación con registros prolongados y para disponer de una base de caudales regional en el entorno del área de interés. El modelo de rellenos estima los caudales en función de los caudales medidos en las otras estaciones, mientras que el peso de cierta estación en un caudal que haya sido rellenado depende de las correlaciones cruzadas.

Se rellenaron los caudales promedios mensuales medidos a partir del modelo estocástico multivariado programado y operado con MatLab R2013a. El modelo permite rellenar los registros de una estación, en función de los datos medidos en las restantes, en que la influencia de datos medidos en una estación sobre valores generados en otra, depende de la calidad de la correlación entre ambas. El período cubierto fue 53 años, de 1960 a 2012.

### III.4 Curvas de Variación Estacional de Caudales Medios Mensuales

Se realizó un análisis probabilístico de los caudales promedios mensuales de la estación *estero Los Puercos en puente Los Puercos* para determinar las distribuciones de mejor ajuste para los caudales de cada mes. En la Figura III-2 se muestran las curvas de variación estacional determinadas usando las distribuciones listadas en la tabla anterior.

En el gráfico de la Figura III-2 se ve un descenso de los caudales en el mes de mayo; esto se debe a que los caudales del estero Los Puercos entre enero y abril provienen principalmente de sobrantes de riego, ya que las entregas del canal Pencahue persisten hasta abril y en mayo éste se detiene.

Para probabilidades de excedencia bajas (períodos más húmedos, por ejemplo 5%), el efecto de disminución en mayo es más acentuado. Esto ocurre debido a que el riego efectivo es menor y se deja pasar más agua, lo que origina mayores sobrantes. El cierre de la bocatoma del canal Pencahue en mayo, produce una merma significativa en el caudal del estero, abundantemente alimentado con sobrantes en los meses previos.

A la inversa, con probabilidades de excedencia altas (períodos secos, por ejemplo 95%), la mayor parte del agua del canal Pencahue se usa efectivamente en el riego, generando menores caudales sobrantes. Por consiguiente, el corte del suministro del canal Pencahue en mayo, produce sólo una reducción atenuada del caudal en el estero Los Puercos, con relación a los caudales del estero en los meses previos a mayo.

Figura III-2. Curva de variación estacional de caudales promedios mensuales en estero Los Puercos en puente Los Puercos



P <sub>exc</sub> /Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
5 %	5.215	6.015	8.722	11.580	6.619	22.388	17.748	18.937	12.828	4.898	6.929	4.627
20 %	4.257	4.494	5.846	6.303	4.604	12.682	10.809	10.544	6.142	3.828	5.076	4.087
50 %	3.404	3.469	4.282	3.873	3.039	4.731	5.811	5.321	2.764	2.516	3.647	3.504
85 %	2.338	2.511	2.590	2.253	1.784	1.580	2.385	2.242	1.129	1.358	2.378	2.561
95 %	1.594	2.005	1.757	1.577	1.333	1.136	1.597	1.379	0.719	1.064	1.802	1.933

### III.5 Aforos

Con el objetivo de conocer de mejor manera los procesos hidrológicos e hidrogeológicos que ocurren en la cuenca del estero Los Puercos para una adecuada implementación del modelo conceptual, se realizó una primera campaña de aforos en diversos puntos del estero Los Puercos y en cauces superficiales que son tributarios a éste. Esta campaña consistió en dos corridas de aforos en los meses de julio y octubre de 2013. La Figura IV-2, del capítulo IV Calidad físico-química del agua, muestra los puntos donde se realizaron los aforos, mientras que en la Tabla III- se consignan los resultados de dichas mediciones.

Tabla III-2. Caudales aforados cuenca del estero Los Puercos

Punto	Descripción	Coordenadas UTM [m]		Cota (msnm)	1ª Corrida			2ª Corrida		
		Este	Norte		Fecha	Hora	Caudal [m³/s]	Fecha	Hora	Caudal [m³/s]
1	Estero Las Palmas	249.140	6.101.074	98	28-07-2013	15:00	0,087	27-10-2013	8:30	3,178
2	Estero Tapihue	251.471	6.099.614	74	28-07-2013	14:15	0,042	27-10-2013	10:10	1,191
3	Estero Litú	253.920	6.097.181	80	28-07-2013	15:30	0,107	27-10-2013	9:23	4,465
4	Estero Pichingüileo aguas arriba estero Las Palmas	246.458	6.094.423	71	12-09-2013	11:25	0,102	27-10-2013	11:30	0,603
5	Estero Los Puercos aguas arriba estero Botalcura	248.377	6.092.074	61	28-07-2013	12:50	0,620	27-10-2013	11:46	1,148
6	Estero Botalcura	243.011	6.091.016	92	28-07-2013	13:19	0,042	27-10-2013	13:15	0,010
7	Estero Tutucura aguas arriba estero Los Puercos	249.055	6.088.313	60	28-07-2013	12:00	0,511	27-10-2013	12:45	0,137
8	Estero Cunculén aguas arriba estero Los Puercos	244.903	6.082.598	49	28-07-2013	11:10	0,199	27-10-2013	15:25	0,008
9	Estero Los Puercos aguas abajo estero Cunculén	242.742	6.081.430	30	28-07-2013	10:30	1,377	27-10-2013	14:00	0,045
10	Estero Los Puercos en Corinto	238.479	6.073.596	27	28-07-2013	9:15	2,013	27-10-2013	14:29	0,016

Nota: Coordenadas UTM WGS84, Huso 19S

Se observa que en algunos cauces los caudales medidos en octubre superan a los valores de junio. Esto se debe a que en el mes de julio, cerca de la fecha de medición, prácticamente no hubo precipitaciones, mientras que el día 20 de octubre en la misma estación se midieron lluvias intensas, registrándose una precipitación total de 17 mm en un período de 15 horas, lo que generó los caudales que se midieron en ese mes.

Se realizaron además aforos complementarios en el canal Pencahue, para analizar la posibilidad de pérdidas por conducción en el tramo de canal desde su bocatoma hasta el área de estudio. Se midieron caudales semejantes en torno a los 5 m³/s, en los kilómetros 0.6 y 11, comprobándose que no existen pérdidas apreciables en dicho tramo. Por consiguiente, los datos de caudales en bocatoma con los que se cuenta, pueden asociarse a los del km 11 del trazado, sin corrección alguna (ver Figura IV-1).

## IV Calidad físico-química del agua

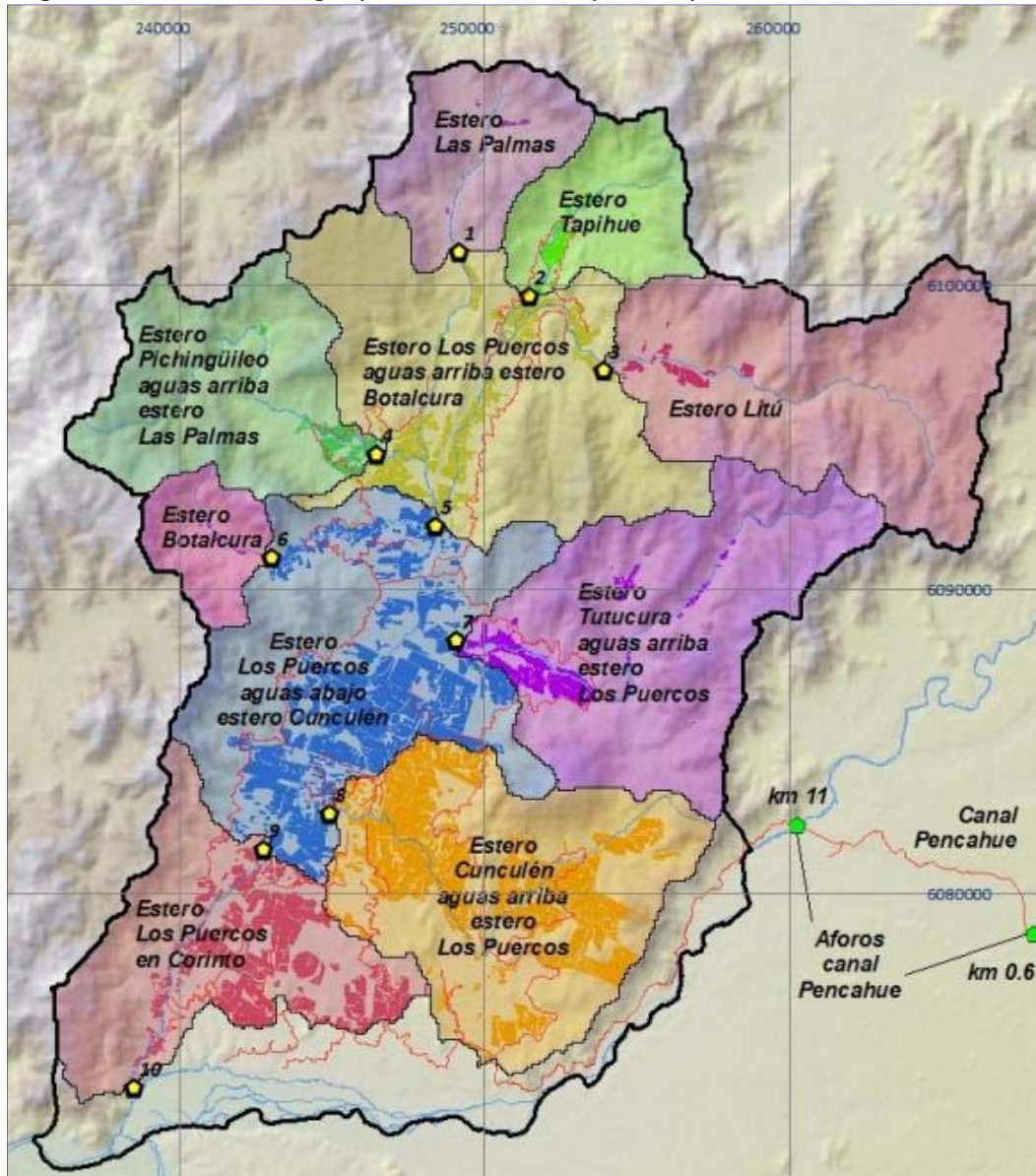
### IV.1 Aguas superficiales

En los mismos puntos donde se realizaron los aforos en cauces se tomaron muestras de agua, en las que se midió in situ pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto. Los puntos de medición se muestran en la Figura IV-1.

### IV.2 Aguas subterráneas

Por otro lado, se midieron los mismos parámetros físico-químicos de aguas subterráneas, en muestras obtenidas en 22 puntos distribuidos de manera uniforme en la cuenca del estero Los Puercos. En la Figura IV-3 se muestran los puntos donde se tomaron las muestras.

Figura IV-1. Áreas de riego, por subcuenca de aporte superficial a secciones de aforo



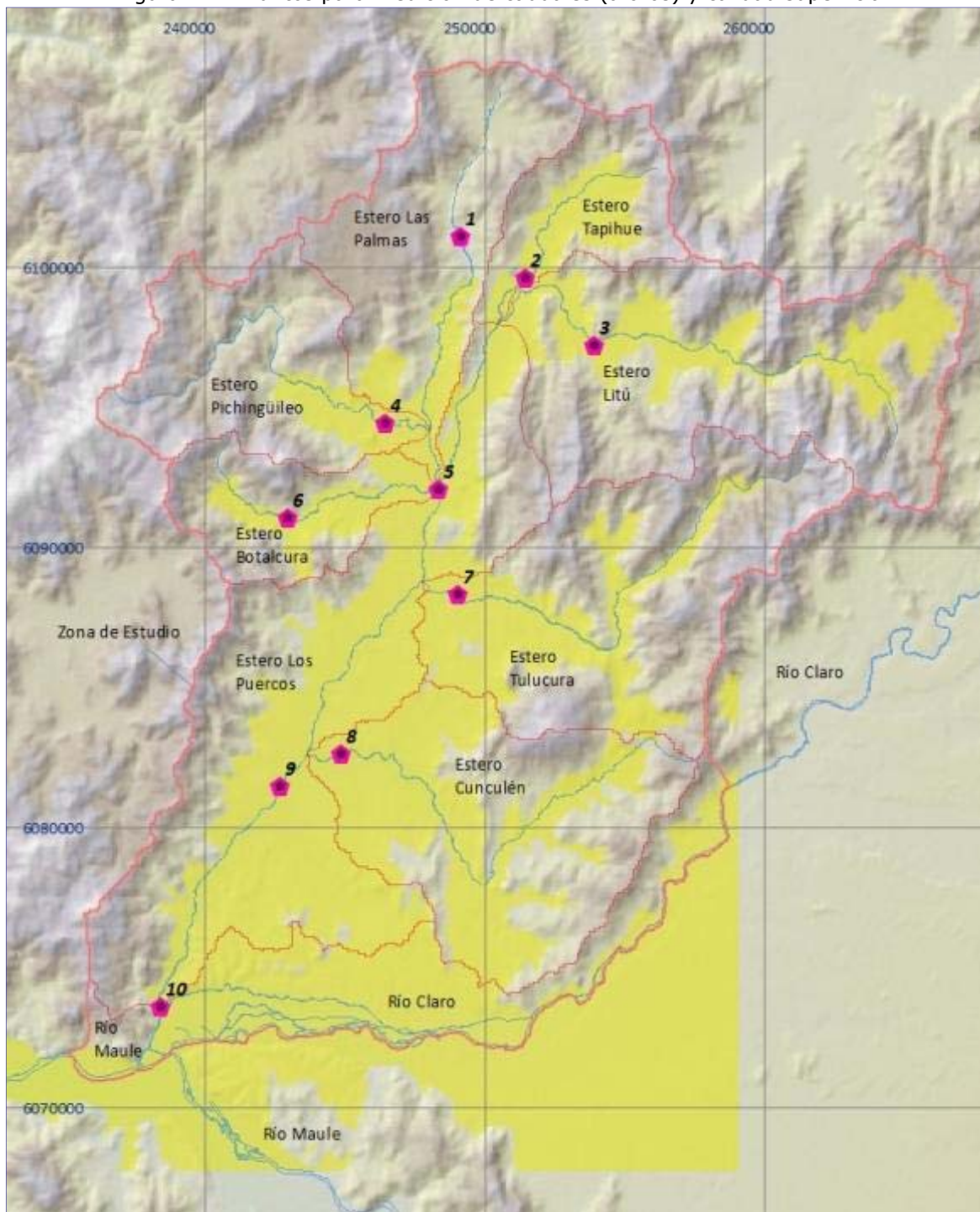
Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

De acuerdo con los análisis efectuados tanto al agua subterránea, se ve que en general éstas son neutras ( $6.1 < \text{pH} < 7.9$ ), mientras que las aguas superficiales presentan un pH levemente básico ( $7.3 < \text{pH} < 8.2$ ).

La conductividad del agua subterránea por su parte, es bastante mayor que en las aguas superficiales (170 a 2300 versus 122 a 486  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Esto es característico de napas de la zona costera de Chile, por la presencia de hierro y manganeso, detectados en muchos pozos y norias de agua potable rural y urbana, principalmente entre las regiones V y X.

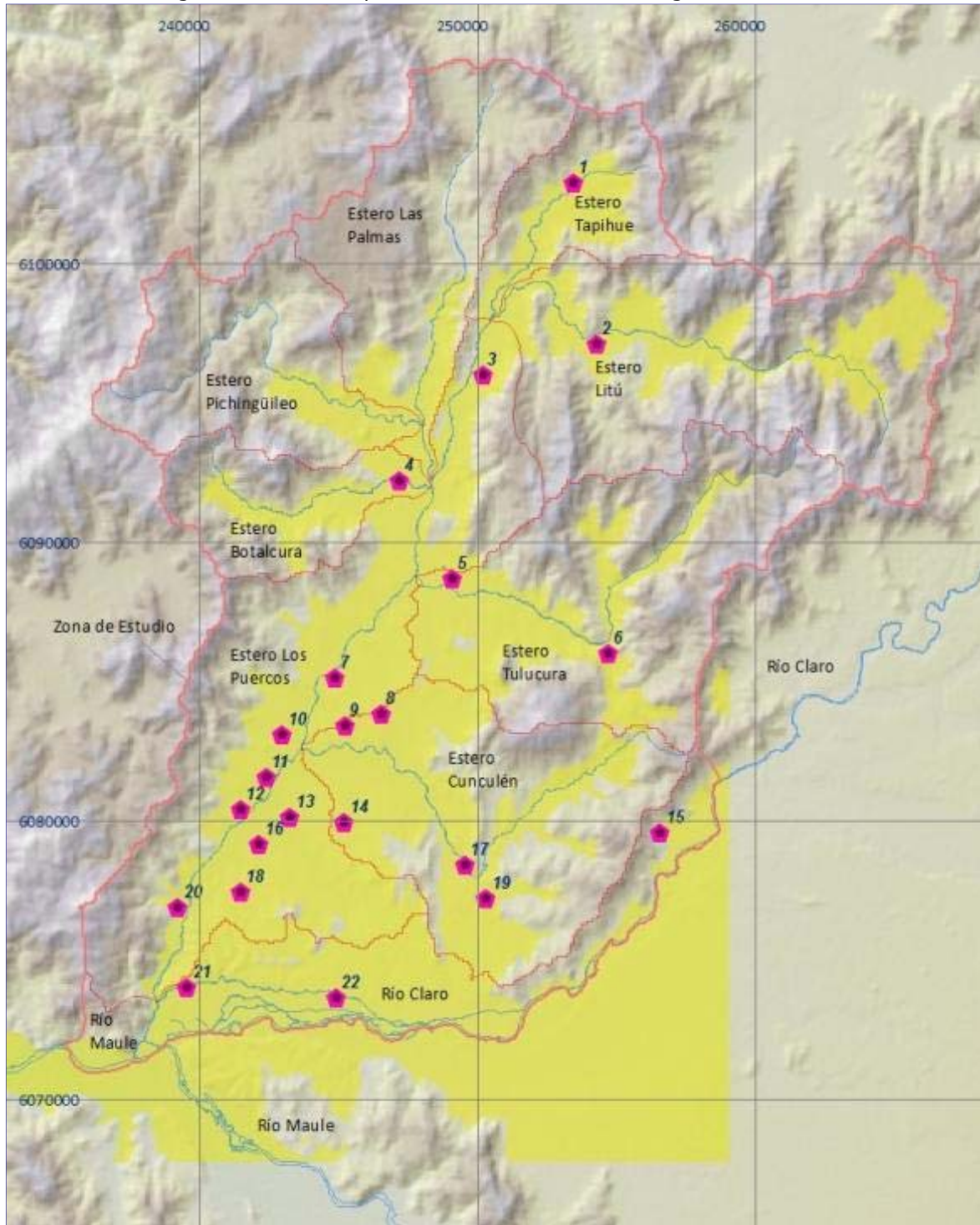
El oxígeno disuelto de aguas superficiales resultó mayor al de las aguas subterráneas (9.7 a 12.7 mg/l versus 2.4 a 9.3 mg/l), debido al efecto de temperatura, aireación, etc., lo cual resulta razonable en esta comparación.

Figura IV-2. Puntos para medición de caudales (aforos) y calidad superficial



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura IV-3. Puntos para medición de calidad del agua subterránea



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

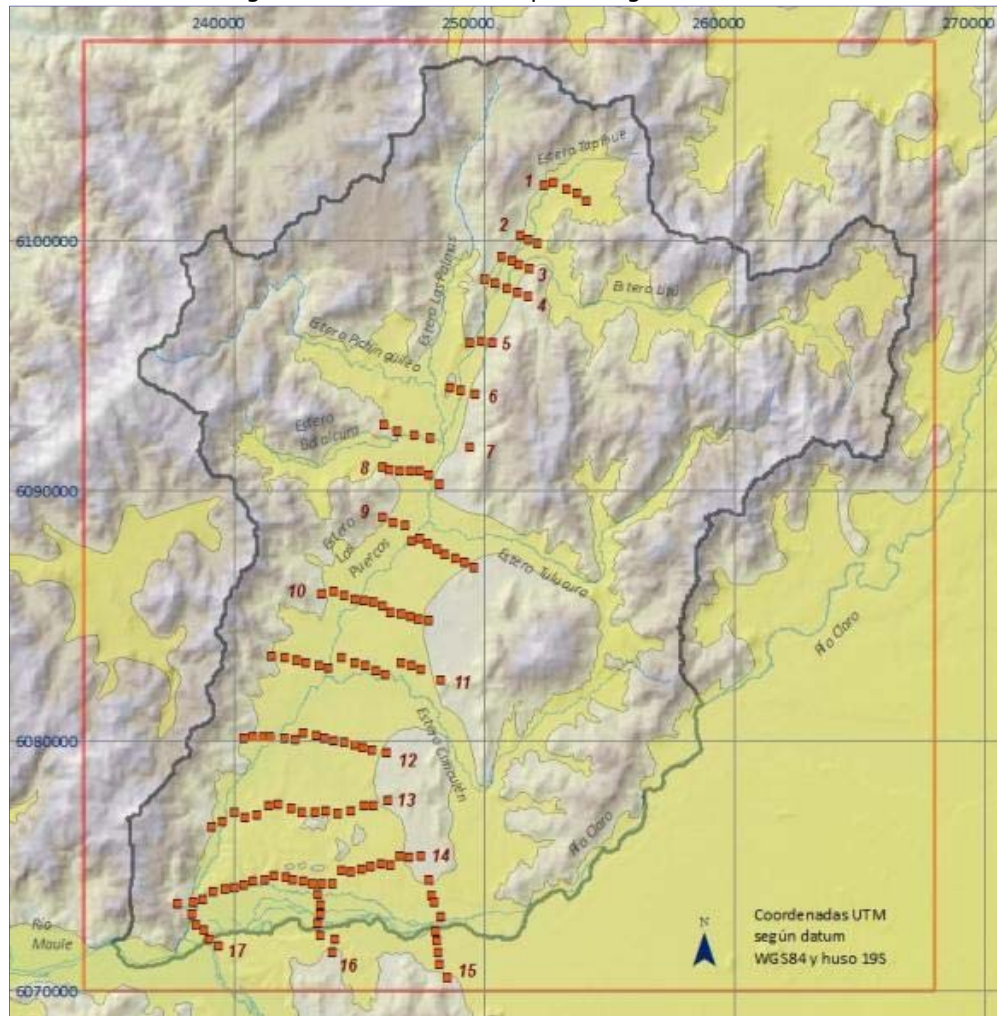


## V Hidrogeología

### V.1 Geofísica

En julio de 2013 se realizó una campaña de exploración geofísica consistente en 150 estaciones gravimétricas, agrupadas en 17 perfiles. En la Figura V-1 se muestran sus ubicaciones. Para efectos de calibración de las mediciones gravimétricas, se utilizó información de norias de poca profundidad que alcanzaron la roca y de puntos tomados en afloramientos rocosos.

Figura V-1. Ubicación de perfiles gravimétricos



UTM Datum WGS84 huso 185

### V.2 Catastro de captaciones subterráneas

En julio de 2013 se realizó el catastro de captaciones y usos de aguas subterráneas. En total se catastraron 117 captaciones.

### V.3 Geología

En el análisis geológico se delimitó la zona de relleno y se identificaron las unidades de roca en el área de interés, utilizando toda la información geológica disponible en el SERNAGEOMIN y en estudios anteriores. Con la información del "Mapa geológico de Chile" se elaboró una interpretación para definir las unidades geológicas principales que existen en el área de interés, en un nivel de detalle regional.

Se contó también con la carta hidrogeológica de Chile, de SERNAGEOMIN, hoja Talca. Las unidades identificadas son:

- a) Depósitos fluviales (Qf)
- b) Depósitos fluviales actuales (Qfa)
- c) Depósitos fluviales de valles interserranos (Qfi)
- d) Depósitos de escombrera de ladera de cerro (Qe)
- e) Depósitos cineríticos (Qc)
- f) Depósitos de abanico fluvial del río Maule (Qafm)
- g) Intrusivos graníticos (Jig)
- h) Basamento Granítico (Pzg/Pzga)
- i) Formación Lo Valle (KT/v)

Los distintos tipos de depósitos, según sus características hidrogeológicas permiten definir una jerarquía, en cuanto a los valores de permeabilidad asociables a cada unidad sedimentaria. Por lo tanto, esa información se usó para adoptar valores iniciales de permeabilidad en el modelo de flujo subterráneo en las áreas donde no se dispuso de datos puntuales de pruebas de bombeo en captaciones (ver Figura V-2).

Si bien la totalidad del área de estudio está cubierta por la hoja Talca descrita en el punto anterior, fue necesario corregir esa información, con los datos de la prospección geofísica realizada. Se modificaron algunos límites de las unidades de depósitos, según las estaciones de gravimétricas que detectaron ausencia o presencia de relleno. Se adoptó como límite para el relleno un espesor de a lo menos 2 m. Las correcciones efectuadas se destacaron en la Figura V-3, que se presenta más adelante.

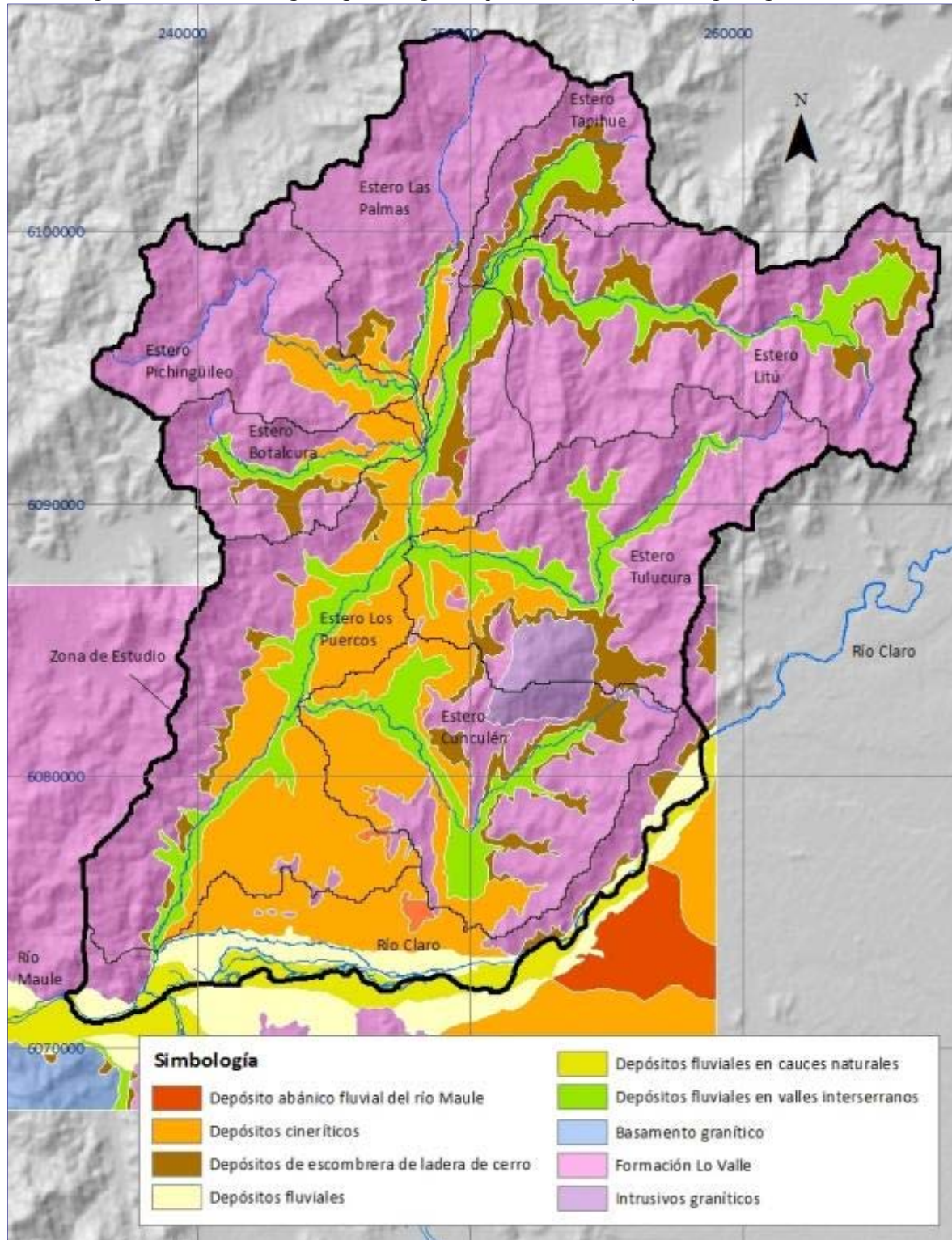
### V.4 Geometría acuífera

Con la identificación de las unidades sedimentarias, se definió el contorno del relleno en la zona de interés. A su vez, para definir la geometría acuífera en el eje vertical, se usaron los datos de la prospección gravimétrica efectuada.

La Figura V-4 muestra las curvas de isoprofundidad del relleno. El relleno más profundo (en torno a 145 m) se ubica en torno al cauce del estero los Puercos, aguas abajo de la confluencia de éste con el estero Tulucura. A su vez al norte de la confluencia del estero Pichingüileo con el estero Los Puercos, el relleno es marginal.

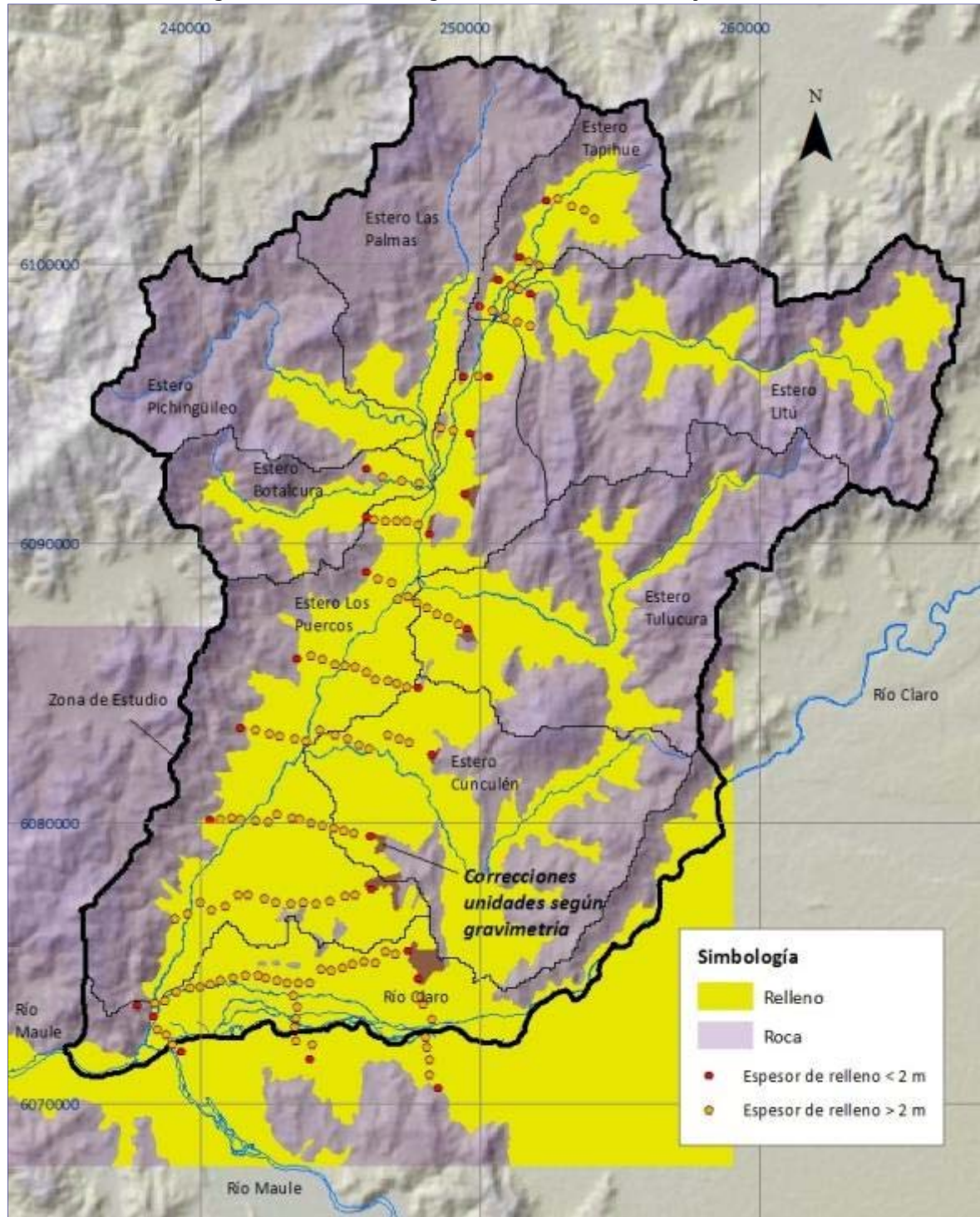
La reducida potencia del relleno (inferior a 50 m) detectada en gran parte de la zona, permite augurar un potencial limitado de recursos hídricos subterráneos almacenados en los sedimentos, por lo que será relevante evaluar los recursos existentes en las unidades de roca que pueden presentar alteraciones.

Figura V-2. Unidades geológicas según hoja Talca de mapa hidrogeológico de Chile



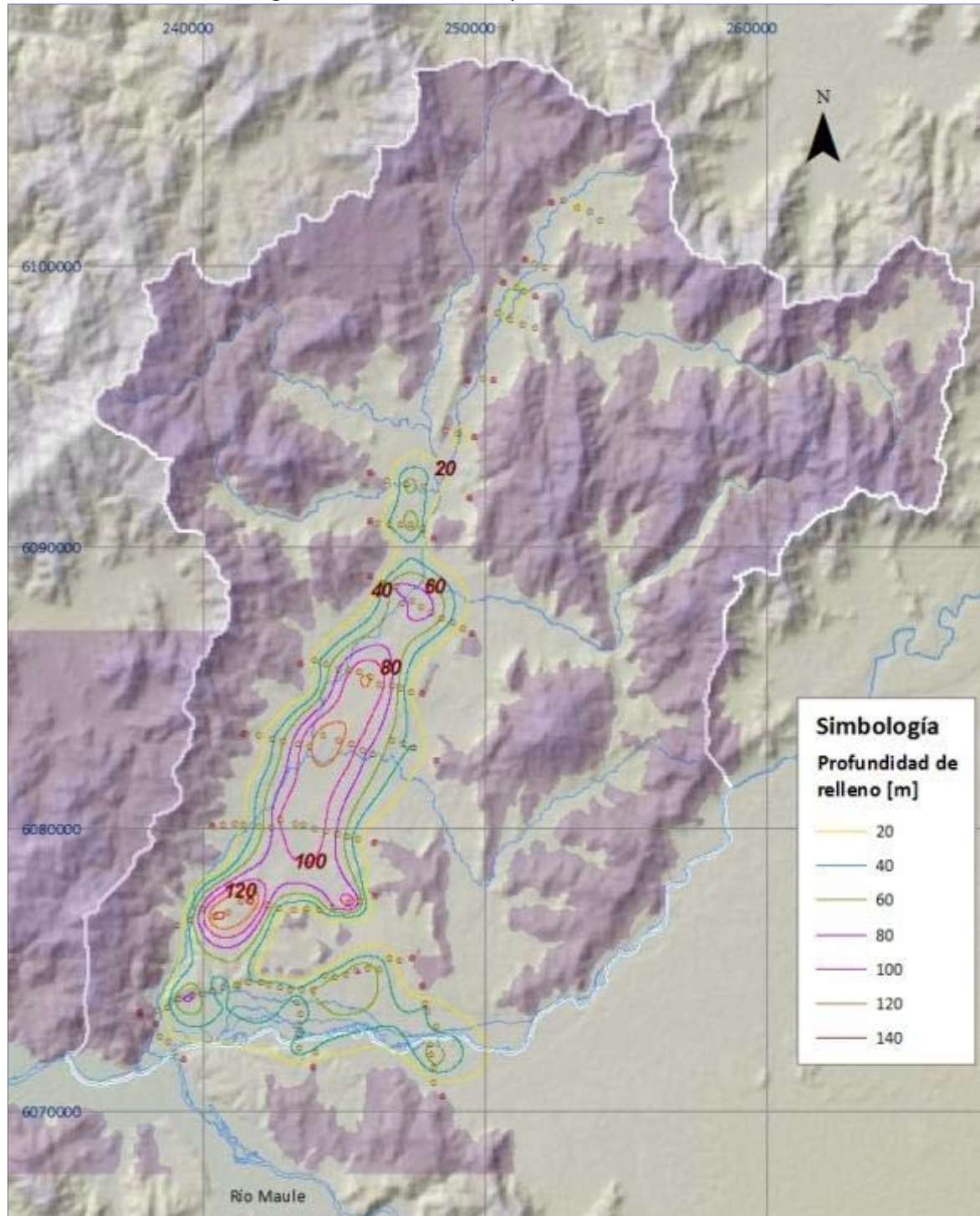
Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura V-3. Estaciones gravimétricas medidas en julio 2013



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura V-4. Curvas de isoprofundidad del relleno



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

## **V.5 Propiedades físicas de los acuíferos**

Los datos de pruebas de bombeo para el cálculo de permeabilidades y transmisibilidades de los acuíferos, fueron extraídos de los expedientes de derechos y de planos de construcción de las captaciones, recopilados en estudios anteriores.

Con los datos de las pruebas de gasto variable y constante se calcularon las transmisibilidades, haciendo uso de las relaciones de la hidráulica de pozos. En la Figura V-5 se muestra la ubicación de las captaciones consideradas en este análisis.

Para cada punto con información, se adoptaron valores representativos. En el caso de captaciones para las que se cuenta con los datos de ambas pruebas (gasto constante y variable), de acuerdo a lo expuesto en el párrafo anterior, se optó por los valores ( $k$  y  $T$ ) obtenidos con los datos de la prueba de gasto constante, a menos que las diferencias entre los valores sean muy marcadas, en cuyo caso se adoptaron los valores de la prueba de gasto variable.

En la Figura V-6 se muestran rangos de permeabilidad, expresados en m/día, para visualizar con valores enteros las diferencias relativas de permeabilidad equivalente en la zona de estudio. En la figura se aprecia que el área en torno al estero Los Puercos en su zona baja, es decir previo a su confluencia con el río Claro, presenta las mayores permeabilidades.

## **V.6 Niveles de agua subterránea**

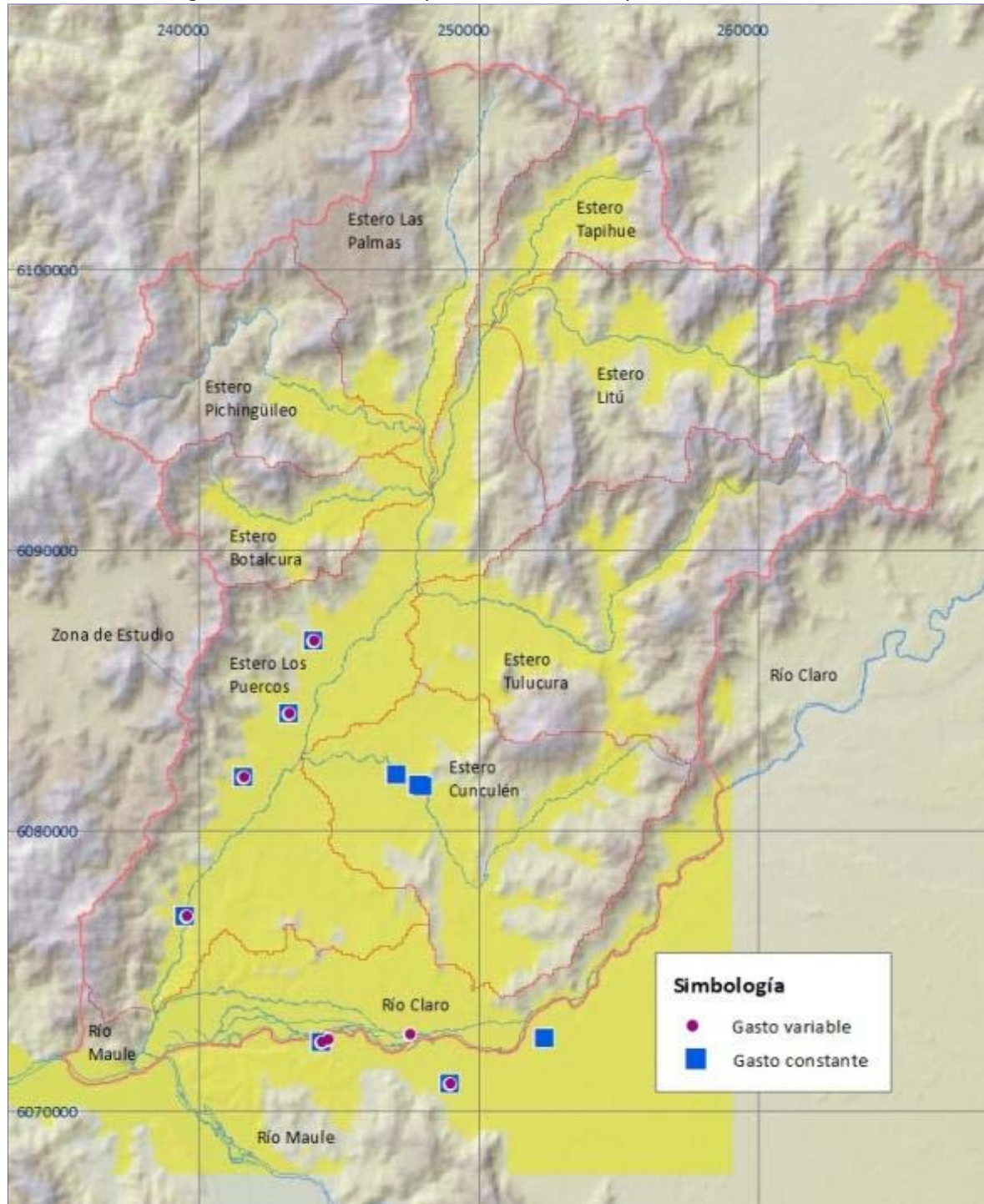
Con los datos de niveles obtenidos en el catastro de captaciones subterráneas, se trazaron las curvas isofreáticas de la Figura V-7 y Figura V-8.

En el área de estudio existen captaciones en zonas de roca (fuera del relleno sedimentario); por esa razón, las curvas cubren ambas zonas (relleno y roca).

## **V.7 Flujos subterráneos**

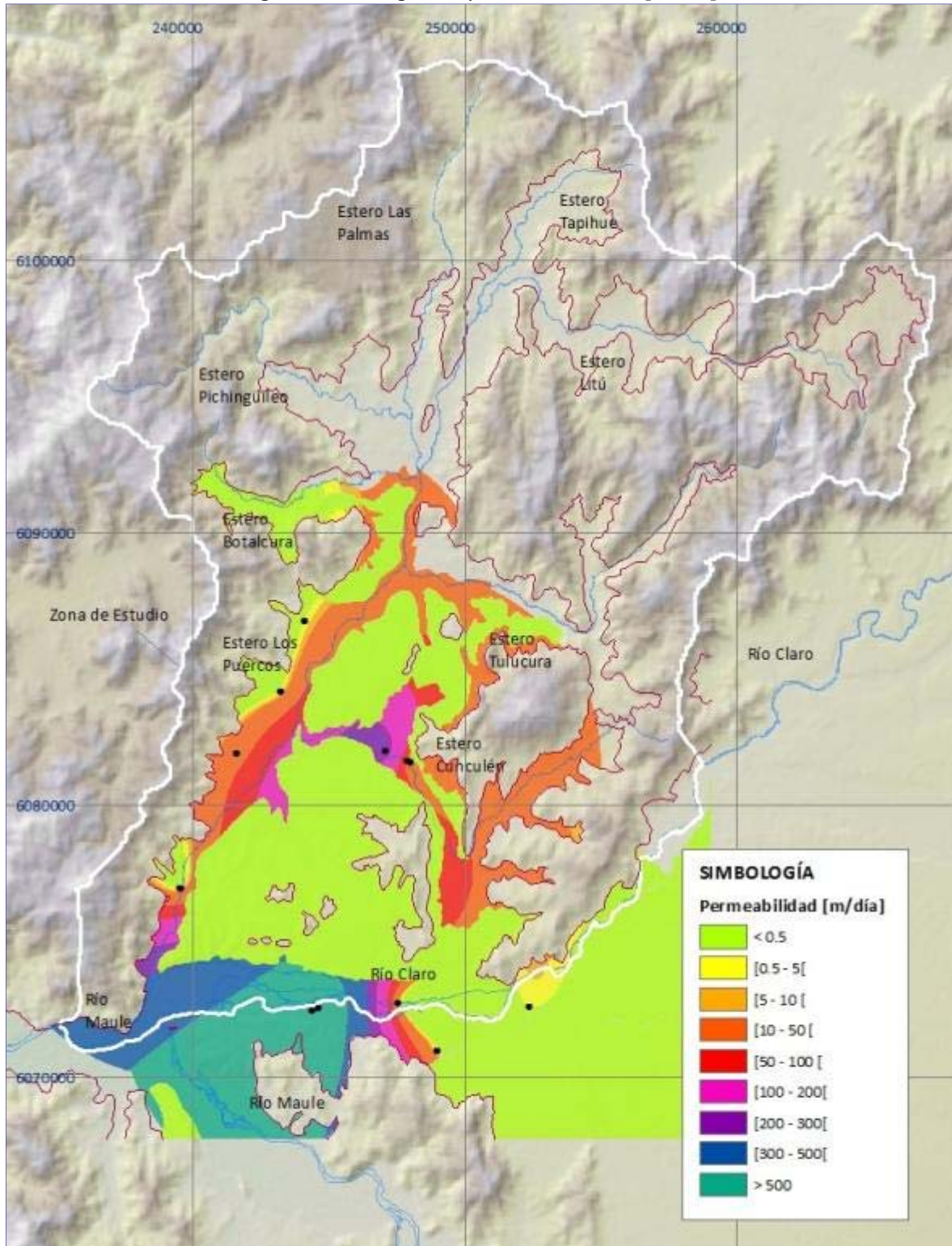
Sobre la base de la información de las equipotenciales generadas anteriormente, se determinaron las direcciones principales del flujo subterráneo, que se pueden apreciar en la Figura V-9.

Figura V-5. Ubicación de pozos con datos de pruebas de bombeo



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

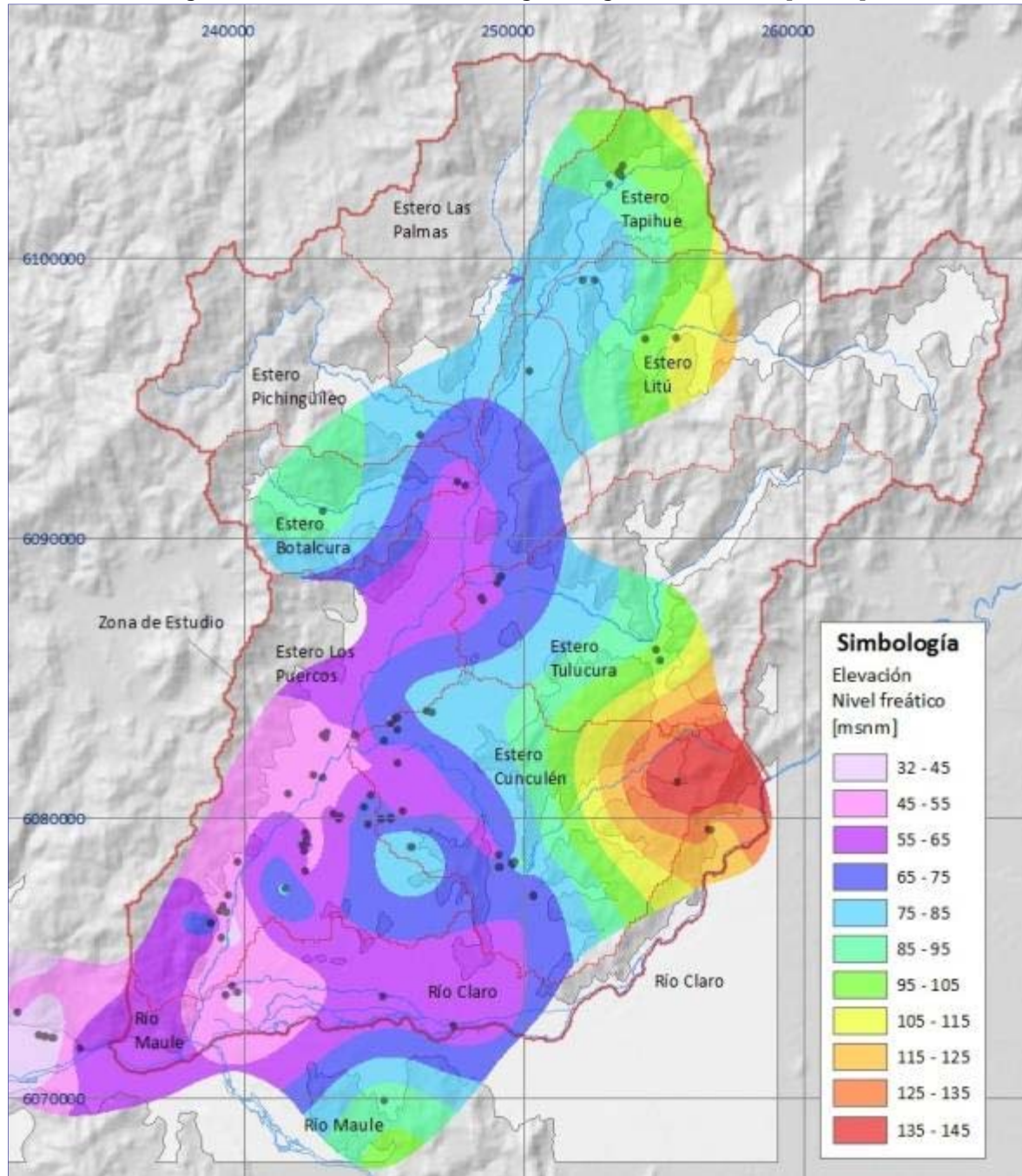
Figura V-6. Rangos de permeabilidad en [m/día]



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

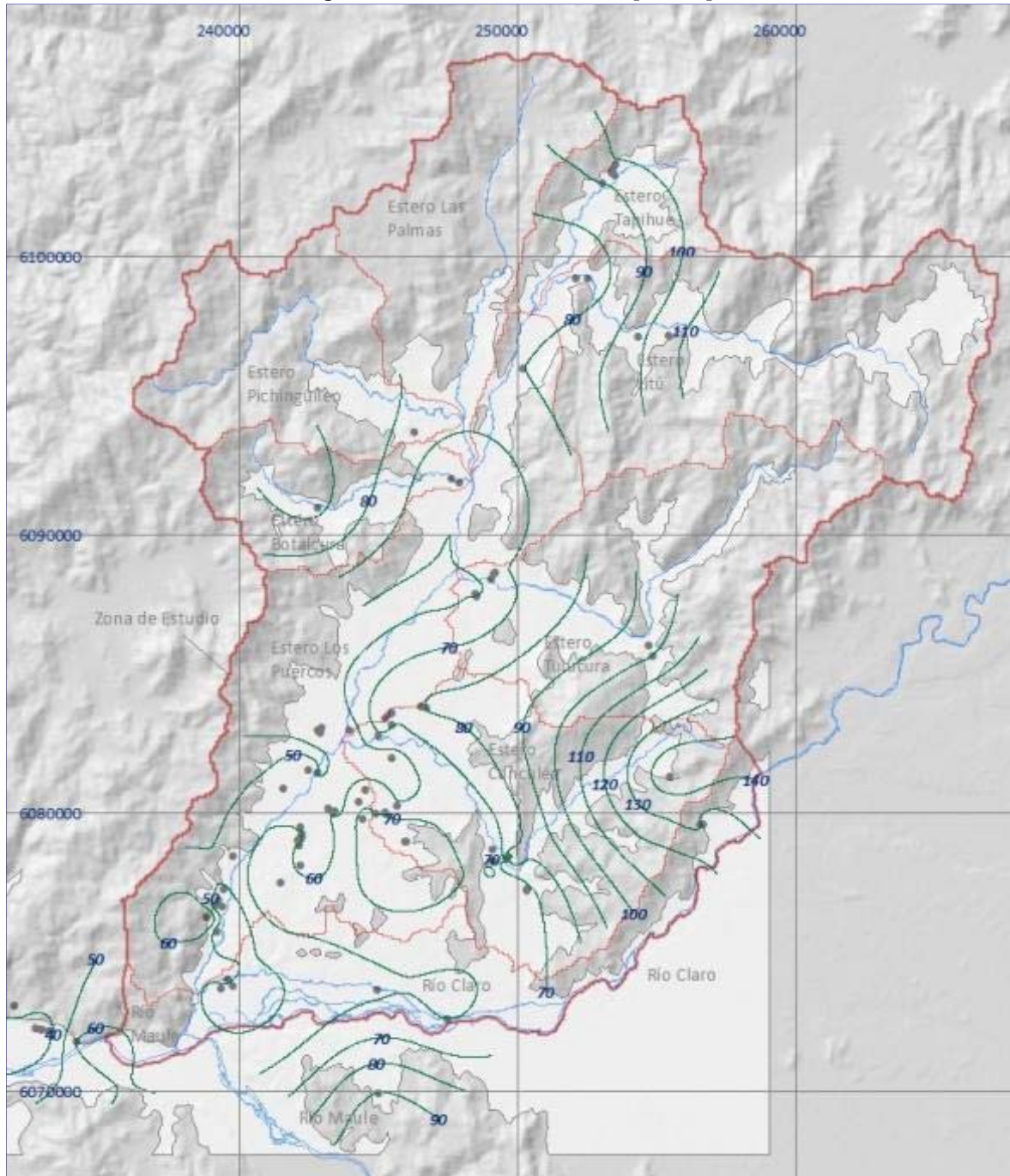


Figura V-7. Curvas isofreáticas según rangos de elevación [msnm]



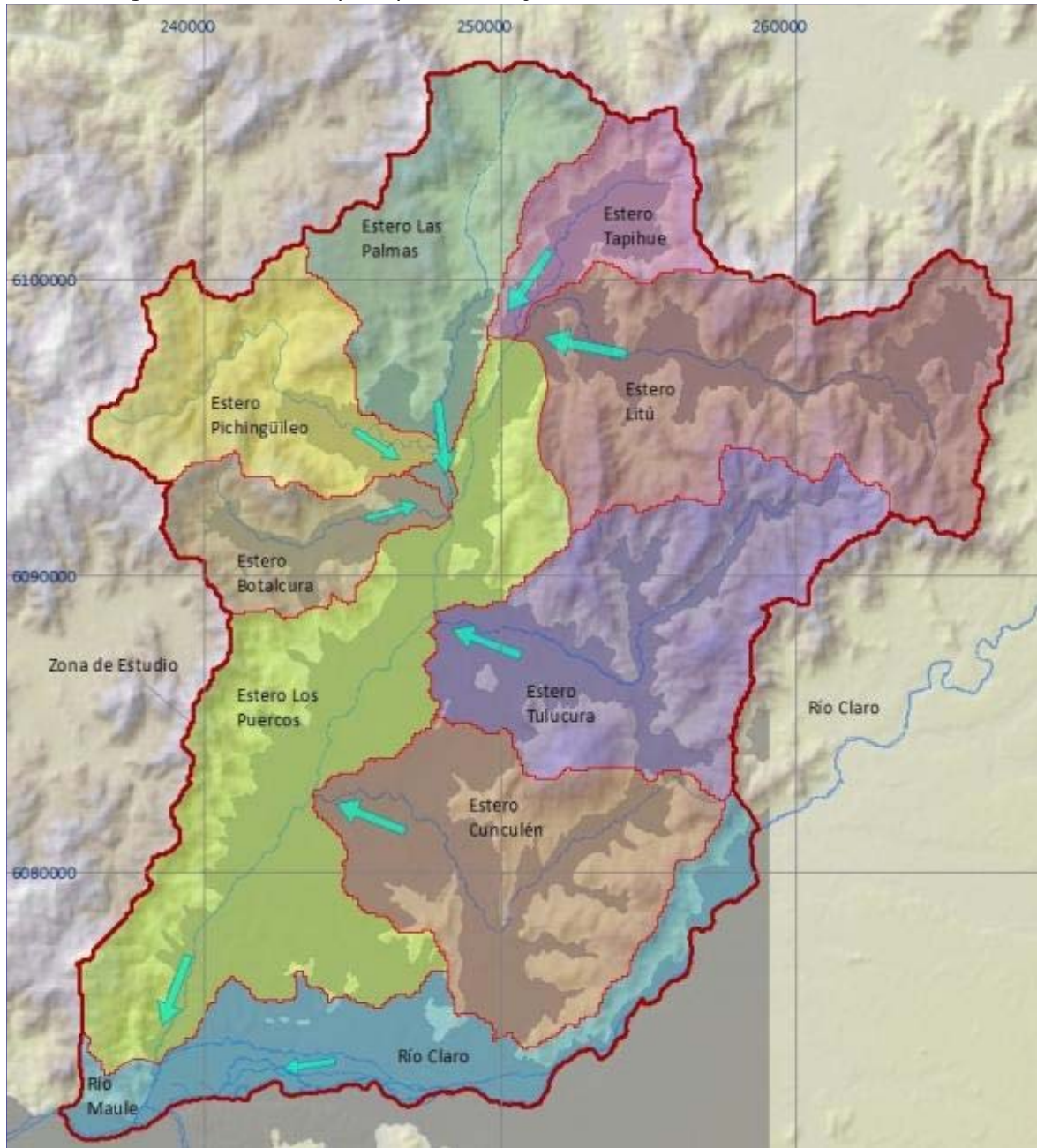
Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura V-8. Curvas isofreáticas [msnm]



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura V-9. Sentidos principales del flujo subterráneo en secciones de control



Nota: sectorización según subcuencas trazadas en función de la escorrentía superficial

Las curvas equipotenciales permitieron definir el gradiente hidráulico para cada uno de los acuíferos. Por otro lado, a partir de los parámetros hidrogeológicos determinados con los datos de las pruebas de bombeo de pozos distribuidos en el área de estudio y de la geometría de los acuíferos obtenida del estudio geofísico realizado, se han estimado los flujos potenciales pasantes por cada uno de los acuíferos en estudio. Para estimar estos flujos se empleó la relación de Darcy, que señala lo siguiente:

$$Q = k \times m \times i \times b$$

$Q$	:	Flujo subterráneo potencial ( $m^3/s$ )
$K$	:	Permeabilidad del acuífero (m/s)
$i$	:	Gradiente hidráulico de la napa ( $^{\circ}/1$ )
$m$	:	Espesor del acuífero (m)
$b$	:	Ancho de la sección de escurrimiento considerada (m)

En la Tabla V- se presentan los valores estimados del flujo potencial pasante por cada uno de los acuíferos de interés:

Tabla V-1. Flujo potencial pasante

Sector		K	m	i	B	Q
Nº	Nombre	(m/s)	(m)		(m)	(l/s)
1	Río Claro	2,00E-03	40	4,70E-03	1600	602
2	Estero Cuculén	1,20E-04	70	5,70E-03	1700	81
3	Estero Botalcura	8,10E-05	45	8,50E-03	900	28
4	Estero Tulucura	8,10E-05	65	6,50E-03	1900	65
5	Estero Los Puercos	8,10E-05	100	6,20E-03	2000	100
6	Estero Litú	8,10E-05	20	3,80E-03	500	3
7	Estero Pichingulleo	8,10E-05	15	1,00E-02	700	9
8	Estero Tapihue	8,10E-05	20	7,90E-03	800	10
9	Estero Las Palmas	8,10E-05	15	7,90E-03	950	9

Cabe señalar que en los casos de los sectores N°3, 4, 6, 7, 8 y 9, no se contó con datos de pruebas de bombeo para estimar el valor de la permeabilidad, por lo que se utilizó el valor calculado para el acuífero asociado al estero Los Puercos, que corresponde al menor valor estimado.

## VI Demandas hídricas

### VI.1 Demandas de riego por subcuenca

Se identificaron y delimitaron las áreas cultivadas en la zona de estudio (ver Figura VI-1), mediante un reconocimiento visual con Google Earth. En la comuna de Pencahue el área identificada como cultivada o arada, resultó de 10849 ha: sin embargo, la superficie regada según el Censo Agropecuario de 2007 sería 8755 ha. Por ello, se utilizó las áreas de Google Earth para distribuir la zona de riego por subcuencas y la superficie se corrigió, según el dato del censo; es decir, se ponderaron por el factor 0.81 (8755/10849).

Se dispone de valores de coeficientes de cultivos para especies representativas de las existentes en el área de interés, obtenidas del censo de 2007 y las especies a las que éstos se han asimilado para disponer de sus respectivos coeficientes de cultivo

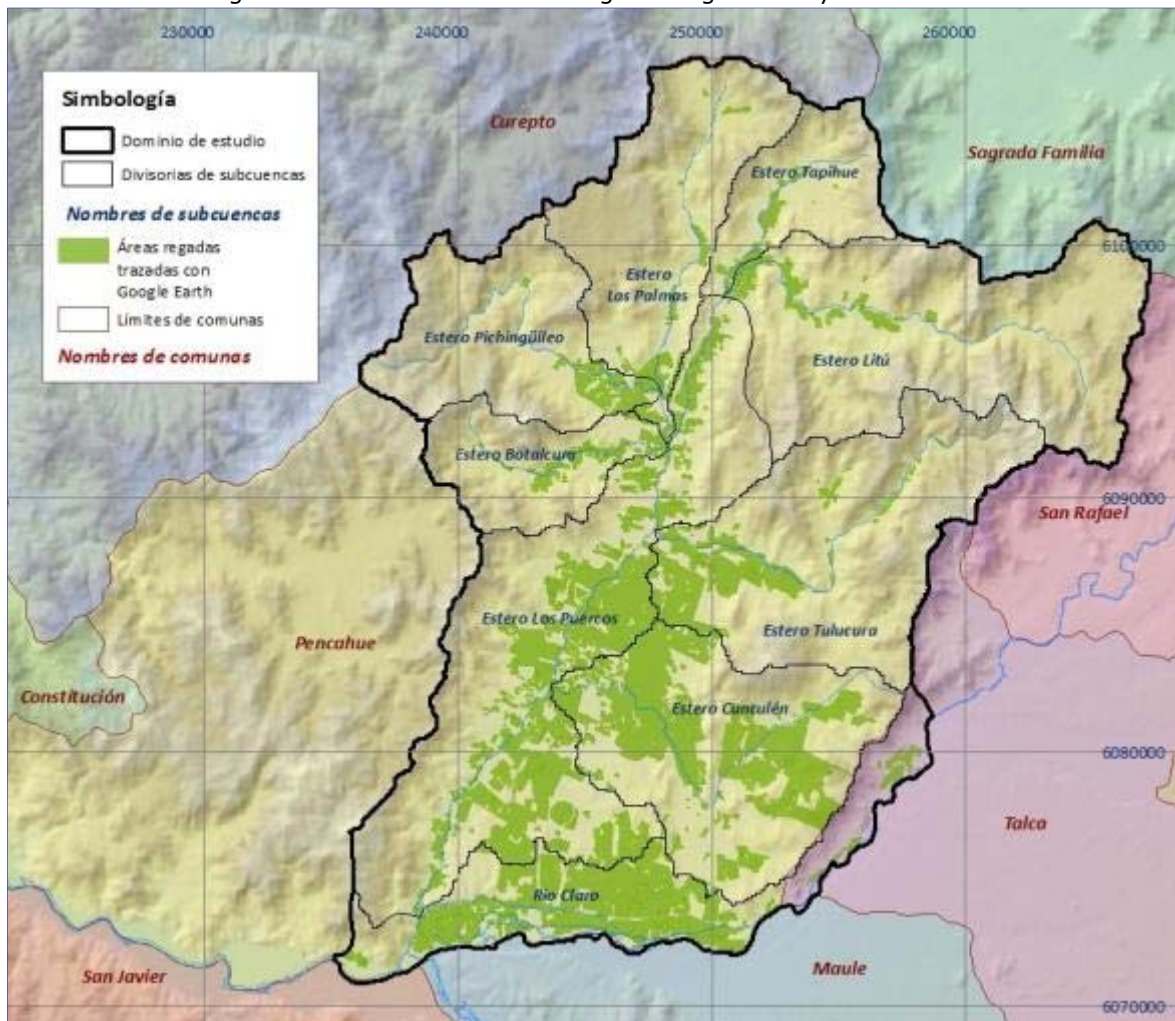
Con los  $k_c$ , las áreas de riego por subcuenca (Figura VI-1) y las variables agroclimáticas promedios mensuales, se calcularon las demandas de riego que se han incluido en la Tabla VI-1. El cálculo se realizó a nivel de subcuenca y esos valores incluyen la eficiencia de aplicación promedio de la comuna (0.716); es decir, corresponden a demandas evapotranspirativas brutas.

Tabla VI-1. Demandas evapotranspirativas brutas de los cultivos [m<sup>3</sup>/s]

Subcuenca	ene	feb	mar	abr	m	j	j	a	sep	oct	nov	dic
Río Claro	1.715	1.399	0.909	0.134	0	0	0	0	0.140	0.587	1.079	1.604
Estero Cunculén	2.075	1.694	1.102	0.163	0	0	0	0	0.171	0.713	1.307	1.941
Estero Botalcura	0.186	0.152	0.099	0.015	0	0	0	0	0.015	0.064	0.117	0.174
Estero Tulucura	0.706	0.577	0.375	0.056	0	0	0	0	0.059	0.243	0.445	0.661
Estero Los Puercos	2.576	2.102	1.367	0.203	0	0	0	0	0.212	0.884	1.622	2.409
Estero Litú	0.224	0.183	0.119	0.018	0	0	0	0	0.019	0.077	0.141	0.209
Estero Pichingüileo	0.215	0.176	0.114	0.017	0	0	0	0	0.018	0.074	0.135	0.201
Estero Tapihue	0.108	0.088	0.058	0.009	0	0	0	0	0.009	0.037	0.068	0.101
Estero Las Palmas	0.197	0.160	0.104	0.016	0	0	0	0	0.016	0.068	0.124	0.184
<b>Total</b>	<b>8.002</b>	<b>6.530</b>	<b>4.247</b>	<b>0.630</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.659</b>	<b>2.747</b>	<b>5.040</b>	<b>7.484</b>

En la Tabla VI-1 se puede apreciar que la máxima demanda para riego en la zona de interés corresponde al mes de enero y alcanza a los 8 m<sup>3</sup>/s. Dicha demanda es satisfecha parcialmente por el caudal conducido por el canal Pencahue y los captaciones subterráneas usadas como complemento del riego de origen superficial.

Figura VI-1. Zonas cultivadas según Google Earth y subcuencas



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

## VI.2 Uso actual de las aguas subterráneas

En el desarrollo de este tema se determinaron los usos efectivos actuales de los sistemas acuíferos, a partir de la explotación de los pozos, norias y vertientes, operativos en la cuenca, separando el caudal de acuerdo con los distintos tipos de usos del agua.

Es importante señalar que en esta cuenca se riega con recursos del canal Pencahue, por lo que la mayor parte de las captaciones de aguas subterráneas existentes se destinan casi exclusivamente al uso doméstico, es decir, al consumo de agua potable.

Con el fin de cuantificar los volúmenes de extracción de las captaciones existentes, se han utilizado los siguientes criterios:

- a) Para el uso en agua potable se adoptó un factor de uso de 20%, es decir, el caudal de bombeo estimado se afectó por dicho factor de uso, para transformarlo en caudal continuo estimado.
- b) En forma análoga, para el caso de las captaciones destinadas al riego, el factor considerado fue 30%.
- c) Finalmente, para las captaciones de uso mixto Riego y Agua Potable, se utilizó un factor 50%.
- d) En el caso de los pozos destinados a servicios de agua potable rural, se utilizó caudales un poco mayores en atención a que ellos están sometidos a una demanda más intensiva.

Tabla VI-2. Número de captaciones cuenca Los Puercos, por tipo de captación y uso

Uso	Tipo de Captación			Total
	Noria	Pozo	Vertiente	
Riego *	16	0	0	16
Agua potable *	63	18	0	81
Sin Uso	14	5	1	20
<b>Total</b>	<b>93</b>	<b>23</b>	<b>1</b>	<b>117</b>

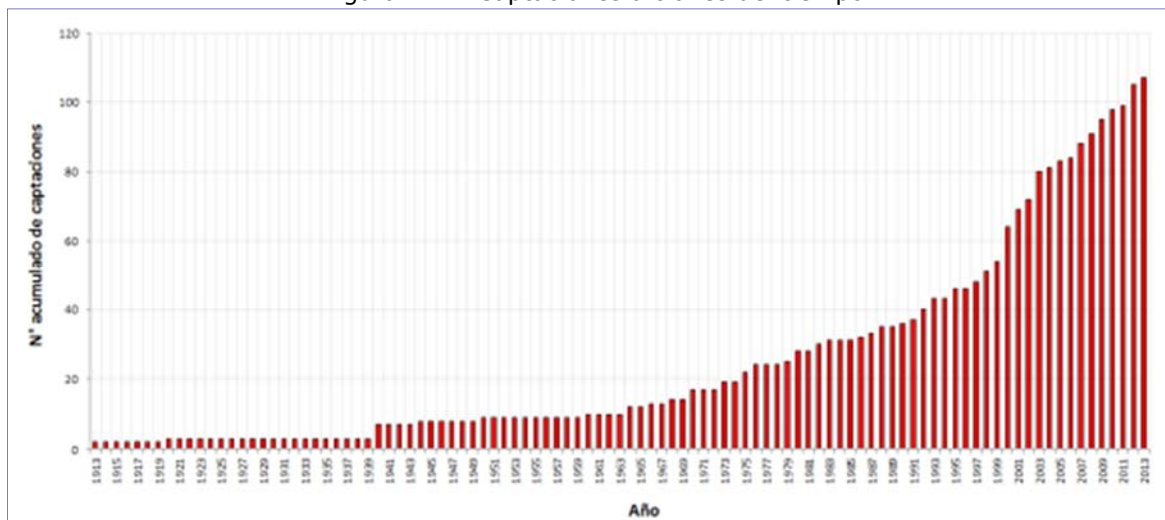
(\*): Existe un total de 14 captaciones (norias) de uso mixto, riego y agua potable, pero considerando que el riego es el consumo más relevante, se han asignado a dicho rubro para efectos de clasificación en la tabla.

En la Figura VI-1 se muestra un gráfico con la evolución en la construcción de captaciones subterráneas en el tiempo, de acuerdo a los datos obtenidos en el catastro.

Se observa en el gráfico que a partir de principios de la década de 1990 se produjo un aumento en la tasa de construcción de captaciones de aguas subterráneas, las que principalmente están asociadas al consumo doméstico.

A partir del análisis de la información obtenida en terreno se han determinado los volúmenes de extracción de aguas subterráneas por tipo de captación. Los valores que se presentan, representan los volúmenes de uso efectivo de recursos hídricos subterráneos, asociados a cada uso por temporada (ver Tabla VI-2).

Figura VI-1. Captaciones a través del tiempo



(\*): Considerando 107 captaciones con información de su fecha de construcción, lo que corresponde a 91.5% de las 117 captaciones catastradas.

Tabla VI-2. Volúmenes extraídos<sup>(1)</sup> por Uso y Temporada (m<sup>3</sup>/temporada)

Uso / Temporada	Verano (Oct - Mar)	Invierno (Abr - Sep)
A. Potable	370,262.0	231,413.8
Riego	348,675.8	69,735.2
<b>Total</b>	<b>718,937.8</b>	<b>301,149.0</b>

(1): Considerando las 97 captaciones con información.

A partir de los volúmenes de extracción por temporada y el número de captaciones con información, se determinó los caudales medios por uso y por captación (Tabla VI-3).

Tabla VI-3. Caudales medios por temporada y por captación [l/s]

Uso / Temporada	Verano (Oct - Mar)	Invierno (Abr - Sep)
Agua potable	0.3	0.2
Riego	1.3	0.3

De la información entregada se desprende lo siguiente:

En el período de verano (oct - mar) el consumo de agua se reparte en forma pareja entre agua potable (52%) y riego (48%), este último con pocas captaciones subterráneas, pues la mayor parte se obtiene de los recursos superficiales del canal Pencahue.

En el período de invierno (Abr - Sep), el consumo de agua potable disminuye en volumen pero aumenta relativamente (77%), debido a la disminución del riego (23%).

En resumen, de acuerdo a los antecedentes del catastro de captaciones realizado, se ha estimado que la tasa actual de extracción declarada por los usuarios es de 1.02 Mm<sup>3</sup>/año (invierno + verano), considerando las extracciones desde pozos, norias y vertientes.

## VII Modelos

Para el análisis del funcionamiento del sistema hídrico de esta cuenca y en detalle de su componente subterránea, se desarrollaron varios modelos, que se listan a continuación.

- a) Modelo de relleno estocástico de variables meteorológicas y caudales de escorrentía superficial (ver capítulo III de Hidrología, puntos III.3 y III.5)
- b) Modelo conceptual del sistema acuífero
- c) Modelo de recargas
- d) Modelo de distribución espacial de precipitaciones (*MDEP*)
- e) Modelo de flujo subterráneo (*MFS*)

### VII.1 Modelo conceptual del sistema acuífero

La conceptualización del sistema se basó en los siguientes antecedentes, analizados en el desarrollo previo del estudio:

- a) Distribución en planta del relleno
- b) Red de drenaje superficial
- c) Delimitación de subcuencas de aporte superficial de los cauces principales
- d) Isofreáticas trazadas con los niveles medidos en catastro efectuado en julio de 2013

En la Figura VII-1. se puede apreciar la delimitación geográfica de las zonas esquematizadas en la Figura VII-2. Los acuíferos se han identificado según el cauce superficial asociado. Sin embargo, fue necesario dividir la cuenca superficial del estero Cunculén, dado que las isofreáticas muestran una descarga subterránea hacia el río Claro (ver Figura VII-1). Por otra parte la zona de confluencia de los esteros Las Palmas, Pichingüileo y Botalcura, se ha representado subterráneamente como un sólo sector.

El sistema acuífero se representó con un estrato único, de permeabilidad equivalente, vinculado con los cauces naturales más relevantes. La zona activa incluye la cuenca de aporte superficial completa, es decir relleno y zonas de roca. Se diferenciaron las zonas de relleno de las de unidades rocosas, con permeabilidades equivalentes de distintos órdenes de magnitud.

Se pueden presentar variaciones del esquema presentado, donde el cauce puede ser otro tipo de cuerpo de agua (tranque, canal, embalse, etc.), el cual puede ubicarse en parte en el relleno o en la zona rocosa, no obstante, la conceptualización es la misma.

También se pueden presentar casos en que el nivel piezométrico es surgente, originando vertientes o afloramientos.



Figura VII-1. Diagrama de flujo subterráneo sistema Péncahue (geográfico)

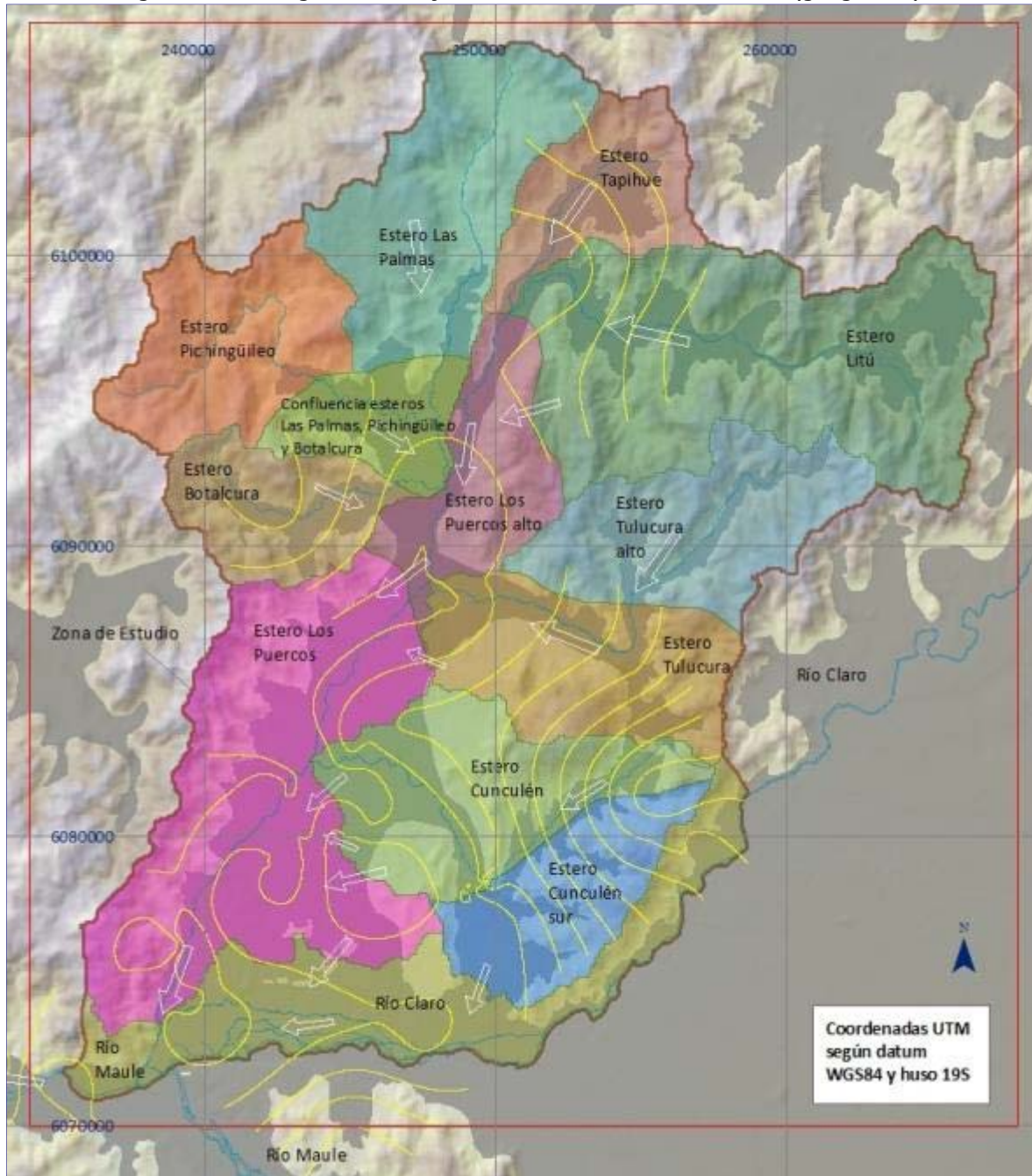
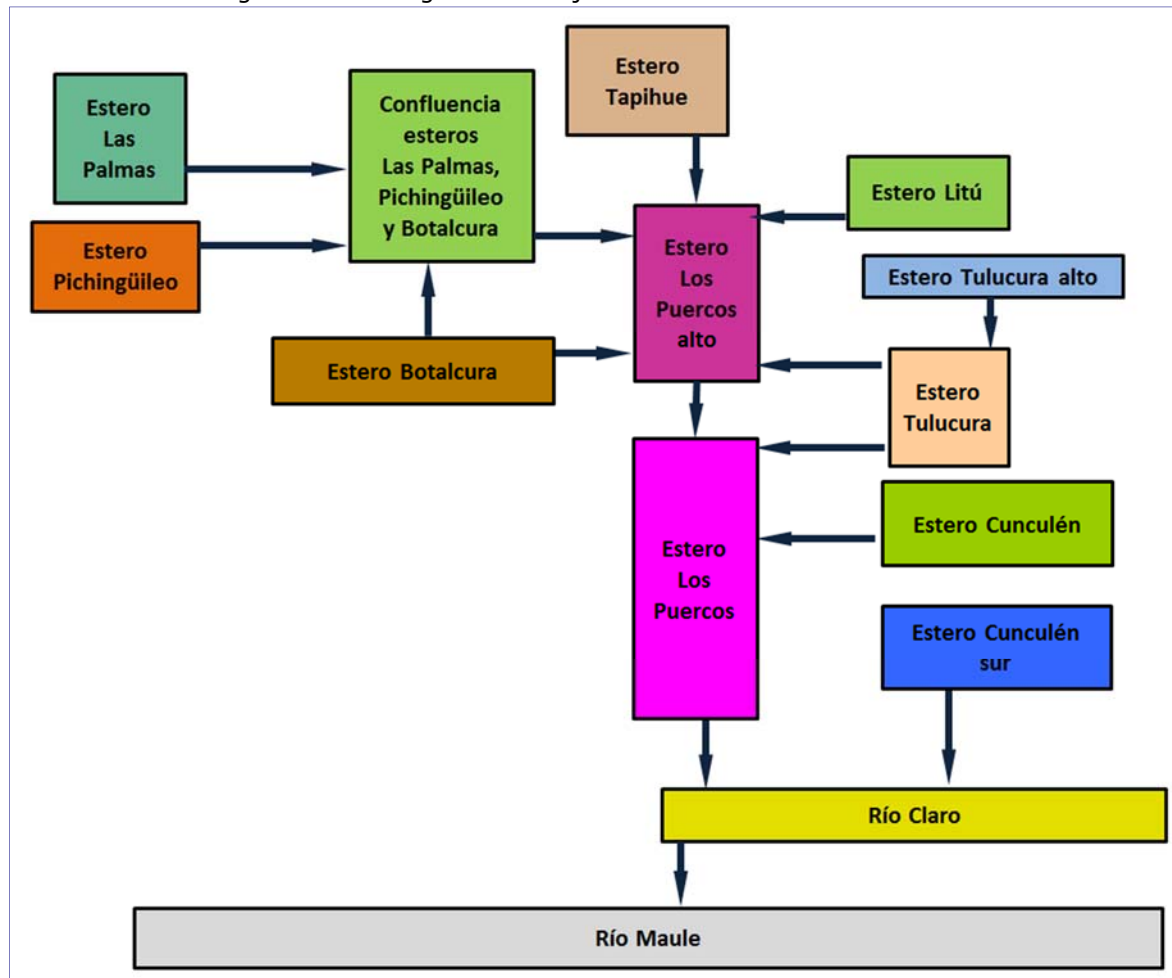


Figura VII-2. Diagrama de flujo subterráneo sistema Pencahue



## VII.2 Modelo de recargas

El modelo de recargas está conformado por 3 modelos que se usan en conjunto para definir la distribución de recargas que se incorpora al modelo de flujo subterráneo.

- Modelo de distribución espacial de precipitaciones
- Modelo de escorrentía superficial para definir celdas del tipo río en modelo subterráneo
- Modelo de recargas por riego

Las magnitudes de los flujos que efectivamente recargan al acuífero, dependen de sus permeabilidades ( $k$ ) y del volumen disponible para recibir los caudales de recarga, es decir, de la elevación de la superficie freática ( $NE$ ), con relación al nivel de terreno ( $z_t$ ) y la capacidad de almacenamiento del medio drenado.

Permeabilidades y niveles freáticos se obtienen de operar el modelo hidrogeológico, tras su calibración; por lo tanto, el modelo de recargas sólo cuantifica la recarga potencial al acuífero. La recarga efectiva viene de operar el modelo subterráneo, compatibilizando las recargas potenciales con el funcionamiento del sistema hídrico subterráneo.

### VII.2.1 Modelo de distribución de precipitaciones (MDEP)

Se dispone de datos mensuales de precipitaciones medidas y rellenadas en 22 estaciones ubicadas en el entorno del área de estudio. Se ha elaborado un modelo de distribución espacial para calcular la precipitación en cualquier punto o la precipitación promedio de un sector específico.

El dominio del MDEP coincide con la malla de diferencias finitas del MFS y por tanto es posible calcular la precipitación en cualquier celda de ese dominio, para cada mes entre 1960 y 2012. El cálculo se basa en las áreas de influencia de cada estación.

La precipitación en un mes cualquiera, en una de las celdas MFS, se calcula como el promedio ponderado entre las precipitaciones asociadas a las estaciones ubicadas en los vértices del polígono correspondiente a esa celda, pero llevadas a la elevación de la celda, es decir, corregidas según el gradiente promedio de precipitación, estimado con las precipitaciones de las estaciones de los vértices. La ponderación se obtiene de los inversos de las distancias de la celda a las estaciones asociadas. Si el gradiente de precipitación resulta negativo, no se corrige por elevación.

El MDEP fue operado para cada celda del MFS y de acuerdo a la discretización temporal requerida (lluvia semestral, según punto VII.3).

### VII.2.2 Recarga potencial por riego

El modelo para la recarga potencial por riego consiste en una planilla Excel que calcula las pérdidas promedios mensuales por aplicación del agua de riego. Para ello, se considera en cada subsector del área la especie cultivada y superficie, demanda evapotranspirativa mensual, método de riego y eficiencia en la aplicación del riego.

### VII.2.3 Caudales en cauces naturales

Se cuenta con caudales promedio mensual medidos y rellenados en la estación Estero Los Puercos en Puente Los Puercos, para un período de 53 años, entre 1960 y 2012.

Gran parte del área de estudio se encuentra aguas arriba del puente Los Puercos y se cuenta con el modelo de distribución espacial de precipitaciones, por lo cual si se discretiza el área a nivel de subcuencas, asociadas a cabeceras o tramos de esteros, es posible distribuir los caudales promedio mensual históricos de la estación mencionada, en aportes parciales asociados a las subcuencas ubicadas aguas arriba del puente en función de las áreas y las precipitaciones del modelo de distribución espacial de precipitaciones.

Según el esquema planteado, se calculó de 53 años de caudales a nivel mensual, en los puntos de interés ubicados aguas arriba de la estación fluviométrica indicada. Los caudales de cada subcuenca o zona considerada relevante, se usaron para estimar las conductancias de las celdas de tipo río (*river cells*) incorporadas en el modelo de flujo subterráneo, para simular los flujos río-napa y napa-río.

La zona ubicada aguas abajo del puente Los Puercos, se evalúa extrapolando de forma análoga a la descrita anteriormente.

#### VII.2.4 Sistema de riego

En la cuenca del estero Los Puercos, el sistema superficial de riego está constituido por el canal Pencahue y los canales derivados de éste. Dicha red cubre gran parte del área de estudio, como se aprecia en la Figura VII-3.

Los flujos en los canales dependen de la disponibilidad hidrológica y de la distribución de acciones del sistema Pencahue. El consumo de agua para riego, por otro lado, depende de las demandas evapotranspirativas de los cultivos.

En la modelación del flujo subterráneo los canales se representaron con celdas tipo río, considerando conductancias menores que las usadas en los cauces naturales.

Se cuenta con los datos de caudales del canal Pencahue en bocatoma (río Lircay). Tras un recorrido de 11 km sin entregas, el canal llega a la cuenca del estero Los Puercos sin mostrar pérdidas como resultó de 2 corridas de aforo realizadas.

La existencia y cuantía del flujo en la red de canales se determinó en función de la distribución de acciones, disponibilidad hidrológica, pérdidas por infiltración y de la demanda evapotranspirativa de los cultivos. De esa forma, se representaron y cuantificaron las pérdidas y recuperaciones en los canales.

#### VII.3 Modelo de flujo subterráneo (MFS)

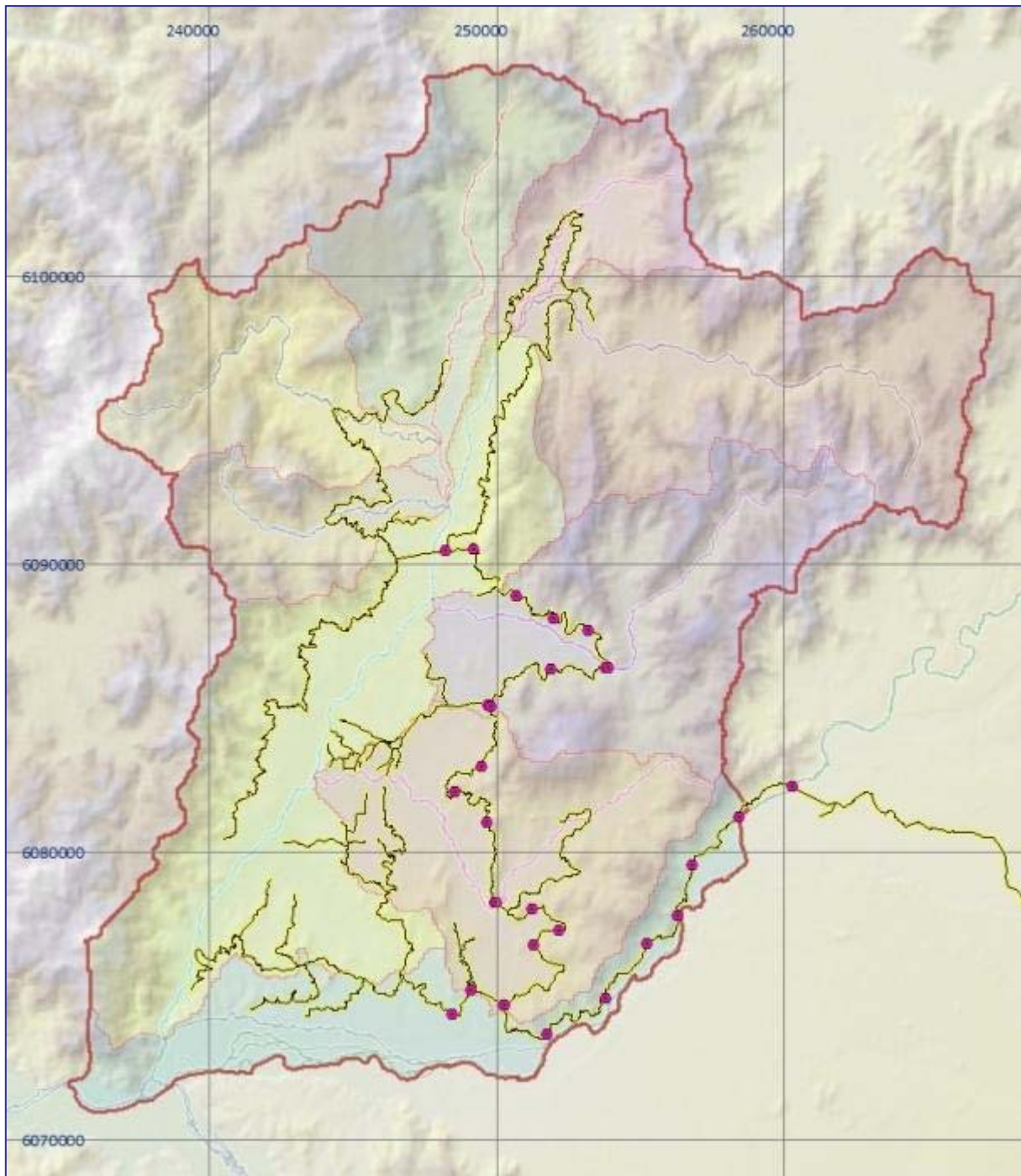
El dominio cubierto por el *MFS* corresponde a un rectángulo que incluye íntegramente la cuenca del estero Los Puercos y las riberas norte de los ríos Maule y Claro. En la Figura VII-4 se puede apreciar el dominio *MFS* señalado. Tiene una dimensión oeste-este de 34 km y una longitud sur-norte de 38 km.

La malla tiene celdas de 100·100 m, con 340 columnas y 380 filas. Se usó un estrato único de permeabilidad equivalente. En la Figura VII-4 se muestra la malla definida.

Las celdas activas de la malla (celdas con flujo) corresponden al área cubierta por la cuenca del estero Los Puercos y las riberas norte de los ríos Maule y Claro, contiguas a la cuenca del estero Los Puercos. Todo el resto del dominio *MFS* es inactivo (sin flujo).

Para mejorar la convergencia del modelo, se usó una representación de permeabilidades equivalentes y así no tener que simular estratos delgados con pendientes elevadas. Por ello si se tiene una distribución real de permeabilidades  $k$ , el modelo con espesores modificados usará una permeabilidad  $k'$ , igualando las capacidades conductivas. Tras la calibración del modelo, se realizó el proceso inverso, para obtener la distribución real de permeabilidades.

Figura VII-3. Red canal Pencahue y secciones medidas en terreno

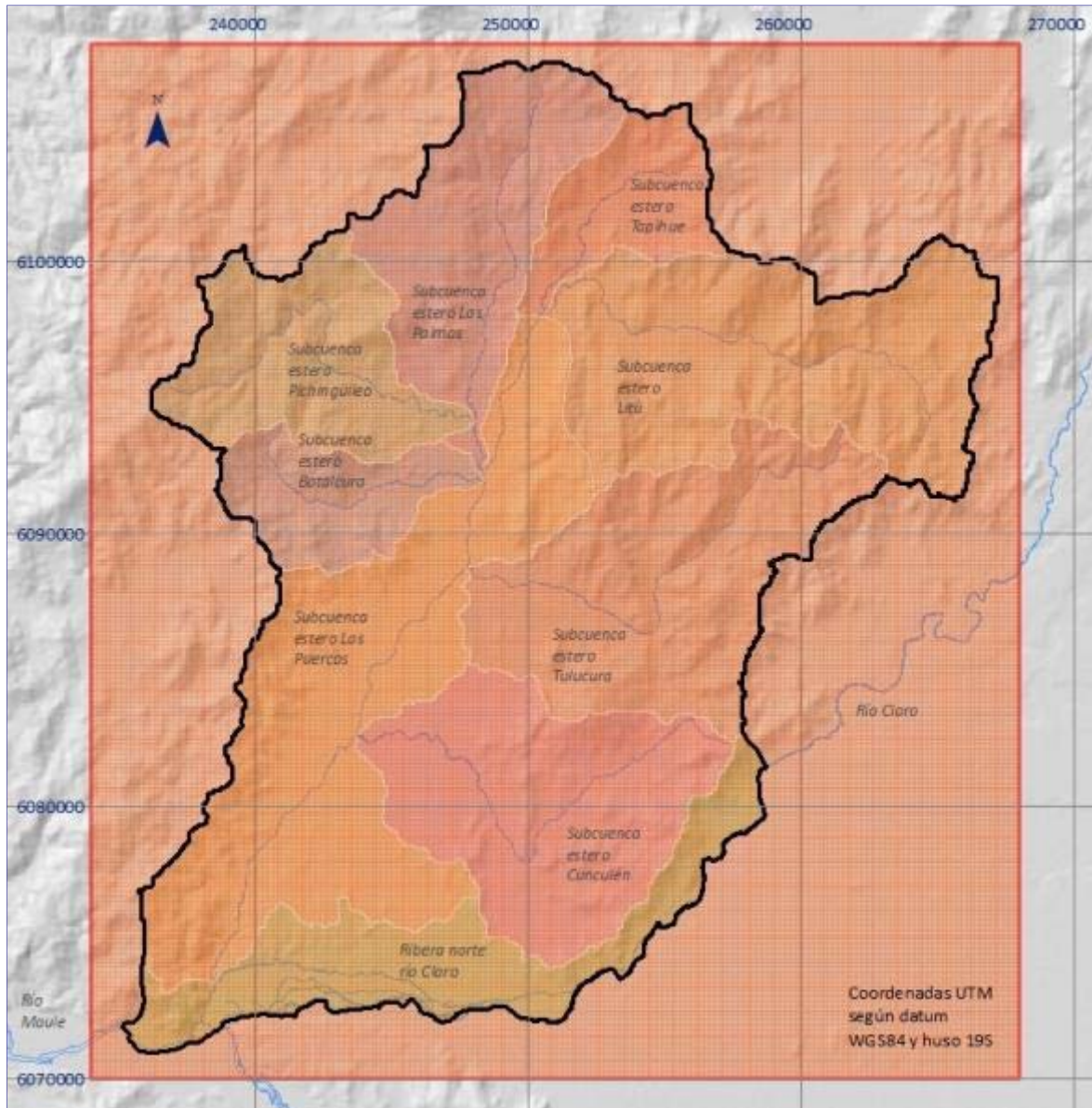


Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Se adoptó como intervalo de tiempo histórico para la modelación, el período entre 1960 y 2012; para ese lapso, se cuenta con información hidrológica completa (rellenada).

El intervalo de modelación base (*Stress Period*), se fijó en 6 meses y el período histórico quedó dividido en 105 semestres, en que los semestres coinciden con años hidrológicos comenzando en mayo.

Figura VII-4 Malla de diferencias finitas MFS

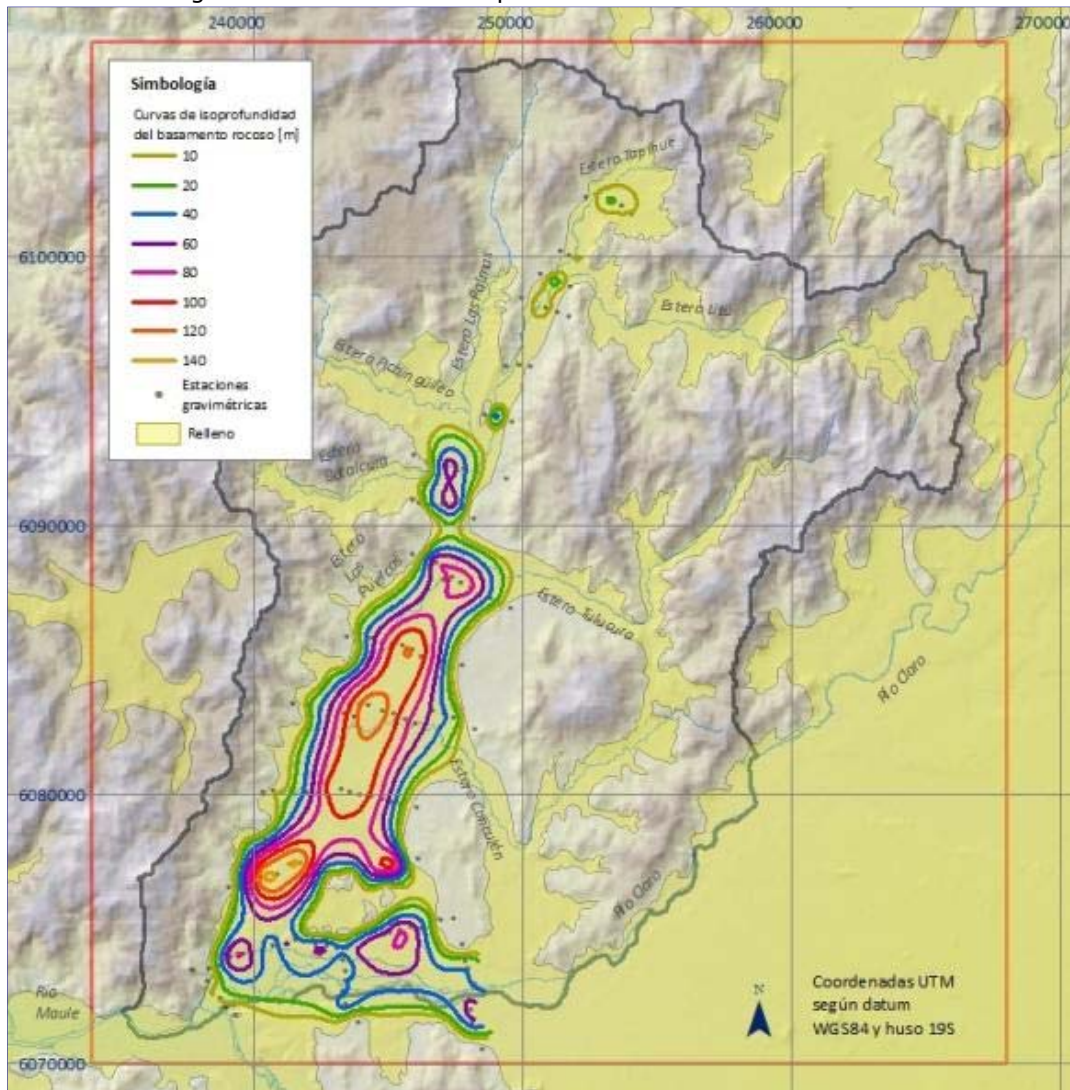


Celdas de 100·100 m. 340 columnas · 380 filas. Coordenadas UTM este: 234 a 268 km y norte: 6070 a 6108 km

Los cauces superficiales se representaron con celdas de tipo río. La variación semestral de los caudales en los cauces se representó con conductancias variables en el tiempo, proporcionales a los caudales estimados en cada tramo de cauce modelado en el MFS.

Los afloramientos se simularon usando celdas de tipo dren, ya que permiten la salida de excesos de agua y así es posible representar afloramientos, recuperaciones y vertientes.

Figura VII-5. Curvas de isoprofundidad del basamento rocoso



## VII.4 Recarga superficial

### VII.4.1 Recarga por precipitaciones

La infiltración de lluvias ocurre de manera distribuida en las áreas extendidas de los valles y de forma más concentrada, desde los cauces, donde concurre la escorrentía superficial generada por los eventos de lluvias. Esta recarga se estimó como una fracción de las precipitaciones distribuidas espacialmente y calculadas según lo explicado en VII.2.1. La proporción de la lluvia que infiltra, se determinó iterativamente, operando el modelo.

### VII.4.2 Recarga por riego

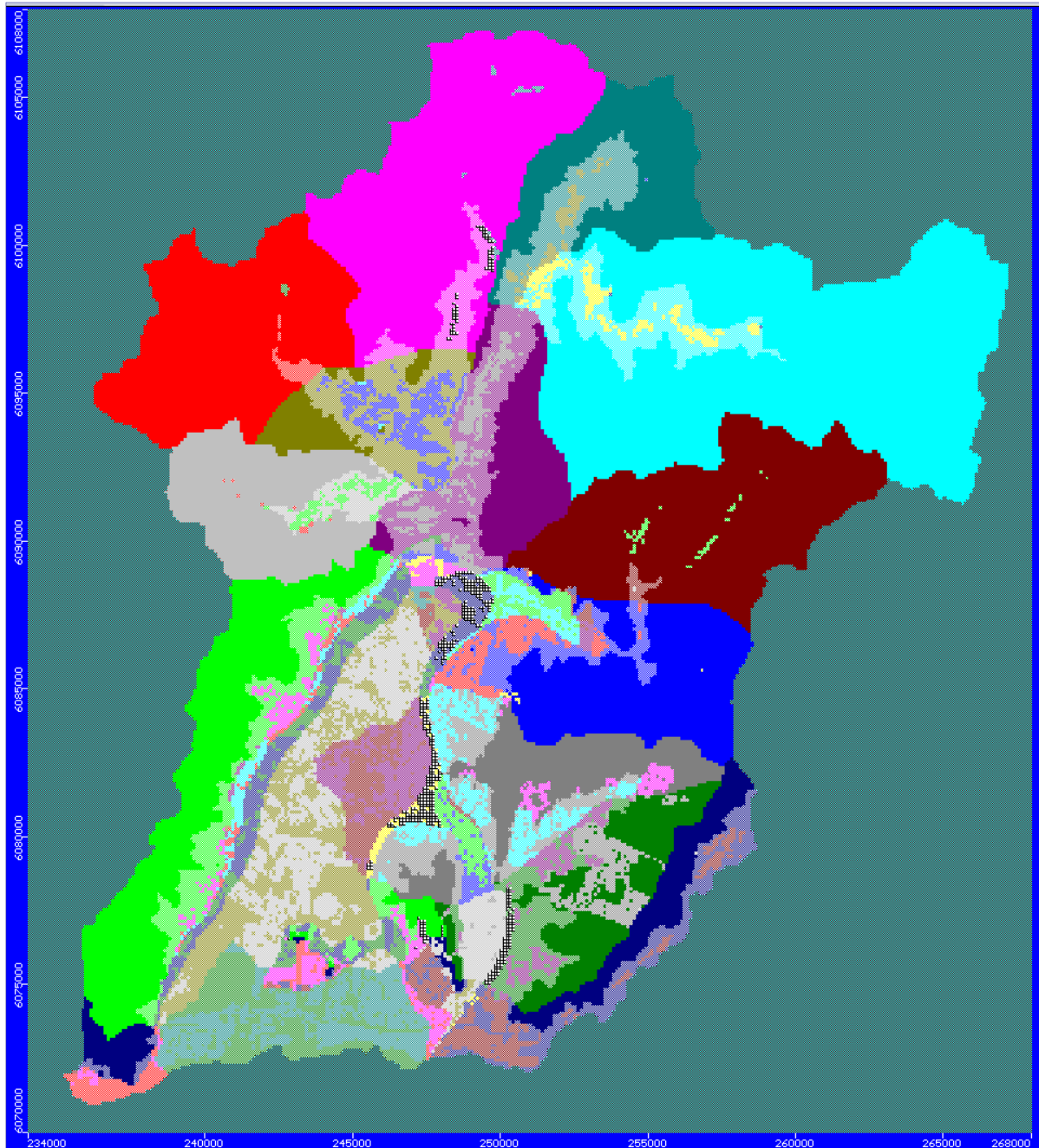
Las recargas provenientes del riego se calcularon como una fracción los sobrantes que se obtienen por ineficiencias en la aplicación del agua de riego. Ese volumen sobrante se evapora, se incorpora a los cauces superficiales o infiltra. La porción que infiltra

corresponde a la recarga superficial por riego, la que se determinó iterativamente, operando el modelo, de forma semejante al caso de la recarga por precipitación.

#### VII.4.3 Zonas de recarga en MFS

Se interseccionaron las áreas riego con las subcuencas y con las permeabilidades. De dicho proceso surgieron 96 zonas, con distintas características de permeabilidad, recarga (precipitación o precipitación+riego) y subcuenca (ver Figura VII-6).

Figura VII-6. Zonas de recarga MFS





### VII.5 Calibración en régimen permanente

Se generó la información de régimen permanente, con recargas promedio de lluvias y cauces con conductancias variables espacialmente.

Ya que sólo se cuenta con los niveles medidos durante la realización del catastro de 2013, se operó el modelo en régimen permanente y se modificaron las permeabilidades para mejorar el ajuste entre los niveles simulados con la malla de régimen permanente y los medidos en el catastro.

Se usaron 89 puntos de control, lográndose reducir el error RMS de 11.5 m a 5.5 m. Para ello, en la parte central del valle, en torno al estero Los Puercos, los valores de permeabilidad inicial fueron reducidos, con lo que se logró mejorar el ajuste.

### VII.6 Calibración en régimen impermanente

En el caso de régimen impermanente se consideró 105 intervalos semestrales (*stress periods*), que cubren entre mayo de 1960 y noviembre de 2012. Se generó la extracción histórica por bombeo desde las captaciones de agua subterránea en función de los datos obtenidos en el catastro de captaciones. La información faltante de caudales, años de construcción y frecuencia de uso, se rellenó según criterios probabilísticos.

Los coeficientes de almacenamiento se asignaron según la distribución de permeabilidad, de acuerdo a los valores de la Tabla VII-1. Por su parte, en la Figura VII-7. Calibración en régimen impermanente

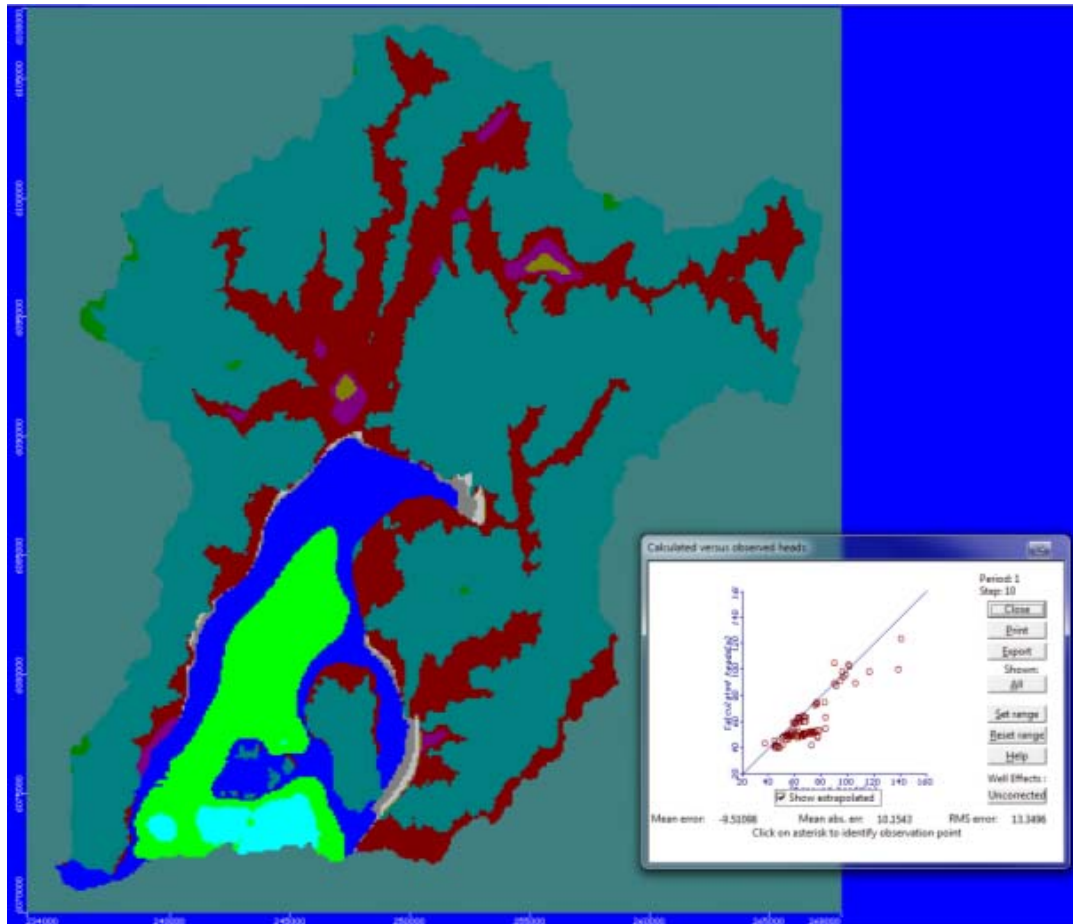


Tabla VII-1. Coeficientes de almacenamiento(S), MFS (régimen impermanente)

VMF	N°	k [m/s]	S [%]	VMF	N	k [m/s]	S [%]
	1	1.0.E-12	0.1		7	5.0.E-07	6.7
	2	1.0.E-10	2.3		8	1.0.E-06	7.5
	3	1.0.E-09	4.5		9	5.0.E-06	7.7
	4	1.0.E-08	5.3		10	1.0.E-05	7.8
	5	5.0.E-08	5.6		11	5.0.E-05	8.6
	6	1.0.E-07	6.4		12	1.0.E-04	8.9

se puede apreciar la distribución de permeabilidades obtenida, gracias al ajuste entre los niveles medidos y simulados, semejantes a los de la calibración en régimen permanente.

A pesar de que no es posible efectuar una calibración de niveles realista, debido a que no se cuenta con datos de niveles históricos o representativos de la condición pre-bombeo (régimen permanente), los modelos elaborados permiten cuantificar flujos. Los caudales que se obtienen de los balances volumétricos (*zone budgets*) son buenas aproximaciones para las magnitudes relevantes que componen el medio subterráneo.

### VII.7 Operación de MFS

Los escenarios definidos para ser evaluados por medio del modelo, son los siguientes:

*Escenario 1:* Base

*Escenario 2:* Uso actual prolongado

*Escenario 3:* Demanda futura

*Escenario 4:* Derechos constituidos

*Escenario 5:* Derechos constituidos + pendientes

A continuación se describen las principales características de cada escenario.

### VII.7.1 Escenario 1: Base

Es la simulación usada para calibrar en régimen impermanente el modelo. Abarca un período de 52.5 años (son 105 semestres) e incluye la estimación de las extracciones (ver Gráfico VII-1) y la hidrología históricas.

Figura VII-7. Calibración en régimen impermanente

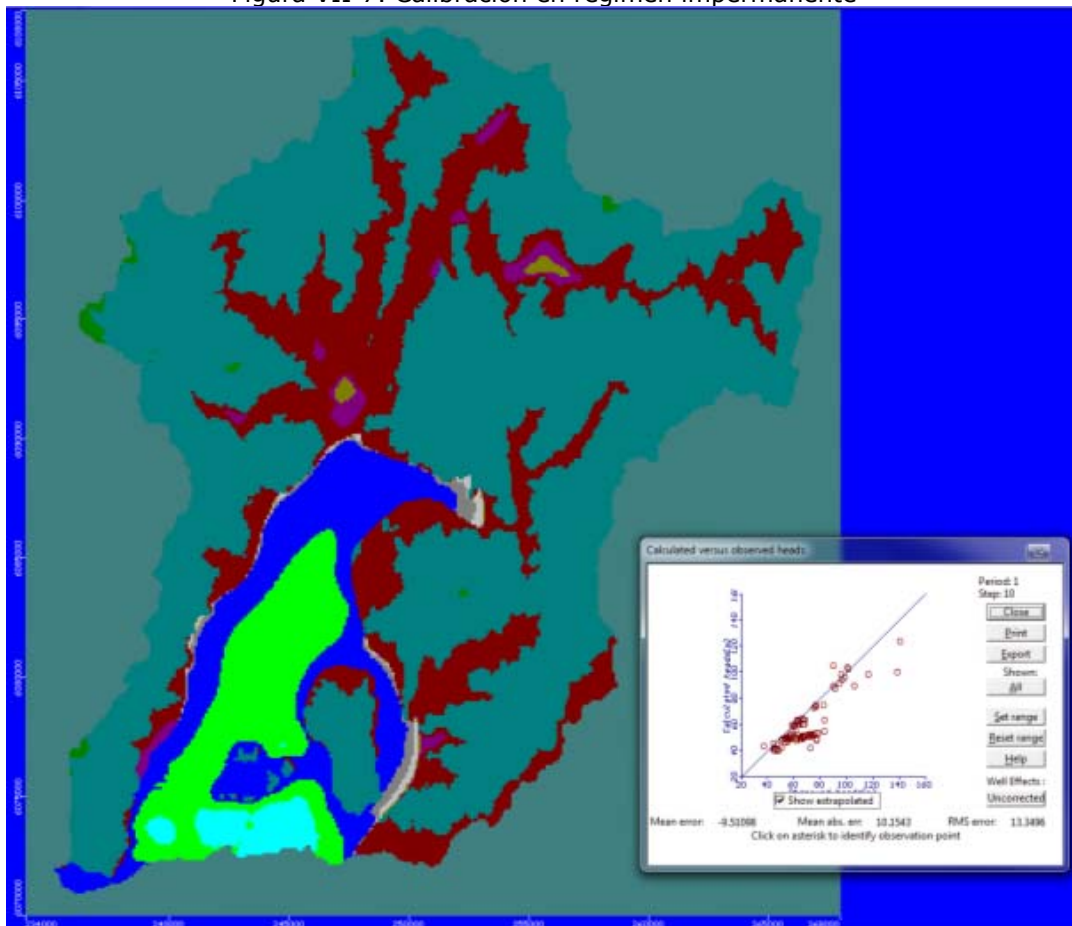


Tabla VII-1. Coeficientes de almacenamiento(S), MFS (régimen impermanente)













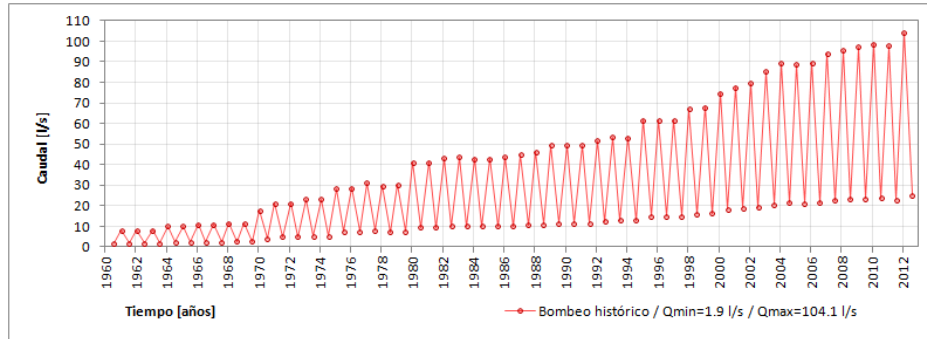
VMF	N°	k [m/s]	S [%]	VMF	N	k [m/s]	S [%]
	1	1.0.E-12	0.1		7	5.0.E-07	6.7
	2	1.0.E-10	2.3		8	1.0.E-06	7.5
	3	1.0.E-09	4.5		9	5.0.E-06	7.7
	4	1.0.E-08	5.3		10	1.0.E-05	7.8
	5	5.0.E-08	5.6		11	5.0.E-05	8.6
	6	1.0.E-07	6.4		12	1.0.E-04	8.9

Gráfico VII-1. Bombeo histórico semestral



### VII.7.2 Escenario 2: Uso actual prolongado

Este escenario consiste en una simulación de los próximos 52.5 años (ó 105 semestres), prolongando el nivel de extracción actual hacia el futuro. Las recargas incluyen las infiltraciones de precipitaciones y riego en todo el período. En el *Escenario 1*, las recargas por riego parten en 1999, con el inicio de la operación del canal Pencahue; previo a 1999, sólo hay recarga por precipitaciones.

### VII.7.3 Escenario 3: Demanda futura

Consiste en imponer un nivel de extracción futuro de acuerdo a una proyección de la demanda histórica. La proyección se realizó en función de los caudales de bombeo históricos estimados. En el Gráfico VII-2 se muestra el bombeo histórico y sus proyecciones lineales para los caudales de invierno y verano. En el Gráfico VII- se muestra el resultado obtenido.

Gráfico VII-2. Bombeo semestral

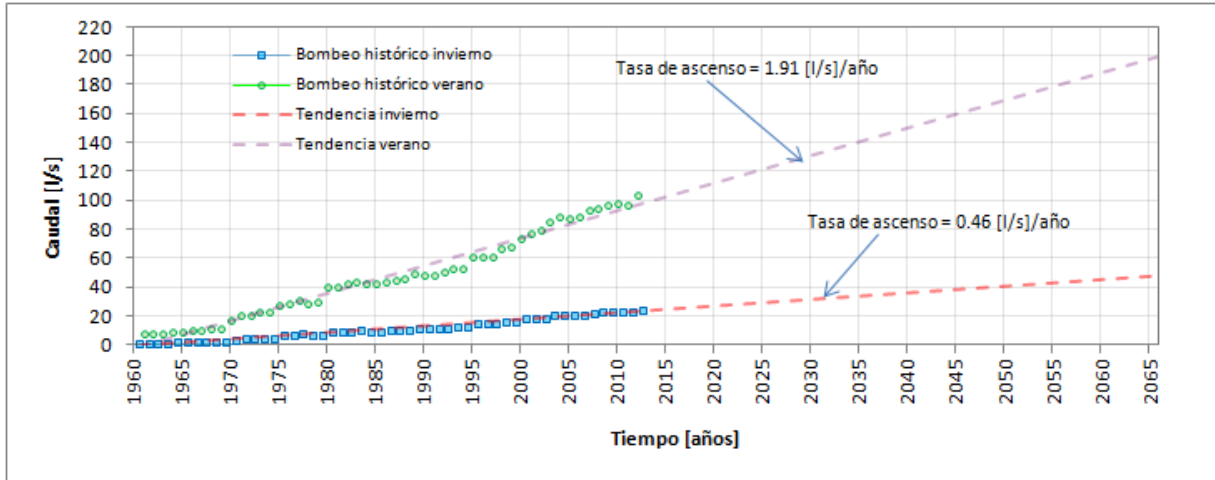
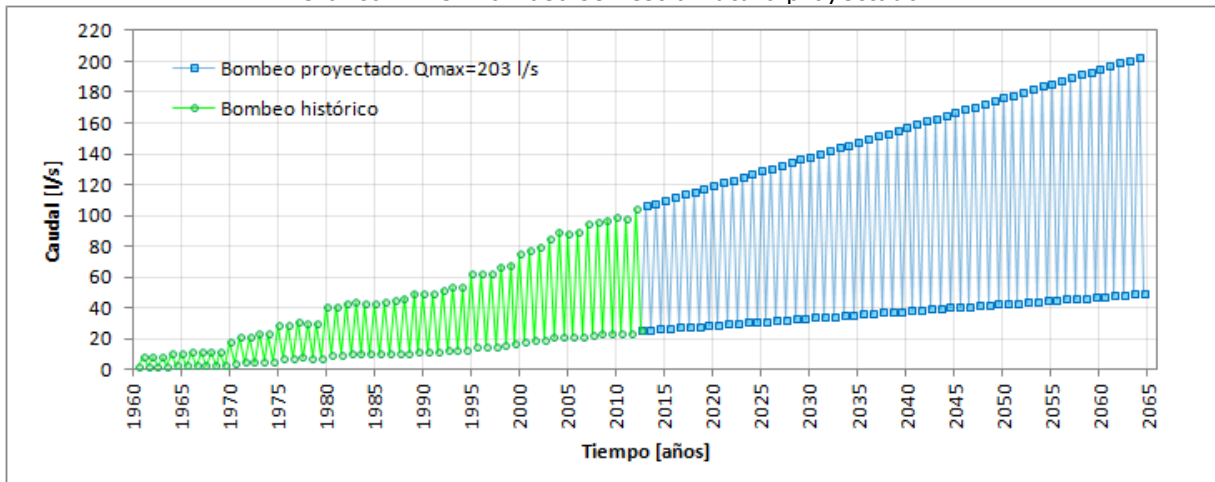


Gráfico VII-3. Bombeo semestral futuro proyectado



#### VII.7.4 Escenario 4: Derechos constituidos

En este escenario hipotético, se asumió que se extraen los caudales totales otorgados según los derechos constituidos; estos corresponden a 23 captaciones con 106.0 l/s.

#### VII.7.5 Escenario 5: Derechos constituidos + pendientes

A los bombeos del escenario anterior, se suman los correspondientes a solicitudes de derechos pendientes, lo que agrega 29 captaciones más para llegar a 215 l/s.

#### VII.8 Resultados de los escenarios simulados

En la modelación del funcionamiento histórico del sistema, representado con el MFS (Escenario 1), las recargas totales aumentan desde 1999 en adelante, debido al aporte del canal Pencahue y los cauces reciben la mayor parte de la recarga. Ésta no es

aprovechable debido a la limitada capacidad de almacenamiento del medio subterráneo y a su reducida capacidad de conducción.

La simulación del escenario 2 indica que la distribución de extracciones dada por las captaciones catastradas (situación actual), permite una explotación sustentable de 99 l/s como promedio del semestre de verano y 23.4 l/s para el semestre de invierno. Dicho límite se podría extender incorporando extracciones pequeñas ( $\approx 0.1$  a 1 l/s), pero bien distribuidas en toda la cuenca. De los resultados del escenario siguiente, se puede deducir la magnitud aproximada de dicho límite.

En el escenario 3 se impuso un bombeo creciente, partiendo de la extracción actual, pero los descensos de los niveles generaron una reducción del 15 % del caudal de verano impuesto (de 202 l/s a 172 l/s). Sin embargo, se vislumbran caudales de 172 l/s, en verano y 42 l/s, en invierno (107 l/s promedio continuo), como valores representativos del límite explotable en la cuenca del estero Los Puercos.

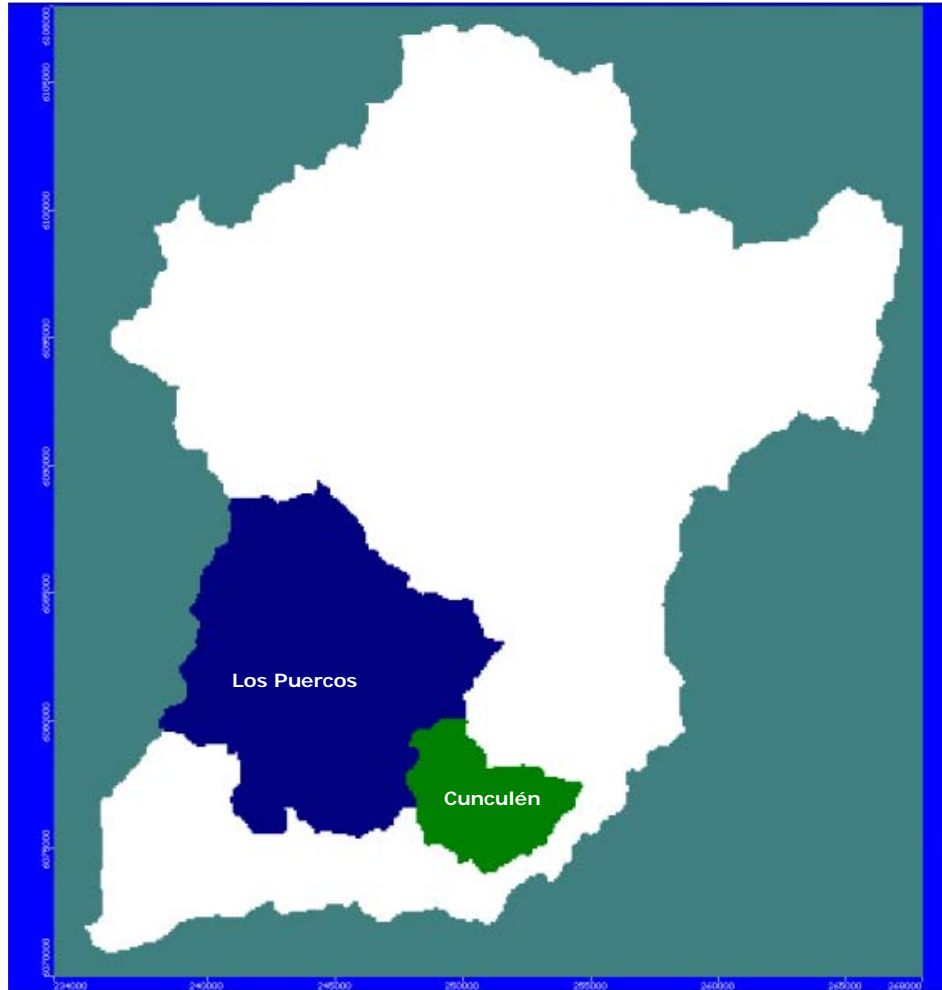
De este escenario, se deduce que una distribución de captaciones como la existente actualmente y catastrada en el presente estudio, es posible extraer un caudal continuo de la cuenca de aproximadamente 110 l/s.

Al imponer un bombeo total continuo de 106 l/s en los puntos con derechos otorgados (escenario 4), se obtienen descensos de niveles excesivos que generan el secado de las celdas que contienen a algunos de los pozos incorporados a la malla. Se realizaron iteraciones sucesivas, en cada una se redujeron los bombeos en un 50% en los 6 pozos ubicados en las celdas que se secaron.

El escenario 5 es semejante al anterior, pero con un bombeo mayor. La primera iteración consideró un bombeo continuo de 215 l/s, el que resultó excesivo, dado el número de celdas secas. Se procedió de manera análoga al escenario 4 y en la cuarta iteración se llegó a un resultado admisible, partiendo con 118 l/s que se redujeron en un 2.8 % a un caudal de 115 l/s.

Se operó además el escenario 5, incorporando volúmenes de control (*zone budgets*), coincidentes con áreas de particular interés dentro de la zona de estudio global. Éstas son las zonas denominadas Los Puercos y Cunculén (ver Figura VII-8).

Figura VII-8. Volúmenes de control en subsectores de interés (*zone budgets*)



Según la simulación efectuada, el sector Los Puercos responde bien a una solicitud de 70 l/s continuos. Por otro lado, el sector Cunculén, es bastante más limitado. Se logró imponer un bombeo de 12 l/s continuo. Pero, la recarga es insuficiente y existe aporte río-acuífero.

Balance promedio sector Los Puercos [l/s]

Entrada subterránea	Recarga	Vaciado de almacenamiento	Total entradas	Salida subterránea	Acuífero-estero	Afloramientos	Bombeo	Total salidas
12.27	152.00	3.00	167.3	31.11	66.00	1.00	69.70	167.8

Balance promedio sector Cunculén [l/s]

Entrada subterránea	Recarga	Río-Acuífero	Vaciado de almacenamiento	Total entradas	Salida subterránea	Afloramientos	Bombeo	Total salidas
0.58	2.99	6.10	3.86	13.53	1.12	0.00	12.41	13.53

## VIII Conclusiones y recomendaciones

Los principales resultados del estudio se relacionan con el potencial hidrogeológico del área, cuantificado en cada uno de los escenarios evaluados.

La cuenca del estero Los Puercos presenta condiciones favorables en cuanto a la escorrentía superficial, dado que en los períodos invernales, las precipitaciones originan flujos en las quebradas y esteros existentes en el área. En los meses veraniegos, el riego posibilitado por el trasvase del canal Penciahue, incrementa el flujo en los cauces debido al retorno de los excedentes del riego. El caudal de lluvia promedio histórico (1960-2012), para la zona de estudio de, se estimó en 16.1 m<sup>3</sup>/s. El caudal de riego promedio alcanza a 3.4 m<sup>3</sup>/s, para el período en el que la cuenca ha sido abastecida por el canal Penciahue (desde 1999 a la fecha).

Sin embargo, dicha disponibilidad superficial, no se materializa como recarga a los acuíferos, debido a las limitadas propiedades de almacenamiento (S) y conductividad hidráulica (k). Se operó repetidamente la malla MFS correspondiente al período histórico (Escenario 1), para distintos valores de recarga y la mayor parte de ésta retorna al sistema superficial a través de flujos acuífero-cauces y afloramientos superficiales.

Para el período con riego desde 1999, la recarga promedio fue de 280 l/s. Las variaciones en el tiempo de la recarga se pueden apreciar en los resultados de cada escenario.

Al operar los escenarios 4 y 5, de derechos otorgados y derechos otorgados+pendientes, se debió reducir progresivamente los caudales impuestos para evitar descensos excesivos de los niveles. Los valores reducidos de los parámetros k y S, imposibilitan extracciones prolongadas y continuas de caudales sobre 10 a 20 l/s. No obstante, es posible extraer desde pozos con capacidad suficiente, caudales de esos montos de forma intermitente, como es en los pozos que se usan para riego, que bombean de forma intensa en verano.

La extracción máxima admisible de forma continua y sustentable varía entre 110 y 115 l/s. Esos valores se deducen de los escenarios 3 y 5. Se podría llegar a un caudal total de 150 l/s si distribuyen las captaciones en la cuenca, pero captando caudales pequeños (<2 l/s) y estacionalmente variables (uso riego, variable entre invierno y verano).

Los resultados del modelo son representativos del área en términos de caudales. En cuanto a los niveles, los modelos permiten generar superficies freáticas aproximadas, por no tener datos de niveles medidos, como para hacer una mejor calibración transiente.

Los caudales que se obtienen de los balances volumétricos (*zone budgets*), son buenas aproximaciones para las magnitudes relevantes que componen el medio subterráneo. Se recomienda incorporar algunas captaciones de la cuenca a la red de monitoreo de la DGA para contar con puntos de control en el futuro.

Los subsectores analizados de forma particular (Los Puercos y Cunculén) admiten extracciones continuas de 70 y 12 l/s, respectivamente. Si se considera de forma simplificada que el uso del agua subterránea es principalmente el riego, la estacionalidad de dicho uso, permitiría derechos de 280 y 48 l/s, suponiendo que las captaciones se usan un 25 % del tiempo.