



**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**

**INFORME FINAL**

**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 .....	6
II	Recopilación de antecedentes.....	8
II.1	Referencias bibliográficas .....	8
II.1.1	Referencia bibliográfica N°1.....	8
II.1.1.a	Objetivo y resumen del documento .....	9
II.1.1.b	Utilidad para el presente trabajo.....	9
II.1.2	Referencia bibliográfica N°2.....	9
II.1.2.a	Objetivo y resumen del documento .....	10
II.1.2.b	Utilidad para el presente trabajo.....	10
II.1.3	Referencia bibliográfica N°3.....	11
II.1.3.a	Objetivo y resumen del documento .....	11
II.1.3.b	Utilidad para el presente trabajo.....	12
II.2	Pruebas de bombeo .....	12
II.2.1	Datos de pruebas de gasto variable .....	12
II.2.2	Datos de pruebas de gasto constante .....	12
II.3	Red canal Pencahue.....	12
III	Hidrología.....	15
III.1	Red de drenaje .....	15
III.2	Precipitaciones.....	17
III.3	Relleno de precipitaciones .....	19
III.4	Fluviometría .....	24
III.5	Relleno de caudales .....	27
III.6	Análisis probabilístico.....	31
III.7	Aforos.....	33
III.7.1	Aforos complementarios.....	35
IV	Calidad físico-química del agua .....	37
IV.1	Aguas superficiales.....	37
IV.2	Aguas subterráneas .....	37
IV.3	Caracterización de la calidad del agua.....	40
V	Hidrogeología.....	41
V.1	Geofísica .....	41
V.2	Catastro de captaciones subterráneas .....	42
V.3	Geología.....	46
V.3.1	Geología regional .....	46
V.3.2	Planos hidrogeológicos de SERNAGEOMIN .....	49
V.3.3	Corrección según gravimetría .....	49

V.4	Geometría acuífera .....	51
V.4.1	Delimitación en planta .....	51
V.4.2	Geometría vertical .....	51
V.5	Propiedades físicas de los acuíferos .....	56
V.5.1	Interpretación de pruebas de gasto variable .....	56
V.5.2	Interpretación de pruebas de gasto constante.....	58
V.5.3	Valores adoptados .....	58
V.6	Niveles de agua subterránea.....	61
V.7	Flujos subterráneos .....	65
VI	Demandas hídricas .....	67
VI.1	Estudio agronómico (demandas de riego) .....	67
VI.1.1	Distribución de cultivos .....	67
VI.1.2	Variables agroclimáticas.....	69
VI.1.3	Demandas por subcuenca.....	70
VI.2	Uso actual de las aguas subterráneas .....	74
VI.2.1	Construcción de Captaciones en el Tiempo .....	75
VI.2.2	Uso efectivo del agua subterránea .....	75
VII	Modelos .....	78
VII.1	Modelo conceptual del sistema acuífero.....	78
VII.2	Modelo de recargas .....	83
VII.2.1	Modelo de distribución de precipitaciones ( <i>MDEP</i> ).....	84
VII.2.2	Recarga potencial por riego .....	87
VII.2.3	Caudales en cauces naturales .....	87
VII.2.4	Sistema de riego .....	89
VII.3	Modelo de flujo subterráneo (MFS) .....	92
VII.3.1	Dominio .....	92
VII.3.2	Malla .....	92
VII.3.3	Zonas activas e inactivas .....	92
VII.3.4	Dimensión vertical.....	96
VII.3.5	Permeabilidad equivalente.....	97
VII.3.6	Discretización temporal .....	102
VII.3.7	Caudales superficiales .....	102
VII.3.8	Afloramientos .....	102
VII.3.9	Recarga superficial .....	106
VII.3.9.a	Precipitaciones .....	106
VII.3.9.b	Riego .....	106
VII.3.9.c	Zonas de recarga en MFS.....	106

VII.3.10	Calibración en régimen permanente .....	109
VII.3.11	Calibración en régimen impermanente .....	109
VII.3.12	Operación MFS.....	113
VII.3.12.a	Escenario 1: Base .....	113
VII.3.12.b	Escenario 2: Uso actual prolongado .....	113
VII.3.12.c	Escenario 3: Demanda futura .....	114
VII.3.12.d	Escenario 4: Derechos constituidos .....	115
VII.3.12.e	Escenario 5: Derechos constituidos + pendientes.....	116
VII.3.12.f	Resultados de Escenario 1 .....	116
VII.3.12.g	Resultados de Escenario 2 .....	116
VII.3.12.h	Resultados de Escenario 3 .....	117
VII.3.12.i	Resultados de Escenario 4 .....	117
VII.3.12.j	Resultados de Escenario 5 .....	117
VII.3.12.k	Resultados de Escenario 5 en subsectores .....	124
VIII	Conclusiones y recomendaciones .....	128
IX	Hitos administrativos .....	130
IX.1	Reunión de coordinación de etapa 1 .....	130
IX.2	Presentación de etapa 1 .....	130
IX.3	Reunión de coordinación de etapa 2 .....	130
IX.4	Presentación de etapa 2 .....	130
IX.5	Reunión de coordinación de etapa 3 .....	130
IX.6	Presentación de etapa 3 .....	130
X	Bibliografía .....	131

## **I Generalidades**

En el presente informe se describen las actividades realizadas durante el desarrollo del estudio "Modelación hidrogeológica cuenca estero Los Puercos, Región del Maule".

El estudio incluye temas de hidrología, geología, hidrogeología y la 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 antes mencionadas, se logró entender el funcionamiento del sistema acuífero, lo que permitió elaborar el modelo conceptual.

Se estudió la red de drenaje y riego superficial, se identificaron las zonas cultivadas (con Google Earth) 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.

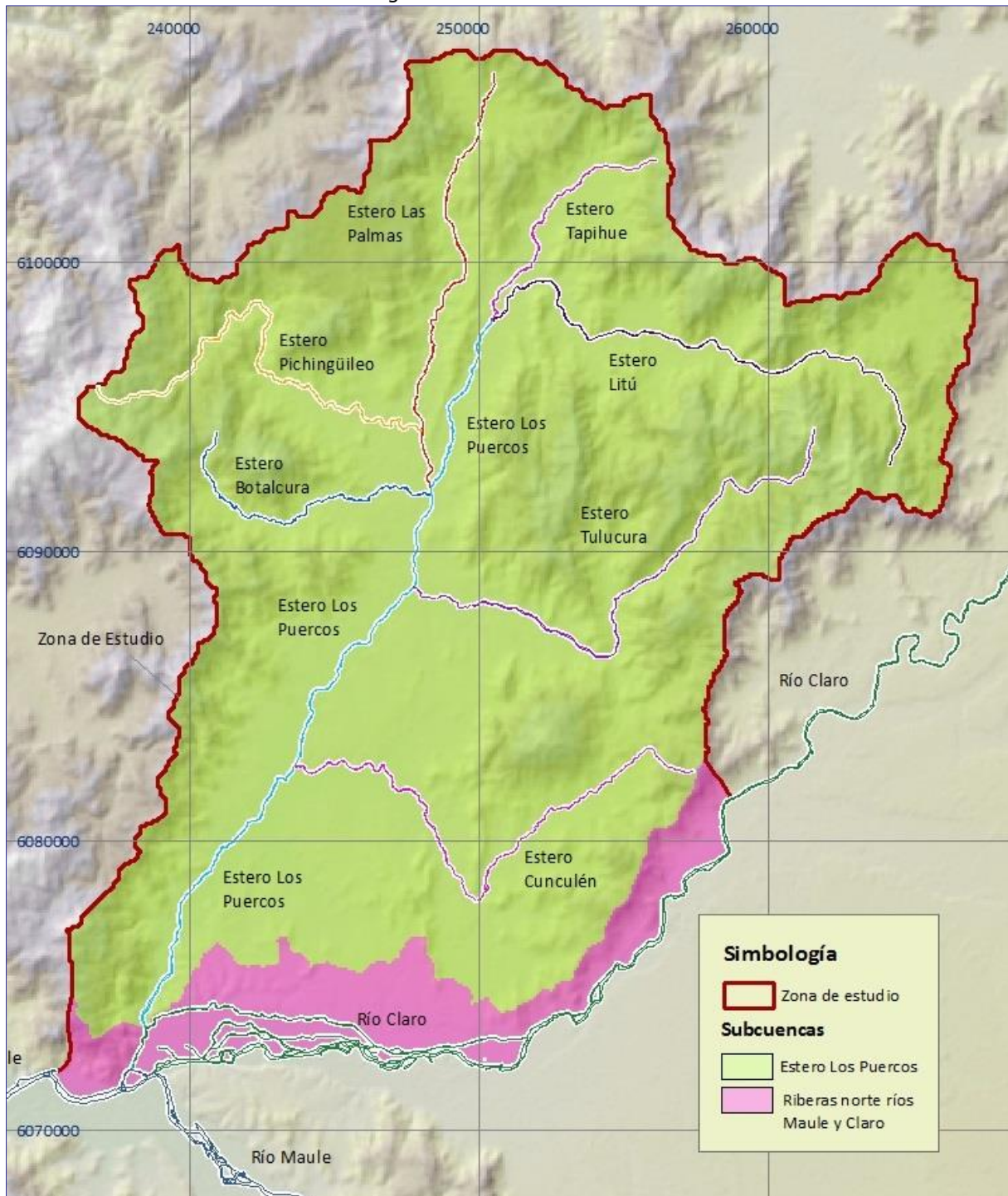
Uno de los principales objetivos del trabajo fue analizar el funcionamiento del sistema subterráneo para distintos escenarios, lo que se logró con la operación del modelo de flujo subterráneo para 5 escenarios, con distintas condiciones de extracción.

---

<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

En el presente capítulo se describen los siguientes estudios que serán de utilidad para el presente 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 la siguiente tabla se resumen los contenidos abordados en cada referencia revisada.

Tabla II-1. Resumen de contenidos en referencias bibliográficas

Nº Referencia	Hidrología	Hidrogeología	Geología	Clima	Suelos
1	x	x	x	x	x
2	x	x	x		x
3	x	x			x

A continuación se describen las referencias consultadas:

#### II.1.1 Referencia bibliográfica N°1

<b>Referencia bibliográfica N°1</b>	
Título	: Estudio Hidrogeológico del secano interior y costero. Regiones VI, VII y VIII. Sector Cauquenes - Belco - Pocillas
Tipo de Documento	: Estudio
Autor	: GCF INGENIEROS CONSULTORES LTDA.
Mandante	: Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (IICA).
Fecha Edición	: Noviembre 2001.
Cuencas	: Cauquenes - Belco
Provincia	: Cauquenes.
Región	: Región del Maule (VII).



### **II.1.1.a Objetivo y resumen del documento**

El objetivo del estudio fue promover sistemas de producción sustentables que permitieran la generación de ingresos tanto a corto como a mediano plazo, mediante la incorporación del riego en predios de pequeños agricultores. Para ello, el estudio se orientó al análisis hidrogeológico de 15 cuencas ubicadas en el sector de secano interior y costero de las Regiones VI, VII y VIII, entre ellas la del río Cauquenes y la del estero Belco.

El trabajo incluye además estudios hidrológico, geológico y agronómico. El resultado final fue proponer captaciones de aguas subterráneas, en predios pequeños con superficies menores a 12 hectáreas para promover el riego básico.

### **II.1.1.b Utilidad para el presente trabajo**

La información hidrológica disponible incluye:

- i) Precipitación mensual rellenada de la estación Cauquenes (1943-2000) y Penciahue (1950- 2000).
- ii) Fluviometría observada en la estación Los Puercos en Puente los Puercos (1986-1999)
- iii) Datos de evapotranspiración para el año 1993.

El resto de la información será usada para complementar el presente trabajo; ésta incluye hidrogeología, geología (plano geológico), geofísica, catastro de pozos, tipos de suelos, calidad del agua.

### **II.1.2 Referencia bibliográfica N°2**

<b>Referencia bibliográfica N°2</b>	
Titulo	: Diagnóstico de recursos hídricos y Costero VI a VIII Región.
Tipo de Documento	: Estudio
Autor	: AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.
Mandante	: Dirección de Riego
Fecha Edición	: Noviembre 2003
Cuenca	: Cuencas del secano costero de las VI, VII y VIII regiones
Provincia	: Todas de las Regiones.
Región	: VI, VII y VIII Regiones

### **II.1.2.a      Objetivo y resumen del documento**

Este estudio tuvo como objetivo principal analizar y definir una lista prioritaria de 9 proyectos para postular a los beneficios de la Ley N°18.450 de fomento a la inversión en riego y que permitan un mejor aprovechamiento del secano las regiones VI, VII y VIII.

El análisis se basó en la cuantificación de la disponibilidad de recursos hídricos, presencia de suelos aprovechables con desarrollo potencial, además de aspectos socio-económicos de los agricultores del secano.

Con respecto a la disponibilidad de recursos hídricos, se identificaron zonas de interés, donde existe la posibilidad de utilizar aguas superficiales como fuente de abastecimiento.

De manera análoga, se identificaron sectores con potencial hidrogeológico, específicamente fuentes subterráneas con caudales esperados por sobre los 10 l/s.

Uno de los objetivos específicos fue presentar información y mapas digitalizados para toda el área de estudio.

Finalmente, se priorizaron proyectos propuestos, según la disponibilidad hídrica, su factibilidad de concreción y los beneficios asociados.

### **II.1.2.b      Utilidad para el presente trabajo**

El estudio hidrológico incluye análisis mensual y anual de precipitaciones (período 1941/1942 a 2000/2001), de estaciones representativas de cada una de las regiones. Particularmente, para la Región del Maule, se usaron las estaciones: Iloca, Curepto, Pencahue, Constitución, Chanco y Cauquenes. Con esos datos, se realizaron análisis de frecuencia y curvas de duración.

Se estudiaron las precipitaciones máximas, permitiendo obtener las precipitaciones máximas en todas las estaciones para duraciones desde 1 a 72 horas y frecuencias de 1 a 200 años.

Se efectuaron aforos.

Los restantes contenidos serán de utilidad para el presente trabajo e incluyen:

El estudio hidrogeológico incluyó el cálculo de parámetros como permeabilidad y transmisibilidad, además se realizó un catastro de captaciones de aguas subterráneas (situación legal, ubicación y usos), basado en antecedentes anteriores y verificación en terreno en algunos sectores.

Se realizó un estudio de geología regional del secano costero e interior sin considerar la cordillera de los Andes. Se desarrolló un estudio de suelos, basado en estudios anteriores (Ciren-Corfo, CNR, DOH, etc.). Se elaboró un estudio agroclimático de la Región del Maule.

Se realizó exploración geofísica (ver punto V.1).

Finalmente, se realizó una caracterización de la calidad física y química de las aguas superficiales y subterráneas de las tres Regiones contempladas, basada en antecedentes anteriores. Para tal efecto, fueron considerados los parámetros más incidentes en el uso agrícola del agua principalmente y otros relacionados con el uso potable del agua.

### II.1.3 Referencia bibliográfica N°3

<b>Referencia bibliográfica N°3</b>	
Titulo	: Modelación Hidrológica de Cuencas Pluviales, Hoya Hidrográfica del río Maule.
Tipo de Documento	: Estudio
Autor	: Departamento de Estudios y Planificación y Universidad de Chile.
Mandante	: MOP
Fecha Edición	: Diciembre 2005
Cuenca	: Del río Maule
Provincia	: Talca, Linares y Cauquenes.
Región	: Región del Maule (VII)

#### II.1.3.a *Objetivo y resumen del documento*

El objetivo principal de este estudio fue analizar para 3 cuencas pluviales de la hoya hidrográfica del río Maule (Catillo, Los Puercos y Purapel), el comportamiento del modelo SIMED (Modelo de simulación de escorrentía diaria) y contrastarlo con el modelo Sacramento, usado en la cuenca del río Catillo.

Se plantea como objetivo analizar la posibilidad de utilizar modelos para sintetizar series de caudales en cuencas sin observaciones fluviométricas, de forma realista.

El modelo de simulación SIMED considera en el ciclo hidrológico los procesos de evapotranspiración, infiltración, almacenamiento de humedad, generación de escorrentía directa, percolación profunda y flujo base.

Por su parte, el modelo Sacramento es un modelo hidrológico conceptual basado en un sistema de percolación, almacenamiento de la humedad del suelo, drenaje y evapotranspiración. Este modelo supone que la lluvia cae sobre dos tipos de área de la cuenca; una permeable, en donde se desarrollan todos los procesos de infiltración, percolación, etc., y otra área impermeable (fija y variable), donde la lluvia aporta directamente al flujo de los cauces naturales de la cuenca.

Es importante señalar que se logró el objetivo de calibrar de manera aceptable los modelos de la cuencas estudiadas para el modelo SIMED, además se concluyó que el modelo SACRAMENTO, al presentar mayor número de parámetros a calibrar en

comparación con el modelo SIMED, permite una mejor definición de la señal simulada, pero aumenta el grado de dificultad de calibración y la obtención de los valores iniciales de los parámetros.

En este documento se destaca, como conclusión del trabajo realizado, que resulta más productivo trabajar con una teoría que represente adecuadamente los procesos hidrológicos, considerando sólo los parámetros más relevantes, en comparación al uso de modelos más complejos con muchos parámetros.

Otra de las conclusiones es que el modelo SIMED no representa tan bien las recesiones como el modelo SACRAMENTO, mientras que por otro lado, la metodología para determinar los valores iniciales de los parámetros del modelo SIMED es más rápida y robusta, además de tener un mayor grado de certidumbre con respecto a la determinación de los valores iniciales de los parámetros del modelo SACRAMENTO.

### **II.1.3.b Utilidad para el presente trabajo**

Es importante señalar que una de las cuencas seleccionadas corresponde a la cuenca pluvial del Estero Los Puercos, la cual es de interés del presente trabajo. Esta cuenca está controlada por la estación Estero Los Puercos en Puente Los Puercos y este estudio presenta las estadísticas mensuales de caudales en esta estación (20/02/1986 - 31/08/2004).

Además, se presenta información pluviométrica diaria rellenada y completada de la estación meteorológica Pencahue (01/06/1986 - 31/10/2004).

Adicionalmente, se determinaron parámetros geomorfológicos de la cuenca en estudio (cuenca del Estero Los Puercos). Se obtuvieron los valores de los principales parámetros para la determinación del hidrograma unitario sintético, además de valores asociados a la evaporación en la zona de estudio y valores asociados a parámetros de infiltración (según el método de Green-Ampt.) junto con parámetros del suelo.

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

### **II.2.1 Datos de pruebas de gasto variable**

En el *Anexo 7: Planos de construcción y datos de pruebas de gasto variable*, se incluyen los planos de construcción y datos de pruebas de bombeo de gasto variable recopilados. La información fue obtenida de expedientes, estudios anteriores y bases de información de este consultor.

### **II.2.2 Datos de pruebas de gasto constante**

En el *Anexo 8: Datos de pruebas de gasto constante*, se presentan los datos de pruebas de bombeo de gasto constante de captaciones de agua subterránea recopilados. La información fue obtenida de expedientes de solicitudes de derechos de aguas subterráneas.

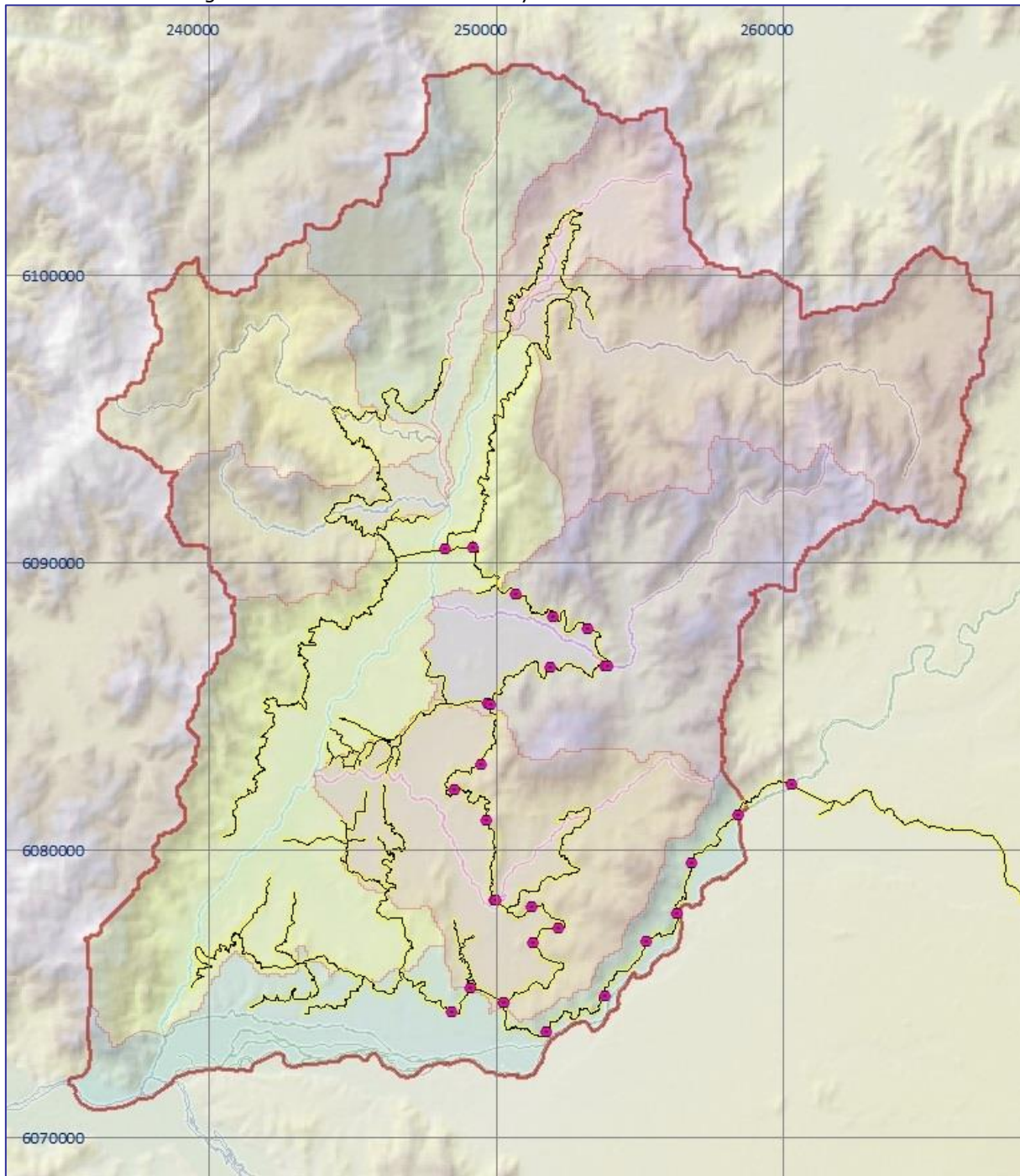
## **II.3 Red canal Pencahue**

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 Penciahue, en el que se registraron las principales características de las secciones y sus coordenadas UTM. En el *Anexo 6: Medición en terreno de secciones de canal Penciahue* se presentan las fichas con los datos recopilados.

En la Figura II-1 se puede apreciar el trazado de la red de canales y las secciones medidas. Dicha labor se encuentra en ejecución y en la figura se puede apreciar el avance a la fecha. 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**

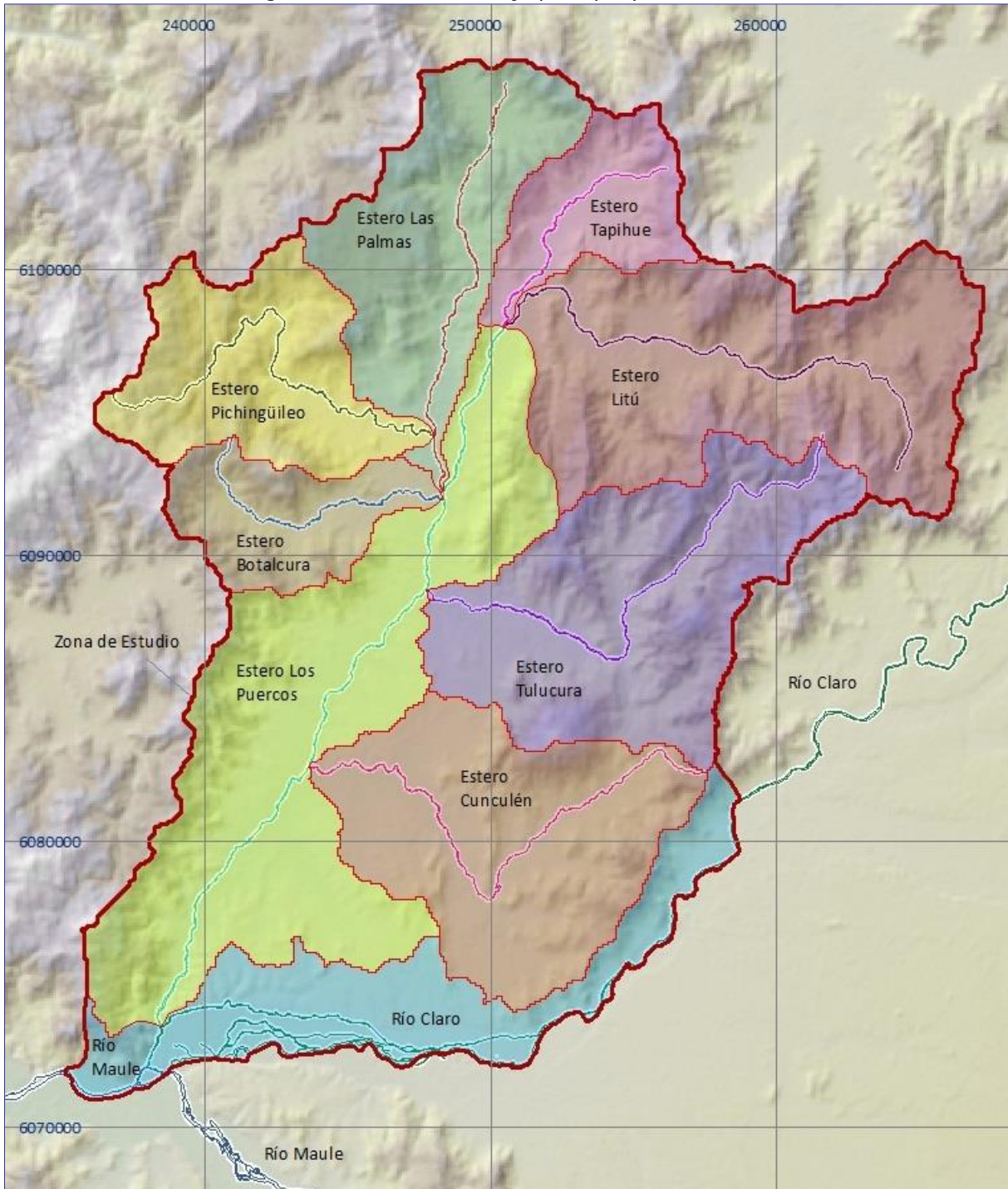
#### **III.1 Red de drenaje**

En la Figura III-1 se pueden apreciar las subcuencas incluidas en el presente estudio. De norte a sur, se cuentan 7 subcuencas principales, afluentes al estero los Puercos:

- i) Estero Las Palmas
- ii) Estero Tapihue
- iii) Estero Litú
- iv) Estero Pichingüileo
- v) Estero Botalcura
- vi) Estero Tulucura
- vii) Estero Cunculén

Dentro del área de interés se incluyó además, las riberas norte de los ríos Maule y Claro, dado que éstos constituirán condiciones de borde del modelo de flujo subterráneo.

Figura III-1. Red de drenaje principal y subcuencas



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



### III.2 Precipitaciones

En la Figura III-4 se muestran las estaciones meteorológicas de la DGA en el entorno del área de estudio (30 estaciones). Se han diferenciado las 22 estaciones usadas en el modelo de relleno de estaciones mensuales. En la Tabla III-1 se presentan las estaciones seleccionadas y los períodos cubiertos por cada una de ellas. Las estaciones Talca y Talca U.C., dada su proximidad y la complementariedad de sus registros, se consideraron como una estación única en el modelo de precipitaciones (Talca + Talca U.C.).

Las estaciones meteorológicas seleccionadas para el modelo de relleno, fueron elegidas 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. Todas las estaciones ubicadas dentro de esa envolvente, fueron usadas en el modelo de relleno.

Tabla III-1. Estaciones meteorológicas

Nº	Nombre de la estación	Coordenada UTM este [m]	Coordenada UTM norte [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-2. Estaciones meteorológicas



### III.3 Relleno de precipitaciones

Se rellenaron las precipitaciones mensuales medidas en las 21 estaciones seleccionadas (ver Figura I-1). Se elaboró un modelo estocástico multivariado, programado con *MatLab* versión *R2013a*. El modelo desarrollado 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, dependen de la calidad de la correlación entre ambas. En el *Anexo 1: Modelo para relleno de series hidrológicas*, se detalla el procedimiento empleado.

En la Figura III-3 se muestran los resultados obtenidos para las estaciones Gualleco y Péncahue. En los gráficos se puede observar que los datos rellenados mantienen las tendencias de los tramos medidos en cuanto a distribución y meses sin precipitaciones.

En el *Anexo 2: Relleno de precipitaciones mensuales*, se presentan los resultados del proceso realizado, de forma tabulada y para las 21 estaciones seleccionadas.

Si la correlación es baja o los datos medidos son insuficientes, el modelo no entrega resultados. Esto ocurre cuando la matriz de correlaciones no es semidefinida positiva. Los resultados se revisan visualmente, graficándolos; se verifica que los datos rellenados muestren tendencias y valores consistentes con los datos medidos. Por ello, se recurre a gráficos detallados, como los presentados en la Figura III-3.

Figura III-3. Relleno de precipitaciones mensuales



Figura III-3. Relleno de precipitaciones mensuales (continuación)

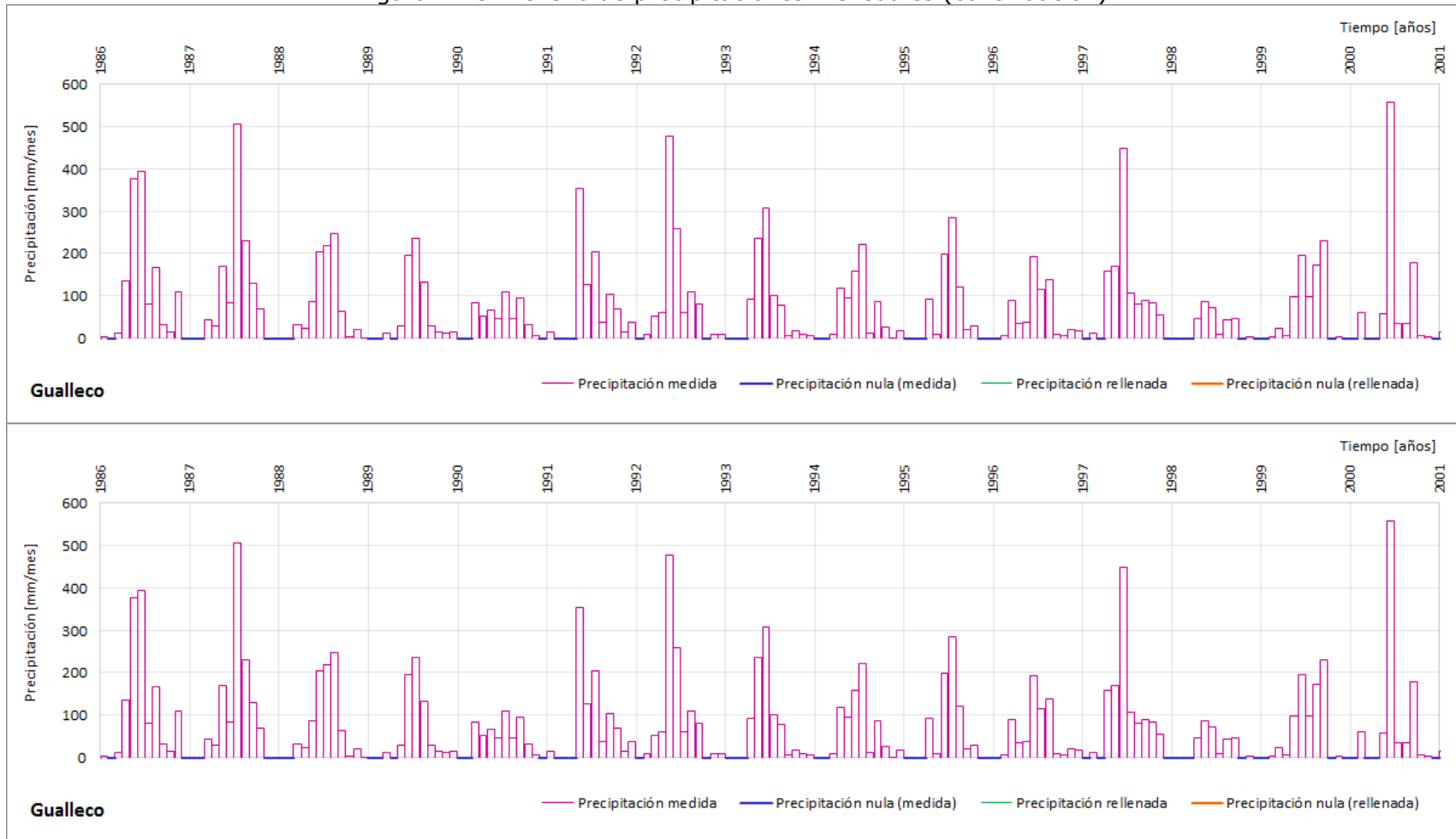


Figura III-3. Relleno de precipitaciones mensuales (continuación)

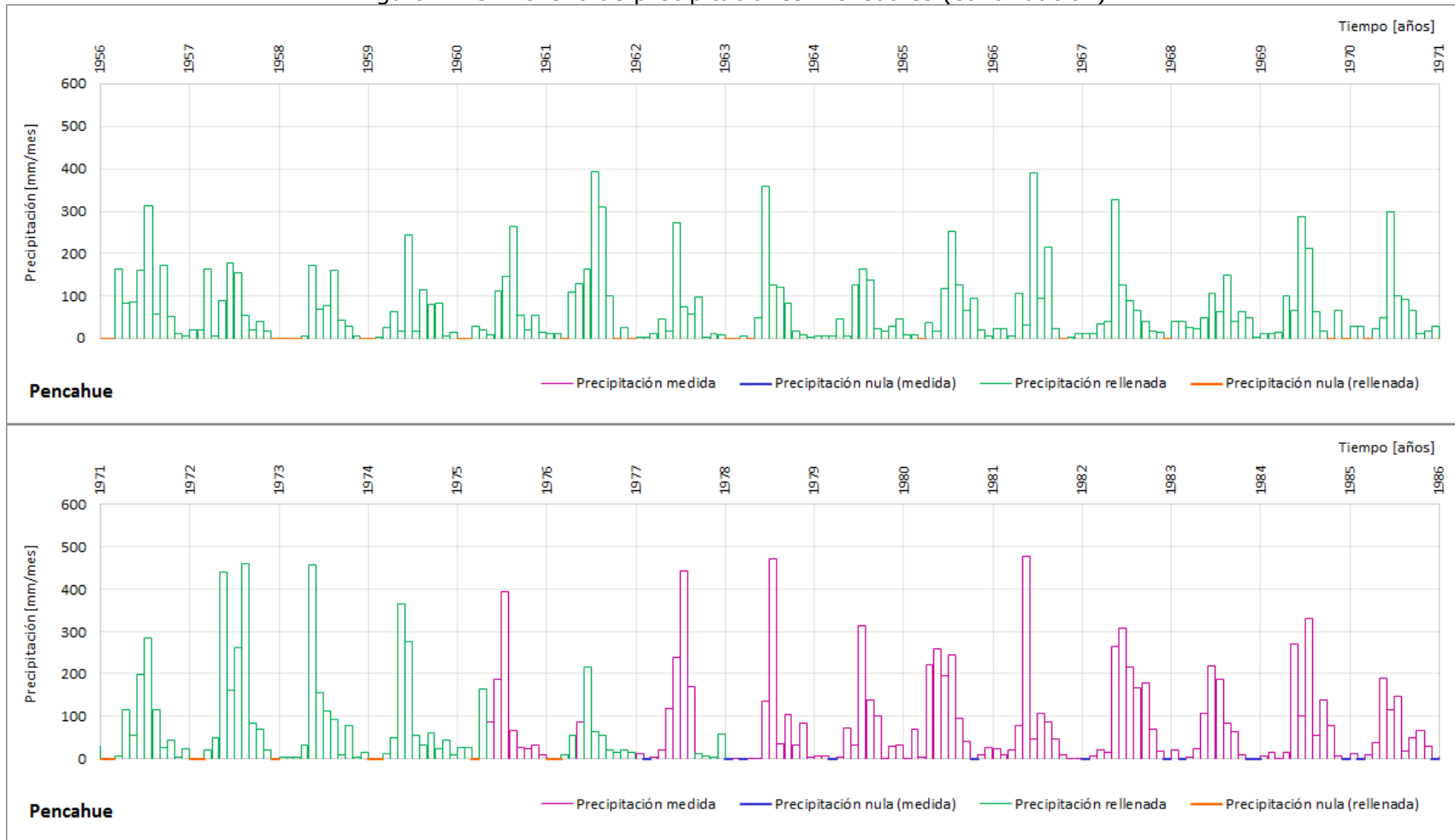
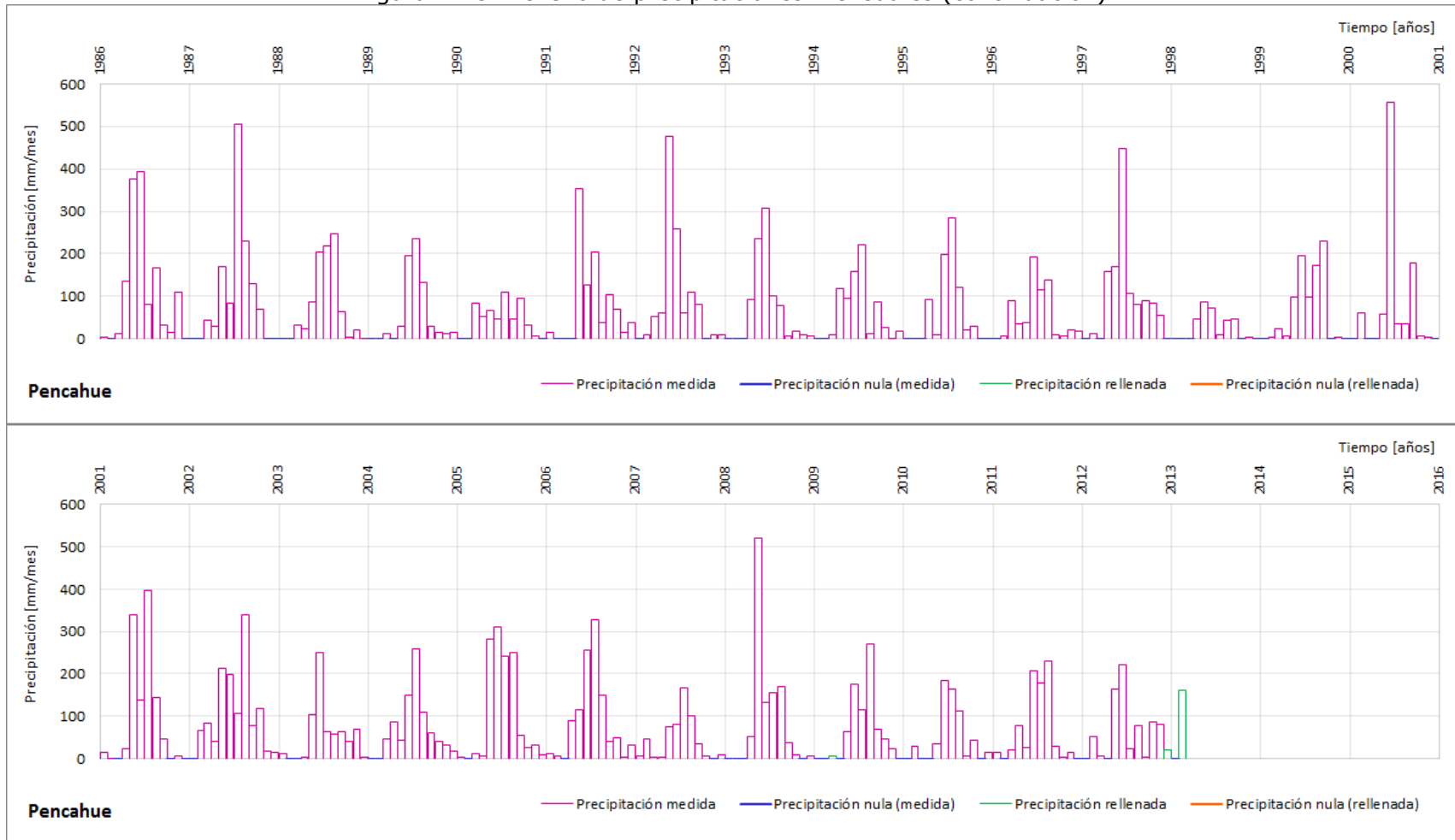


Figura III-3. Relleno de precipitaciones mensuales (continuación)



### **III.4 Fluviometría**

En la Figura III-4 se muestran las estaciones fluviométricas DGA existentes en el área de interés y su entorno. En esa figura se identificaron las estaciones elegidas para el análisis hidrológico realizado en el presente trabajo. Se excluyeron las estaciones suspendidas que cuentan con períodos breves de registro, tales como río Maule en Cuesta Culenar, río Purapel en Purapel y río Tutuvén en El Roble (ver Figura III-4).

También se excluyó, para el modelo de relleno, que se expone en el siguiente punto, la estación "río Maule en Forel", debido a que los caudales del río Maule, están directamente influidos por la operación del embalse Colbún.

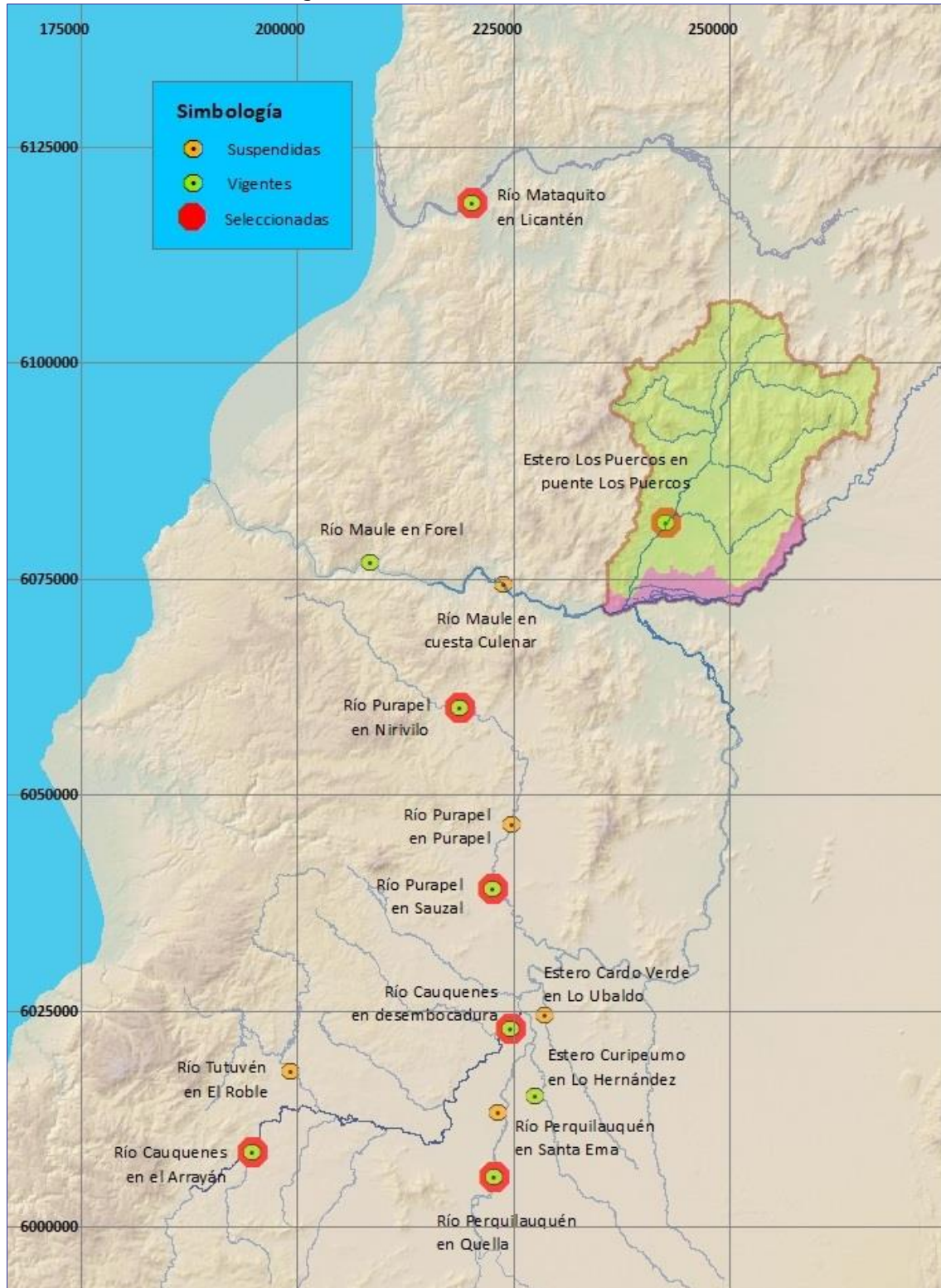
En la Figura III-5 se muestran los períodos cubiertos en cada estación fluviométrica seleccionada.

Para el relleno de caudales superficiales, dada la escasez de estaciones fluviométricas con datos suficientes, se consideraron en el análisis las estaciones Mataquito en Licantén y las que se ubican al sur de la cuenca del estero Los Puercos, 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. El peso de cada estación en un caudal que haya sido relleno depende de las correlaciones cruzadas. Es decir por ejemplo, si la correlación de alguna de esas 2 estaciones señaladas respecto a estero Los Puercos en puente Los Puercos es pobre, la influencia en el relleno asociada a ellas es reducida.

Los datos de caudales fueron verificados visualmente, al graficarlos. De dicha verificación, se descartaron algunos caudales bajos registrados en la estación Los Puercos en puente Los Puercos, que ha sido cuestionada por la calidad de sus mediciones.

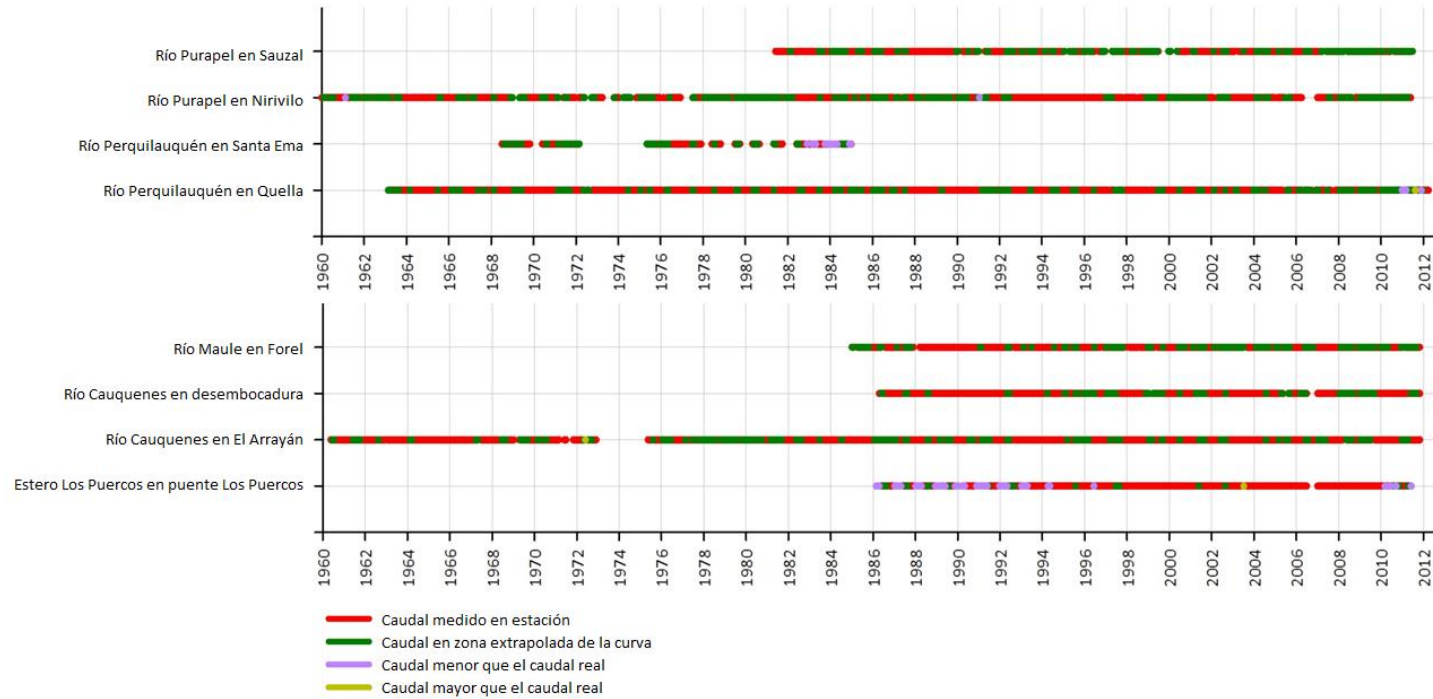


Figura III-4. Estaciones fluviométricas

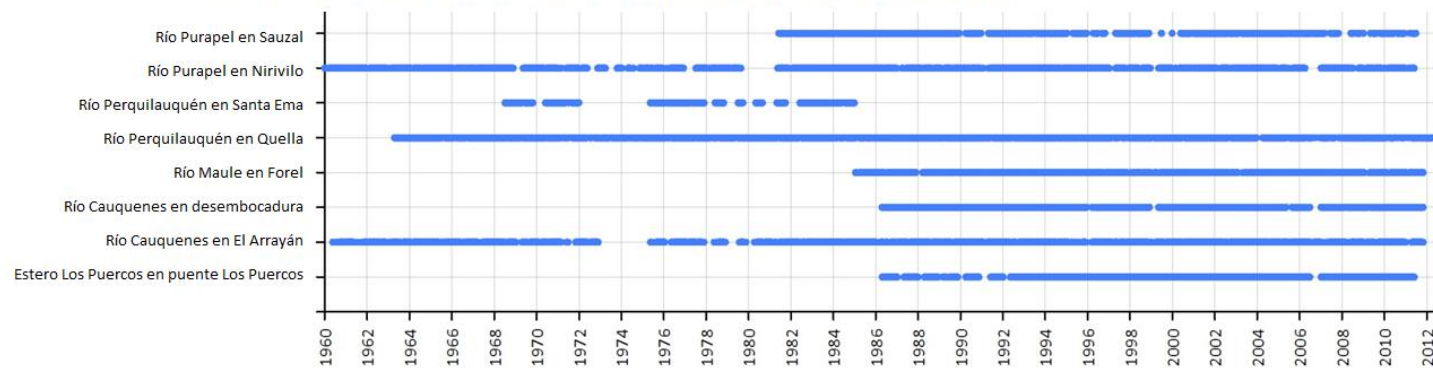


Datum: WGS84 huso 19S

Figura III-5. Datos de caudales promedio diarios registrados en estaciones fluviométricas



Datos registrados en estaciones fluviométricas (sólo caudales efectivamente medidos, sin extrapolaciones)



### III.5 Relleno de caudales

Se rellenaron los caudales promedios mensuales medidos. Se elaboró un modelo estocástico multivariado, el que fue programado y operado con MatLab R2013a. El modelo desarrollado 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, dependen de la calidad de la correlación entre ambas. En el Anexo 1: Modelo para relleno de series hidrológicas, se detalla el procedimiento empleado.

De las 8 estaciones seleccionadas en el punto III.4, se excluyó para el modelo, la estación "río Maule en Forel", debido a que los caudales del río Maule, están directamente influidos por la operación del embalse Colbún. Las matrices de correlación del modelo mencionado se construyeron con los datos de las restantes 7 estaciones: 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. El período cubierto es de 53 años, entre 1960 y 2012.

En la Figura III 6 se muestran los caudales medidos y rellenados en las 7 estaciones seleccionadas. En los gráficos de la Figura III 6 se puede apreciar que los tramos rellenados presentan variaciones semejantes a los tramos medidos.

En el Anexo 3: Relleno de caudales promedios mensuales, se presentan los resultados del proceso realizado, de forma tabulada y para las 7 estaciones seleccionadas.

Inicialmente se usaron todos los datos registrados, es decir, se consideraron los catalogados como: "Qe: caudal en zona extrapolada de la curva", "<Qr: caudal menor que el verdadero" y ">Qr: caudal mayor que el verdadero". Sin embargo, los resultados del relleno presentaron variaciones poco realistas, por lo que se decidió excluir esos datos y efectuar el análisis sólo con los caudales efectivamente medidos en las estaciones fluviométricas.

El objetivo del relleno es completar las estaciones ubicadas dentro del área de estudio, por ello, se recurrió a los datos medidos en las estaciones que se encuentran en el área de interés y algunas ubicadas en el entorno. En el desarrollo del modelo se excluyó Maule en Forel, por la razón que está muy influida por la operación del embalse Colbún, del mismo modo que se hizo con Curipeumo en Lo Hernández, al comprobarse que el procedimiento realizado había resultado satisfactorio con las estaciones consideradas.

Figura III-6. Caudales promedios mensuales medidos y rellenados

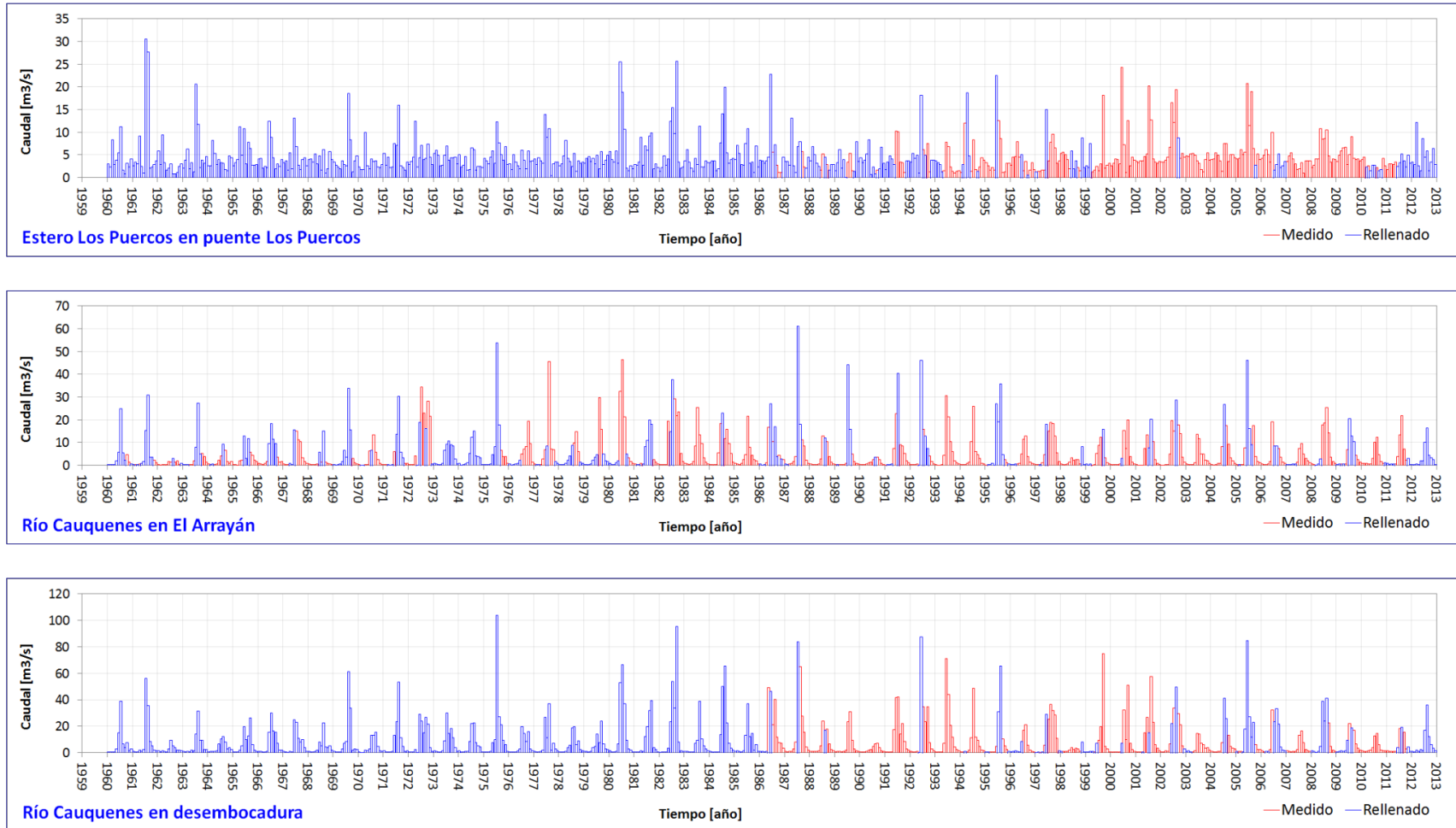


Figura III-6. Caudales promedio mensuales medidos y rellenados (continuación)

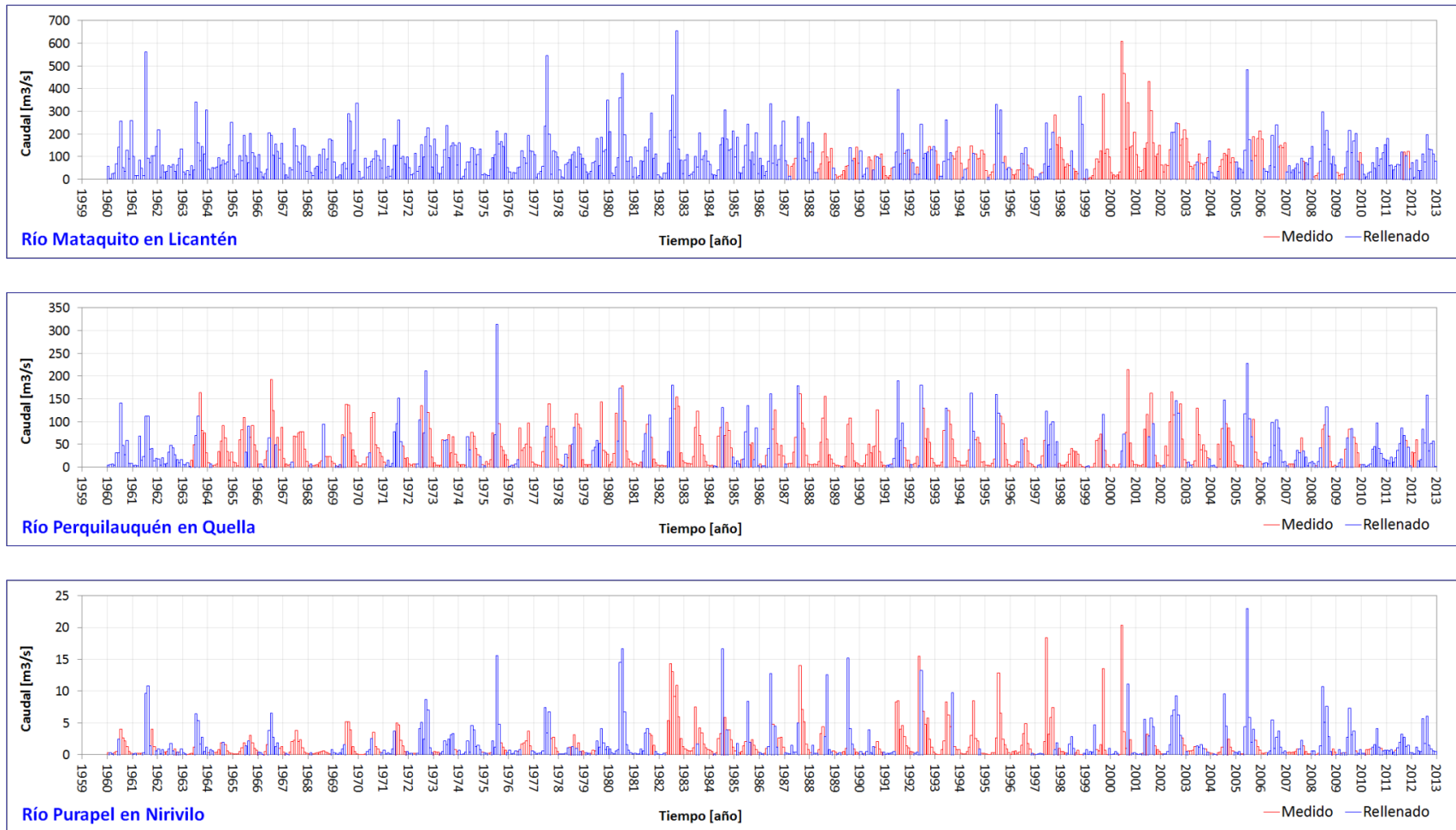
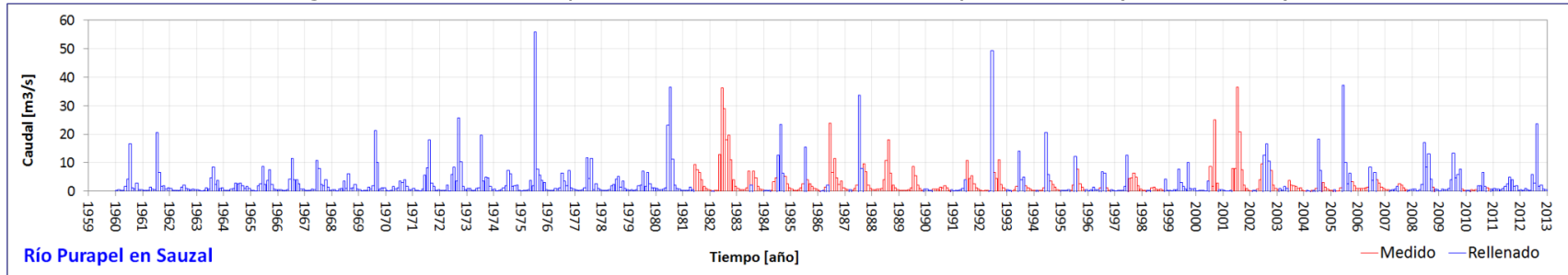


Figura III-6. Caudales promedios mensuales medidos y rellenados (continuación)



### III.6 Análisis probabilístico

Se realizó un análisis probabilístico de los caudales promedios mensuales de la estación *estero Los Puercos en puente Los Puercos*. Éste consistió en determinar las distribuciones de mejor ajuste para los caudales de cada mes. Se usó el programa EasyFit y el criterio de bondad de ajuste elegido, fue el de Kolmogorov-Smirnov. En la Tabla III-2 se muestran las distribuciones obtenidas para cada mes y sus respectivos parámetros.

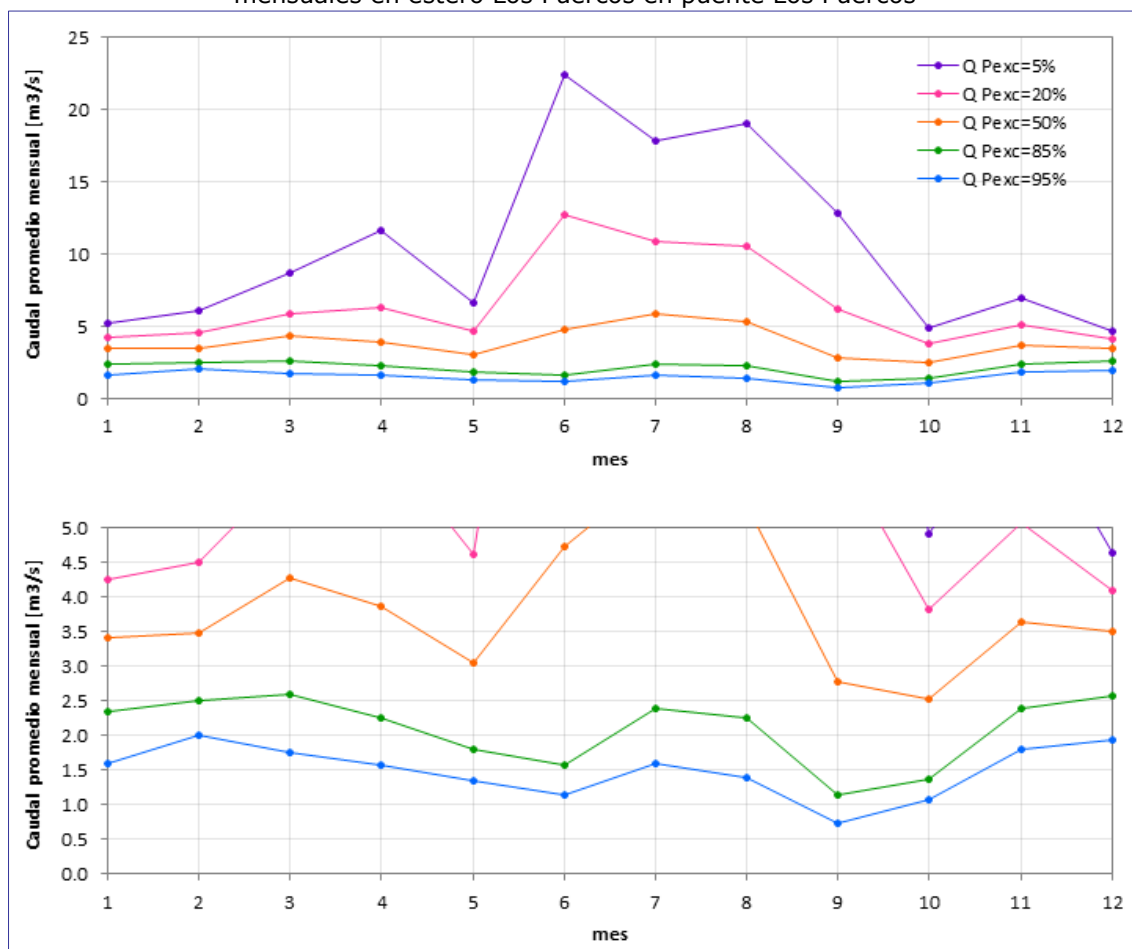
Tabla III-2. Distribuciones de mejor ajuste para caudales promedios mensuales

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b>Logistic</b>	<b>Dagum</b>	<b>Wakeby</b>	<b>Burr</b>	<b>Beta</b>	<b>Johnson SB</b>
$\sigma=0.61489$ $\mu=3.4043$	$k=1.0081$ $\alpha=5.3442$ $\beta=3.4615$ $\gamma=0$	$\alpha=9.9505$ $\beta=4.4881$ $\gamma=1.2366$ $\delta=0.22269$ $\xi=1.2372$	$k=0.68642$ $\alpha=3.4649$ $\beta=3.2984$ $\gamma=0$	$\alpha_1=2.4913$ $\alpha_2=6125200$ $a=0.72631$ $b=6536800$	$\alpha=1.0514$ $\beta=0.55913$ $\gamma=28.916$ $\delta=0.90472$ $\xi=0$
Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>Wakeby</b>	<b>FatigueLife</b>	<b>Inv. Gaussian</b>	<b>Wakeby</b>	<b>Gumbel Max.</b>	<b>Dagum</b>
$\alpha=6.5754$ $\beta=0.41776$ $\gamma=0.76016$ $\delta=0.50089$ $\xi=1.2234$	$\alpha=0.80295$ $\beta=5.5467$ $\gamma=-0.22612$	$\lambda=3.7897$ $\mu=4.2452$ $\gamma=0$	$\alpha=2.8054$ $\beta=0.60723$ $\gamma=0.00639$ $\delta=0.93247$ $\xi=0.92229$	$\sigma=1.2604$ $\mu=3.1852$	$k=0.2664$ $\alpha=14.662$ $\beta=4.1628$ $\gamma=0$

Nota: según criterio de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. En noviembre, se usó la segunda mejor distribución (Gumbel Max.), puesto que la primera (Frechet), entregó caudales inconsistentes físicamente.

En la Figura III-7 se muestran las curvas de variación estacional determinadas usando las distribuciones listadas en la tabla anterior.

Figura III-7. 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.7 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-1 muestra los puntos donde se realizaron los aforos, mientras que en la Tabla III-3 se muestran los resultados de dichas mediciones.

Tabla III-3. Caudales aforados cuenca del estero Los Puercos

Punto	Descripción	Coordenadas UTM [m]		Cota (msnm)	1ª Corrida			2ª Corrida		
		Este	Norte		Fecha	Hora	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Fecha	Hora	Caudal [m <sup>3</sup> /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 enormemente los valores de junio. Esto se debe a que en el mes de julio, cerca de la fecha de medición prácticamente no hubo precipitaciones. Sólo entre los días 9 y 11 de julio se registraron cerca de 18 mm en la estación Río Loncomilla en Las Brisas, ubicada en las proximidades del área de estudio. Por otro lado, el día 20 de octubre en la misma estación se midieron lluvias mucho más intensas, registrándose una precipitación total de 17 mm en un período de 15 horas, lo que generó los caudales que se midieron en este mes.

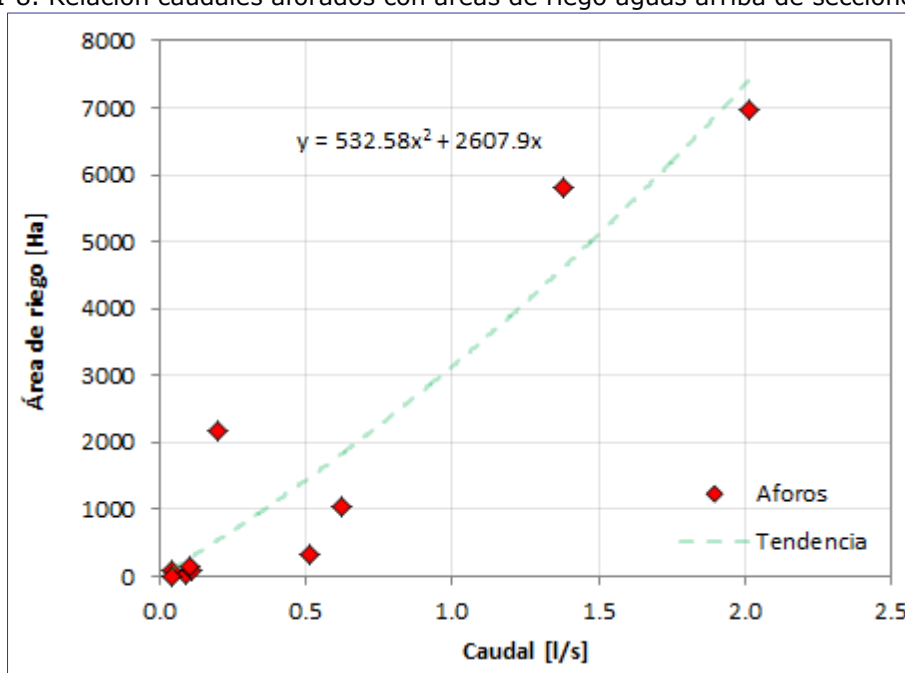
En el Anexo 12: Aforos se presentan las mediciones hechas en los distintos puntos, junto con las fotografías de esta labor.

Se ha analizado el efecto del riego sobre la escorrentía superficial. En la Tabla III-4 se presentan las áreas de riego que se ubican aguas arriba de cada sección de aforo. Las áreas de riego fueron delimitadas en Google Earth y las sumas de las superficies fueron corregidas según el total obtenido del censo agropecuario de 2007 (ver detalle en corrección en subcapítulo VI.1 Estudio agronómico (demandas de riego)).

Tabla III-4. Caudales aforados versus áreas regadas aguas arriba

N°	Sección de aforo	Q (m <sup>3</sup> /s)	Área regada aguas arriba de sección de aforo [Ha]
1	Estero Las Palmas	87	16.7
2	Estero Tapihue	42	83.6
3	Estero Litú	107	97.4
4	Estero Pichingüileo aguas arriba estero Las Palmas	102	139.1
5	Estero Los Puercos aguas arriba estero Botalcura	620	1047.5
6	Estero Botalcura	42	6.8
7	Estero Tutucura aguas arriba estero Los Puercos	511	334.6
8	Estero Cunculén aguas arriba estero Los Puercos	199	2181.5
9	Estero Los Puercos aguas abajo estero Cunculén	1377	5810.7
10	Estero Los Puercos en Corinto	2013	6973.6

Figura III-8. Relación caudales aforados con áreas de riego aguas arriba de secciones de aforo



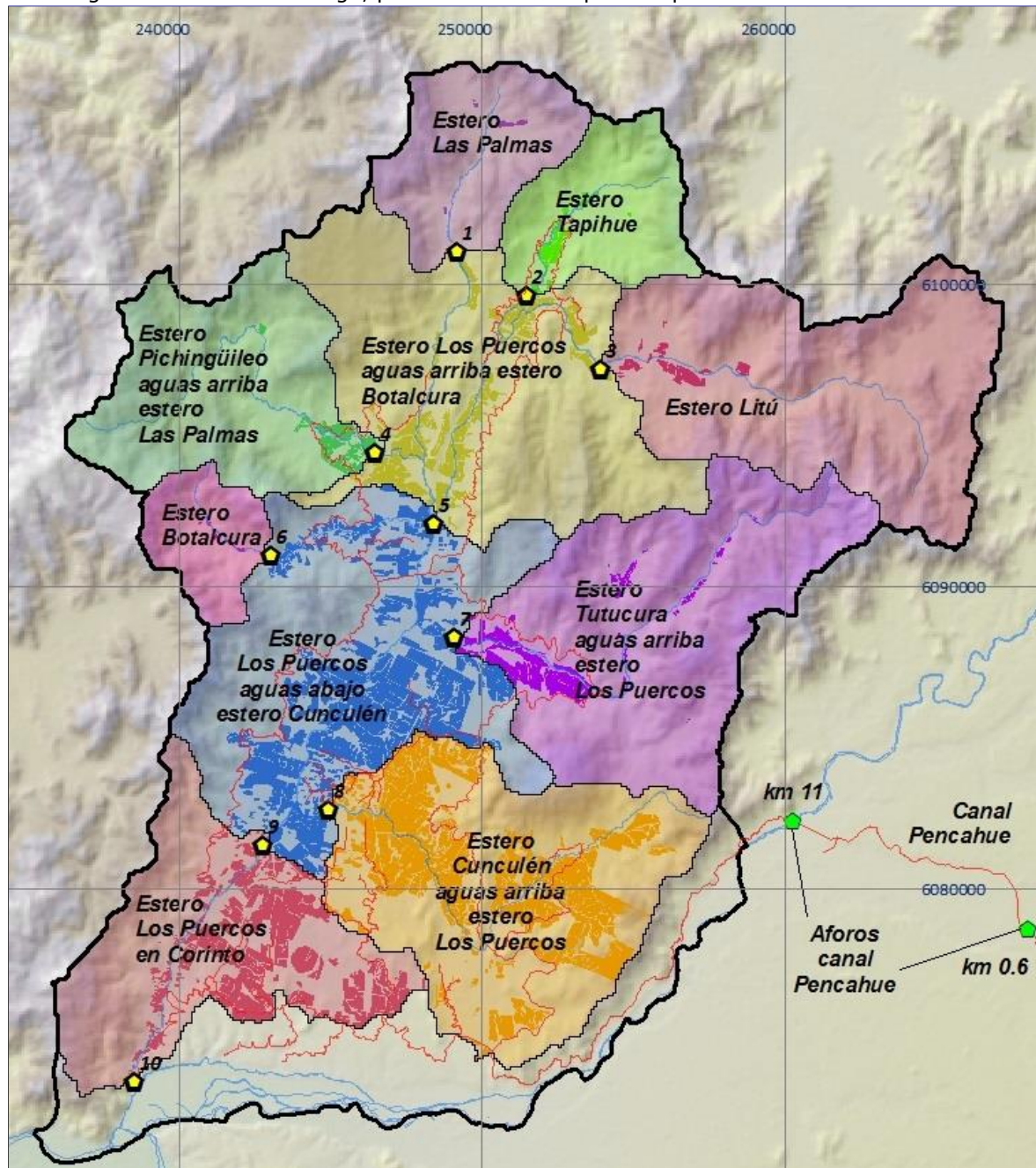
En el gráfico anterior se observa que podría existir una relación entre los caudales aforados y las áreas de riego. Parte del caudal superficial podría provenir de pérdidas en los canales y excedentes de riego. Sin embargo, no es posible concluir con lo anterior, dado que los aforos fueron realizados en julio, mes en que prácticamente no se riega.

La magnitud de los excedentes de riego se cuantificaron más adelante, con el modelo de recargas y el modelo de flujo subterráneo al ser operados en conjunto.

### **III.7.1 Aforos complementarios**

Se realizaron aforos complementarios en el canal Pencahue, para analizar la posibilidad de pérdidas por conducción en el tramo de canal desde bocatoma al área de estudio. Se midieron caudales semejantes en torno a los 5 m<sup>3</sup>/s, en los kilómetros 0.6 y 11, comprobándose que no existen pérdidas apreciables en dicho tramo (ver mediciones en Anexo 12: Aforos). Por consiguiente, los datos de caudales en bocatoma con los que se cuenta, pueden asociarse además al km 11 del trazado, sin corrección alguna (ver Figura III-9).

Figura III-9. Áreas de riego, por subcuenca de aporte superficial a secciones de aforo



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

## **IV Calidad físico-química del agua**

### **IV.1 Aguas superficiales**

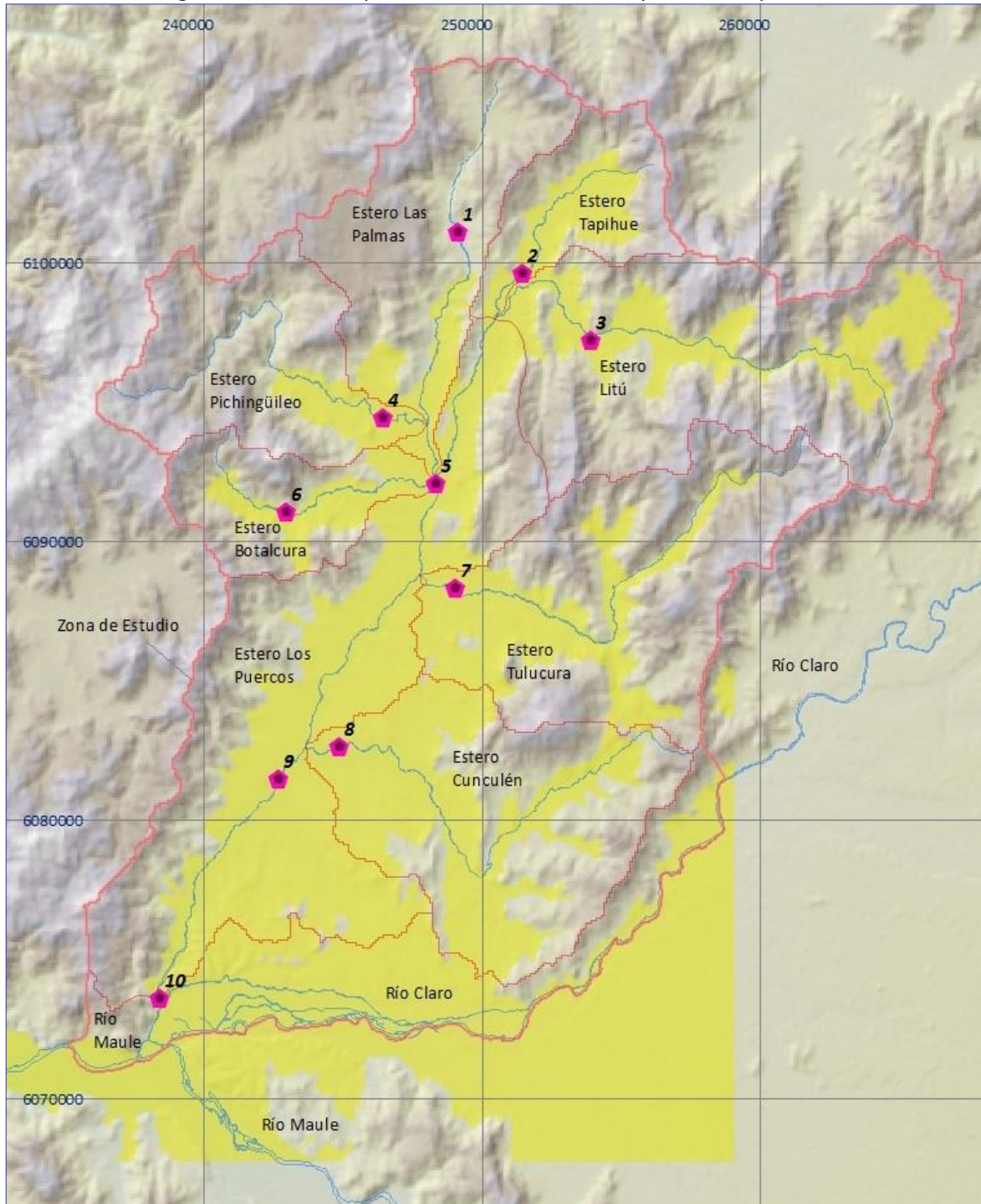
En los mismos puntos donde se realizaron los aforos en cauces superficiales (ver Figura IV-1), se tomaron muestras de agua en las cuales se midieron los siguientes parámetros físico-químicos: pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto.

Para esta labor se empleó un instrumento portátil marca Hach, modelo HQd, que permite medir con distintas sondas los parámetros señalados. Las mediciones fueron hechas por personal entrenado especialmente para esta labor y los parámetros medidos se consignan en la Tabla IV-1.

### **IV.2 Aguas subterráneas**

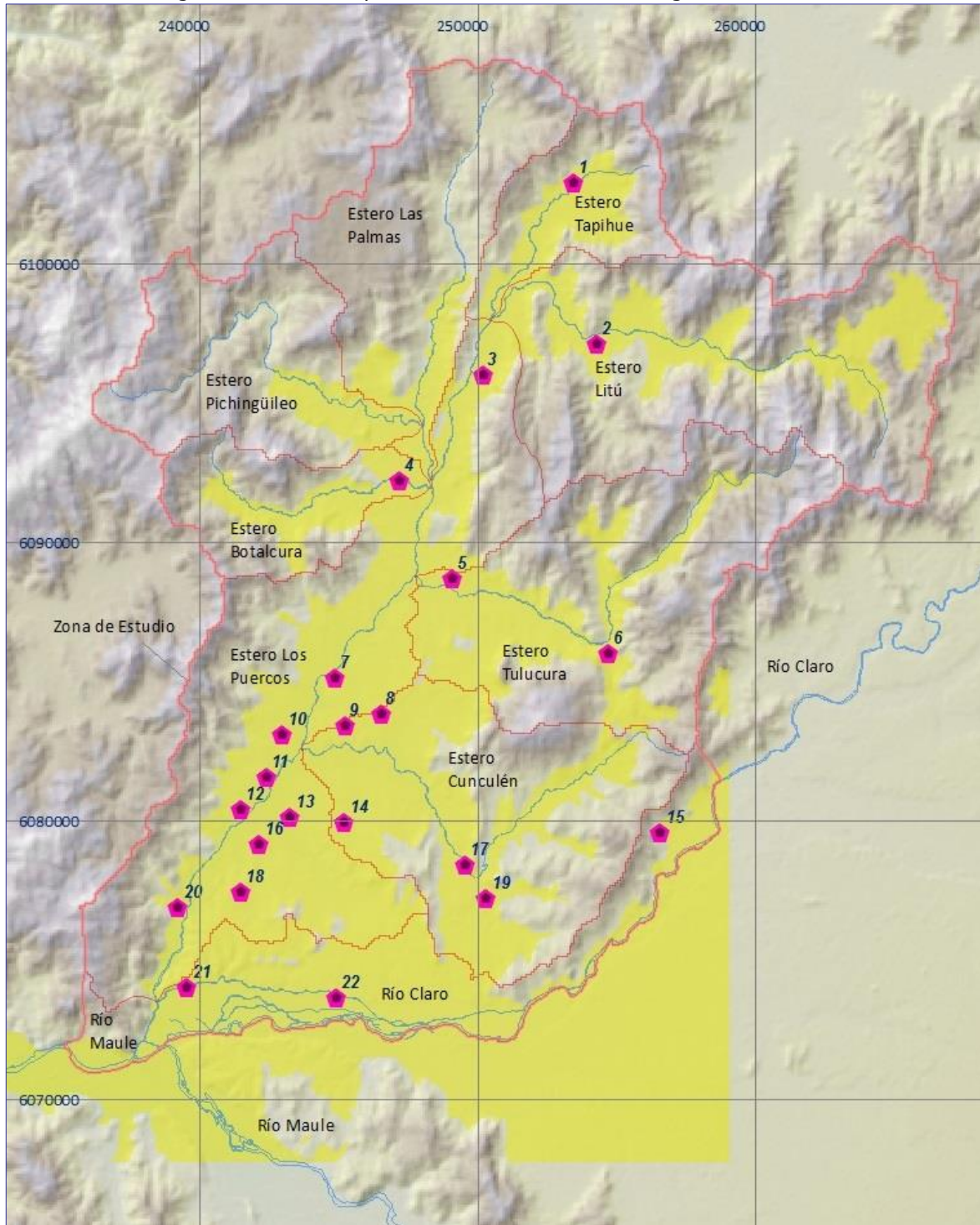
Por otro lado, se midieron los mismos parámetros físico-químicos de aguas subterráneas, en muestras obtenidas en 22 puntos distribuidos de manera uniforme en la cuenca del estero Los Puercos. En la Figura IV-2 se muestran los puntos donde se tomaron las muestras, mientras que en la Tabla IV-1 se consignan los valores medidos.

Figura IV-1. Puntos para medición de caudales y calidad superficial



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura IV-2. Puntos para medición de calidad del agua subterránea



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Tabla IV-1. Parámetros físico-químicos de aguas subterráneas

Punto	N° Catastr o	Tipo	Este (m)	Norte (m)	Cota msnm	Fecha	Hora	pH	Temp. (°C)	Conduct. (µS/cm)	OD (mg/l)
1	96	Noria	253482	6102899	91	05-09-2013	14:30	7.39	17.2	306.0	6.84
2	40	Noria	254315	6097105	95	05-09-2013	13:30	6.16	14.8	262.0	6.36
3	98	Noria	250210	6095973	58	05-09-2013	16:10	7.32	14.4	170.0	4.05
4	31	Pozo	247224	6092192	65	05-09-2013	16:55	6.81	17.5	414.0	4.30
5	99	Noria	249137	6088656	56	06-09-2013	9:50	6.74	16.0	488.0	8.16
6	68	Pozo	254727	6085993	95	06-09-2013	11:00	6.98	22.4	2300.0	4.45
7	44	Noria	244920	6085087	56	06-09-2013	13:00	7.17	17.3	266.0	2.38
8	77	Noria	246546	6083828	84	06-09-2013	17:30	7.03	17.2	303.0	3.96
9	38	Noria	245254	6083397	62	06-09-2013	16:40	6.85	13.8	313.0	9.34
10	25	Noria	243017	6083057	41	06-09-2013	16:05	7.30	17.6	579.0	6.07
11	106	Noria	242464	6081525	43	06-09-2013	15:10	6.76	15.4	545.0	6.42
12	71	Noria	241513	6080370	51	09-09-2013	10:30	7.21	17.9	504.0	8.90
13	13	Noria	243300	6080090	46	07-09-2013	12:45	7.07	17.6	366.0	6.90
14	33	Noria	245243	6079944	66	07-09-2013	11:50	7.45	20.6	1009.0	8.91
15	64	Noria	256579	6079567	135	09-09-2013	17:40	7.41	18.4	381.0	7.79
16	112	Noria	242185	6079116	55	07-09-2013	13:00	7.91	18.4	397.0	8.04
17	56	Noria	249565	6078392	59	09-09-2013	15:00	7.35	21.7	1320.0	3.08
18	83	Noria	241512	6077436	62	07-09-2013	14:40	6.96	15.8	264.0	9.13
19	50	Noria	250323	6077203	62	09-09-2013	15:40	7.70	17.2	632.0	5.95
20	4	Pozo	239262	6076873	47	09-09-2013	12:20	7.33	20.6	365.0	8.64
21	8	Noria	239583	6073997	35	07-09-2013	15:40	7.34	19.0	272.0	6.49
22	60	Pozo	244943	6073619	46	09-09-2013	14:10	7.51	22.1	296.0	8.58

### IV.3 Caracterización de la calidad del agua

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

Respecto a la conductividad, se midieron valores notoriamente mayores en las aguas subterráneas ( $170 \leq \text{Cond.} \leq 2300$ ) con relación a las aguas superficiales ( $122 \leq \text{Cond.} \leq 486$ ). Esto es característico de las napas de la zona costera de Chile, debido a la presencia principalmente de hierro y manganeso, que se ha detectado en muchas captaciones subterráneas que forman parte de los sistemas de agua potable rural y urbana, a lo largo de la costa, principalmente entre las regiones V y X.

En relación al oxígeno disuelto (OD), éste varía según diversos factores, como la temperatura, la aireación, la fotosíntesis, etc. Por lo general, a menor temperatura mayor es el OD, si hay más aireación o si existen plantas en el agua, también son factores que inciden en el aumento de OD. Teniendo en cuenta esto, es razonable que los valores de OD de las aguas superficiales ( $9.7 < \text{OD} < 12.7$ ) sean mayores que los del agua subterránea ( $2.4 < \text{OD} < 9.3$ ), lo cual ocurre en los análisis efectuados durante el estudio.



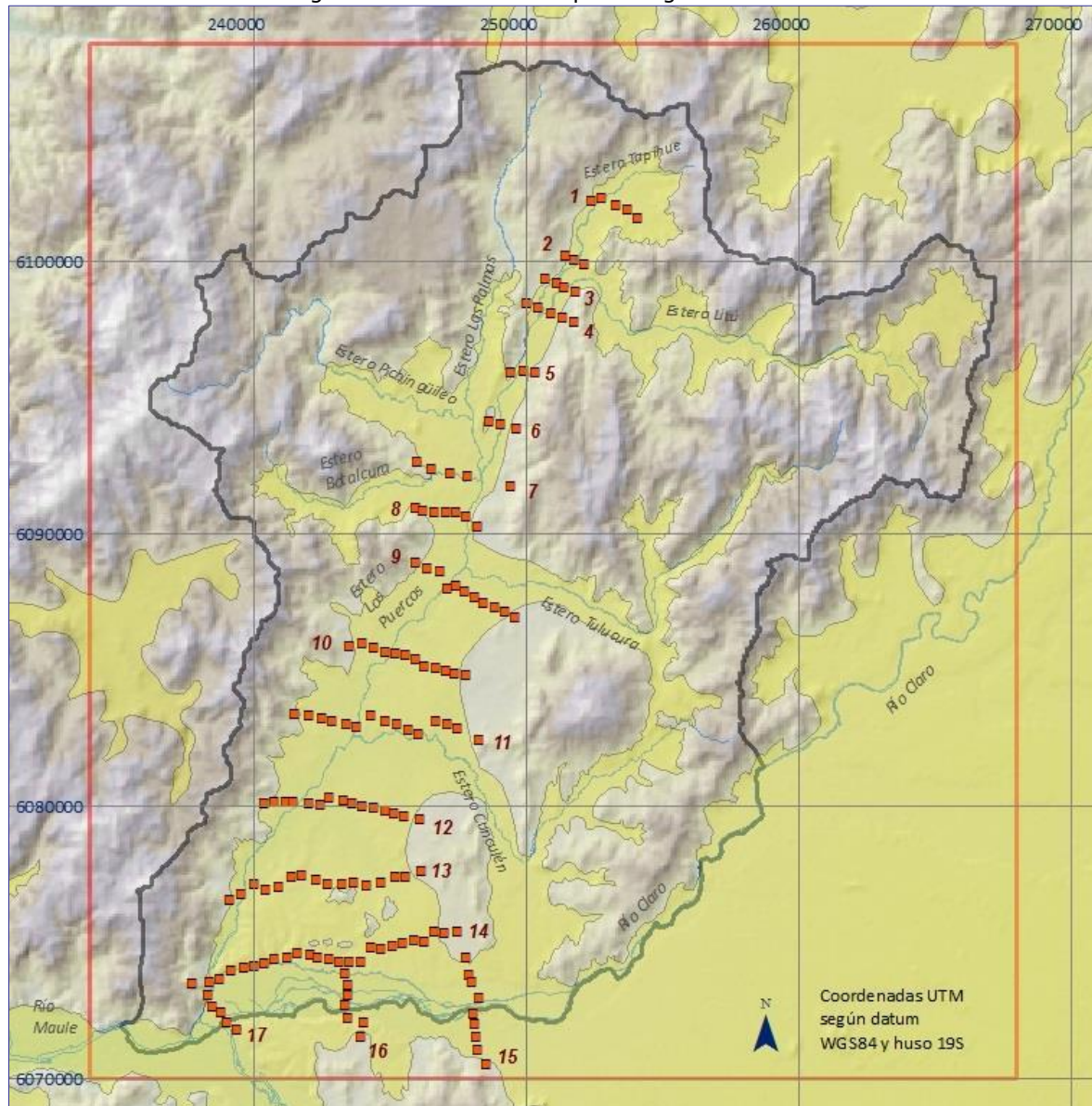
## V Hidrogeología

### V.1 Geofísica

En julio de 2013 la empresa Geodatos realizó una campaña de exploración geofísica consistente en 150 estaciones gravimétricas, agrupadas en 17 perfiles. En la Figura V-1 se muestran sus ubicaciones. En el Anexo 9: Estudio geofísico de gravimetría en sector Los Puercos se presentan el informe con los resultados obtenidos.

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



## V.2 Catastro de captaciones subterráneas

En julio de 2013 se realizó el catastro de captaciones y usos de aguas subterráneas. En la Figura V-2 se muestra una de las hojas de encuesta. En el Anexo 5: Encuestas de usuarios y usos del agua, se presenta la totalidad de las fichas que fueron llenadas en terreno durante la labor de catastro. En la Tabla V-1 se presenta el catastro de captaciones efectuado.

Figura V-2. Hoja encuesta

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA CUENCA ESTERO LOS PUERCOS, REGIÓN DEL MAULE DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS - GCF INGENIEROS LTDA. - AÑO 2013			
ENCUESTA DE USUARIOS Y DE USOS DEL AGUA			
1. TIPO CAPTACIÓN:		A. Subterránea ( )	B. Superficial ( )
		A.1 Pozo (X)	A.4 Dren ( )
		A.2 Noria ( )	A.5 Otro ( )
		A.3 Puntera ( )	
			FICHA N° 6
2. UBICACIÓN, PROPIETARIO Y COORDENADAS UT			
UTM Datum WGS84 huso 18S			
Localidad	Rauquén	UTM E (m)	247651
Comuna	Pencahue	UTM N (m)	6072618
Nombre del Predio	Recinto Captación	Cota (msnm)	54
Entrevistado	Victor Aravena Vasquez		
Propietario	Cooperativa APR Pencahue Ltda.	Rol Propiedad	
RUT del Propietario	84.801.000-6	Superficie (ha)	
3. USO Y CARACTERÍSTICAS DE LA CAPTACIÓN			
USO ACTUAL: Riego ( ) Potable (X) Industrial ( ) Minero ( ) Otro ( ) Sin Uso ( )			
Si la Captación es Subterránea:		Si la Captación es Superficial:	
Prof. Perforada (m)	Fecha Constr.	Nombre Bocatoma:	
Prof. Habilitada (m)	Constructor	Tipo y Características:	
Diámetro (") o (m)	Revestimiento		
Caudal (l/s)	Diám. Impuls. (")	Fecha Construcción:	
Pot. Bba. (kW o HP)	Tipo Bba.		
Niv. Estático (m)	Niv. Dinámico (m)		
Interf. con otros pozos:	SI: ( )	NO: (X)	
4. FRECUENCIA DE BOMBEO O RIEGO SUPERFICIAL			
Verano	Horas/Día: _____	Días/Mes: _____	Meses/Temporada: _____
Invierno	Horas/Día: _____	Días/Mes: _____	Meses/Temporada: _____
		Riego Superficial: _____ (Turno: N° horas y cada cuánto tiempo)	
5. SI EL USO ES RIEGO: INDICAR MÉTODO DE RIEGO, CULTIVOS Y DISTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS			
MÉTODO DE RIEGO	CULTIVOS:	Cultivo 1:	Superf. (ha): _____
- Surco ( )		Cultivo 2:	Superf. (ha): _____
- Aspersión ( )		Cultivo 3:	Superf. (ha): _____
- Goteo ( )			
- Otro: _____		DISTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS: _____	
6. DERECHOS DE AGUAS:		CAUDAL (l/s): _____	Res. DGA N° _____ de fecha _____
SI (X)		NO ( )	
7. OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN			
Propietario	( )		
Familiar	( )		
Administrador o Empleado	(X)		
Arrendatario	( )		
Vecino	( )		
Otro: _____	( )		
8. POR QUÉ NO FUE POSIBLE OBTENER INFORM.			
Casa o predio sin moradores	( )		
No se quiso dar información	( )		
Menor de edad en propiedad	( )		
Entrevistado no sabía la información	( )		
9. ENCUESTADOR			
Nombre:	Pedro Duque		
Fecha:	17-07-2013		
CUALQUIER INFORMACIÓN ADICIONAL: ANOTAR AL REVERSO.			

FOTOGRAFÍA DE LA CAPTACIÓN

Tabla V-1. Catastro de captaciones subterráneas

Ficha	Coord. WGS84 19S		Propietario	Nombre Predio	Ubicación	Tipo	Uso	Cota msnm	Carac. Const.			Constructor	año	NE (ND) [m]	Fecha
	Este [m]	Norte [m]							P. perf. [m]	P. hab. [m]	Sección $\Phi$ ["] - [m]				
1	242828	6081450	Cooperativa APR Ltda.	Villa Los Naranjos	Pencahue	Pozo	S/U	40.0	39	27	10"	-	-	2.84	16 jul 2013
2	241797	6081429	Oscar Silva	Parcela N°10	Matancilla	Noria	P - S/U	52.0	6	5.5	1.2	-	2005	0.96 ND	16 jul 2013
3	239400	6076620	Comité APR El Estero	Recinto Captación	El Estero	Pozo	P	33.0	-	-	8"	-	-	1.07	16 jul 2013
4	239262	6076873	Municipalidad Pencahue	Escuela El Estero	El Estero	Pozo	P	47.0	-	-	8"	-	-	5.17	16 jul 2013
5	240121	6073971	Comité APR Corinto	Recinto Captación	Corinto	Pozo	P	34.0	40	32	8"	Bas Ltda.	2004	14.27 ND	17 jul 2013
6	247651	6072618	Cooperativa APR Pencahue Ltda.	Recinto Captación	Rauquen	Pozo	P	54.0	-	-	10"	-	-	8.18 ND	17 jul 2013
7	247456	6072567	Cooperativa APR Pencahue Ltda.	Recinto Captación	Rauquen	Pozo	P	41.0	-	-	10"	-	-	3.56	17 jul 2013
8	239583	6073997	Comité APR Corinto	Recinto Captación	Corinto	Noria	P	35.0	40	30	8"	-	1964	3.06	17 jul 2013
9	239750	6073775	Comité APR Corinto	Recinto Captación	Corinto	Pozo	S/U	29.0	40	30	8"	-	1964	3.06	17 jul 2013
10	241810	6077988	Caterine Huber	Recinto Captación	Las Tizas	Noria	R - P	71.0	7	6	0.80"	-	2002	4 ND	17 jul 2013
11	243179	6080188	Francisco Jarpa	Recinto Captación	Las Tizas	Noria	R - P	42.0	8	7	0.95"	-	2000	2.92 ND	17 jul 2013
12	243169	6080162	Francisco Jarpa	Recinto Captación	Las Tizas	Noria	R - P	41.0	5.5	4.5	1"	-	1992	0.95	17 jul 2013
13	243300	6080090	Francisco Jarpa	Agrícola Las Tizas	Las Tizas	Noria	P	46.0	8	7.5	1"	-	1992	3.35 ND	17 jul 2013
14	243439	6080038	Francisco Jarpa	Agrícola Las Tizas	Las Tizas	Noria	R - P	52.0	10	9.5	0.8"	-	1999	6.80	18 jul 2013
15	243366	6079976	Francisco Jarpa	Agrícola Las Tizas	Las Tizas	Noria	R - P	42.0	8	7.5	1"	-	1995	1.70	18 jul 2013
16	242938	6078627	Francisco Jarpa	Agrícola Las Tizas	Las Tizas	Noria	R - P	68.0	5	4.5	0.9"	-	2007	2.24 ND	18 jul 2013
17	239318	6073681	Celia Mendoza	Recinto Captación	Corinto	Noria	S/U	37.0	10	9.5	1.5"	-	1892	1.72	18 jul 2013
18	233188	6072125	Comité APR Magdalena Muñoz	Recinto Captación	Curtiduría	Pozo	P	31.0	100	12	8"	-	2003	5.19	18 jul 2013
19	233125	6072142	Oscar Garrido	Recinto Captación	Curtiduría	Pozo	P	30.0	28	6	10"	-	1997	3.26	18 jul 2013
20	232872	6072197	Sucesión Ramírez Garrido	Viña San Manuel	Curtiduría	Pozo	P	27.0	25	23	10"	Captagua	2000	4.57	18 jul 2013
21	232882	6072193	Sucesión Ramírez Garrido	Recinto Captación	Curtiduría	Pozo	P	27.0	25	22	10"	-	2003	4.37	18 jul 2013
22	234127	6071765	Isabel Mendoza	Estación Curtiduría	Curtiduría	Pozo	P	31.0	10	9	1.2	-	1892	4.19	18 jul 2013
23	231912	6073069	Municipalidad de Pencahue	Escuela Curtiduría	Curtiduría	Pozo	S/U	34.0	60	57	6"	-	1997	1.21	19 jul 2013
24	232659	6072249	Comité Magdalena de Curtiduría	Viña San Manuel	Curtiduría	Pozo	P - S/U	30.0	36	18	10"	-	1991	4.67	19 jul 2013
25	243017	6083057	Carlos Jara	Parcela N°2	Fundo Matancilla	Noria	P	41.0	5	4.5	0.9	-	1950	2.43 ND	19 jul 2013
26	242954	6083030	Carlos Jara	Parcela N°2	Fundo Matancilla	Noria	S/U	47.0	6	5.5	0.6	-	1976	1.34	19 jul 2013
27	242911	6082872	Carlos Jara	Parcela N°2	Fundo Matancilla	Noria	S/U	45.0	6	5.5	1	-	1976	0.86	19 jul 2013
28	242816	6082952	Oslavia Jara Letelier	Parcela N°2	Fundo Matancilla	Noria	P	46.0	4.5	4	0.8	-	2002	2.28	19 jul 2013
29	245454	6083150	Marcos Briolinis	Fundo El Oeste	El Oeste	Pozo	S/U	35.0	40	38	8	Sta. Martina	1999	1.83	20 jul 2013
30	242820	6090942	Municipalidad de Pencahue	Escuela Rinconada de Botalcura	Rinconada de Botalcura	Pozo	P	107.0	40	38	8"	-	2003	17.29	20 jul 2013
31	247224	6092192	Comité APR de Botalcura	Captación APR Botalcura	Botalcura	Pozo	P	65.0	60	50	8"	Burgos S.A.	1998	-	20 jul 2013
32	244887	6079974	Aladino Contreras	Los Cerrillos N°16	Pencahue	Noria	P	67.0	7	6.5	0.8	-	2008	5.18	21 jul 2013
33	245243	6079944	Nicanor Abarca	Hernán Bravo N°995	Pencahue	Noria	P	66.0	8	7.5	1	-	2007	5.31	21 jul 2013
34	245253	6079991	Joaquín Becerra Castro	Hernán Bravo N°995	Pencahue	Noria	P	64.0	6	5.5	1.3	-	1979	4.91	21 jul 2013
35	245422	6083736	Raúl Rojas	-	Las Doscientas	Noria	P	63.0	12	11.5	1.2	-	1970	5.55 ND	21 jul 2013
36	245468	6083564	José Reinaldo Celis	-	Las Doscientas	Noria	P	60.0	8.5	8	1.1	-	1998	5.73	21 jul 2013
37	245365	6083515	José Reinaldo Celis	Parcela N°9	Las Doscientas	Noria	R - P	63.0	6	5.5	0.8	-	2003	2.98	21 jul 2013
38	245254	6083397	Eduardo Díaz	Parcela N°10	Las Doscientas	Noria	R - P	62.0	3	2.5	1.5	-	1999	1.32	21 jul 2013
39	255448	6097133	German Rodríguez	Fundo Litu	Las Doscientas	Noria	S/U	84.0	8	-	1.8	-	1975	0.92	22 jul 2013
40	254315	6097105	German Rodríguez	Fundo Litu	Fundo Litu	Noria	P	95.0	8	6	1.9	-	1975	0.70	22 jul 2013
41	246285	6093683	Arnoldo Martiz	Agrícola Las Loicas	Las Loicas	Pozo	P	80.0	8	7.5	8"	-	2003	1.63	22 jul 2013
42	247924	6091869	Juan Fernández	Inversiones El Alba S.A.	Botalcura	Noria	P	60.0	11	10.5	1	-	2001	5.60	22 jul 2013
43	247635	6092020	Juan Fernández	Viña Y Bodega Botalcura S.A.	Botalcura	Noria	P	50.0	7	6.5	0.8	-	2000	5.60	22 jul 2013
44	244920	6085087	José Pablo Illanes	Fundo Las Doscientas	Las Doscientas	Noria	P	56.0	22	21	1.1	-	2007	ND	22 jul 2013
45	244447	6079762	Felipe Illanes	Fundo Milla S.A.	Pencahue	Noria	P	62.0	5	4.5	1	-	2007	5.10	23 jul 2013
46	244298	6080360	Matías Chung	Fundo El Recuerdo Lote A	Pencahue	Pozo	P	59.0	40	36	8"	-	-	5.97	23 jul 2013
47	244535	6080812	Abel Bravo	Fundo El Recuerdo	Pencahue	Noria	P	54.0	12	11	0.9	-	-	5.00	23 jul 2013

Tabla V-1. Catastro de captaciones subterráneas

Ficha	Coord. WGS84 19S		Propietario	Nombre Predio	Ubicación	Tipo	Uso	Cota msnm	Carac. Const.			Constructor	año	NE (ND) [m]	Fecha
	Este [m]	Norte [m]							P. perf. [m]	P. hab. [m]	Sección $\Phi$ ["] - [m]				
48	243956	6082945	-	Parcela N°18	Las Doscientas	Noria	P	50.0	10.5	9	1.1	-	1980	6.77	23 jul 2013
49	244990	6069895	Comité APR Lo Figueroa	Captación APR Lo Figueroa	Rauquen	Pozo	P	61.0	30	22	8"	-	1992	6.77	23 jul 2013
50	250323	6077203	Gregorio Andrade	Lote N°2	San Jorge	Noria	P	62.0	13	12	0.85	-	1970	7.54	24 jul 2013
51	250330	6077233	Gregorio Andrade	Lote N°2	San Jorge	Noria	P	56.0	13	12	1	-	1920	6.81	24 jul 2013
52	250525	6077681	Gregorio Andrade	Lote N°2	San Jorge	Otro	S/U	76.0	2	-	2.15 x 1.15	-	1940	-	24 jul 2013
53	250347	6077667	Gregorio Andrade	Lote N°2	San Jorge	Noria	S/U	58.0	2	-	2.15x1.16	-	1940	-	24 jul 2013
54	250727	6077170	Gregorio Andrade	Lote N°2	San Jorge	Noria	P	74.0	11	10	1	-	1980	-	24 jul 2013
55	249600	6078358	María Edith Aravena Tapia	El Olivo	Lo Figueroa	Noria	R - P	59.0	11.5	10	1.4	-	1944	4.52	24 jul 2013
56	249565	6078392	Carlos Ramón Acevedo Leppe	La Higuera	Lo Figueroa	Noria	R - P	59.0	11.5	10	0.9	-	1975	3.35	24 jul 2013
57	249103	6078685	Clara Luz Aguilera Berrios	Las Rosas	Lo Figueroa	Noria	R - P	58.0	12	11	1.2	-	1987	5.89	24 jul 2013
58	249109	6078256	Luis Berríos	Las Rosas	Lo Figueroa	Noria	P	69.0	9	8	0.8	-	1993	2.38	24 jul 2013
59	249121	6078244	Luis Berríos	Lote-A	Lo Figueroa	Noria	R	64.0	9	8	0.8	-	1993	2.38	24 jul 2013
60	244943	6073619	Viña Concha Y Toro	Bodega de Vinificación	Rauquén	Pozo	P	46.0	50	42	10	-	1995	1.93	25 jul 2013
61	246536	6081191	Fernando Polanco	Fundo El Almendro	Las Doscientas	Noria	P	66.0	13	12.5	0.9	-	1913	7.00 ND	25 jul 2013
62	246508	6082561	Carmen Rita Quezada	Parcela N°16	Las Doscientas	Noria	P	66.0	7.5	6	1.2	-	2010	3.87 ND	25 jul 2013
63	260948	6082831	Sucesión Medina Inostroza	El Guindo	Huilli Gorgoa	Noria	P	94.0	15	14.5	1	-	2001	8.00 ND	25 jul 2013
64	256579	6079567	Cristóbal Pineda	Parcela N°16	Loteo Buena Vista	Noria	P	135.0	9	8.5	0.8	-	2003	2.41	25 jul 2013
65	256644	6079581	Cristóbal Pineda	Parcela N°16	Loteo Buena Vista	Noria	R	126.0	14	13.5	0.8	-	2012	9.55	25 jul 2013
66	255459	6081278	Sucesión Gajardo Bravo	Santa Patricia	Santa Patricia	Noria	P	131.0	10	9	0.8	-	2005	3.32	25 jul 2013
67	254877	6085613	Juan Días Pacheco	La Patagua	La Patagua	Noria	P	87.0	8	7.5	1.4	-	1983	3.06	25 jul 2013
68	254727	6085993	Municipalidad de Penciahue	Escuela La Patagua	La Patagua	Pozos	P	95.0	33	30	6	-	2012	1.68	26 jul 2013
69	245227	6083149	José Bravo	Parcela N°13	Las Doscientas	Noria	P	57.0	10	9	1	-	2001	1.97 ND	26 jul 2013
70	244984	6082755	Gloria Orellana	-	Las Doscientas	Noria	P	39.0	5	4.5	1	-	1990	1.73	26 jul 2013
71	241513	6080370	Elía Nuñez Segovia	La Chépica	La Chépica	Noria	P	51.0	12	11.5	1	-	2009	8.05 ND	26 jul 2013
72	241586	6080860	Edgardo Nuñez Segovia	La Chépica	La Chépica	Noria	P	51.0	8	7.5	1.5	-	2009	0.96	26 jul 2013
73	239781	6078437	Edgardo Nuñez Segovia	La Ponderosa	El Estero	Noria	P	45.0	4	3.5	0.8	-	2001	1.13	26 jul 2013
74	239428	6077245	Mario Becerra Castro	Traiguén	El Estero	Noria	P	42.0	6.5	6	1.4	-	1913	1.13	26 jul 2013
75	245461	6081945	David Méndez Martínez	-	Penciahue	Noria	S/U	49.0	8	-	1	-	-	1.25	26 jul 2013
76	245667	6080218	Nelson Gómez	Santa Sara	Penciahue	Noria	P	60.0	12	11	1	-	1966	2.53	26 jul 2013
77	246546	6083828	Sucesión Orostica Albornos	Parcela N°1	Las Doscientas	Noria	P	84.0	8	7.5	0.8	-	2003	6.56	27 jul 2013
78	246709	6083769	Sucesión Orostica Albornos	Parcela N°1	Las Doscientas	Noria	P	78.0	8	7.5	0.8	-	2003	3.12	27 jul 2013
79	239145	6076667	Miguel Espinoza	-	El Estero	Noria	S/U	39.0	12	-	0.8	-	2000	3.10	27 jul 2013
80	239168	6075715	César Valdez	-	El Estero	Noria	R - P	36.0	8	7.5	0.8	-	2012	2.87	27 jul 2013
81	238832	6076233	Raúl Araya Araya	El Aromo	El Estero	Noria	S/U	48.0	10	-	1.4	-	1970	1.12	27 jul 2013
82	241478	6077488	Pedro Torres Carreño	Lote N°1	Las Tizas	Noria	S/U	71.0	8	7.5	1.25	-	2008	6.43	27 jul 2013
83	241512	6077436	Pedro Torres Carreño	Lote N°1	Las Tizas	Noria	P	62.0	6	5.5	1	-	2001	-	27 jul 2013
84	242167	6078808	Felipe Vergara Leppe	Lote N°1	Las Tizas	Noria	P	53.0	5	4.5	1	-	1968	2.34	27 jul 2013
85	242116	6078998	Club Deportivo Las Tizas	Club Deportivo Las Tizas	Las Tizas	Noria	P	54.0	12	11.5	1.1	-	1973	2.22	27 jul 2013
86	242150	6079428	Nely Contardo Castro	Cancha de Carrera	Las Tizas	Noria	P	47.0	8	7.5	1.2	-	1940	2.41 ND	27 jul 2013
87	242178	6079481	Sucesión Contardo Abarca	Cancha de Carrera	Las Tizas	Noria	S/U	47.0	8	-	1.2	-	1940	1.53	27 jul 2013
88	245741	6079509	-	Alonso River s/n	Penciahue	Noria	P	61.0	8	7.5	1.05	-	2000	-	07 ago 2013
89	252538	6099186	Fernando Pacheco Mejías	-	Cruce Tapihue, Litu	Noria	P	74.0	6	5.5	0.6	-	2000	3.16	07 ago 2013
90	252089	6099204	Elena Hernández Ramírez	El Espinal	Palmas de Tapihue	Noria	P	77.0	5	4.5	1.2	-	1998	2.52	07 ago 2013
91	253025	6102628	Oscar Contreras Dote	-	Tapihue	Noria	P	104.0	6	5.5	0.8	-	1993	3.78	07 ago 2013
92	253385	6103024	Manuel Antonio Días Avendaño	Lote-1	Tapihue	Noria	P	104.0	4	3.5	1	-	1988	0.72	07 ago 2013
93	253376	6103024	Manuel Antonio Días Avendaño	Lote A-1	Tapihue	Noria	P	93.0	3.5	3	0.8	-	2012	0.92	07 ago 2013
94	253423	6103112	Rogelio Días Avendaño	Lote-B	Tapihue	Noria	P	85.0	3.5	3	0.8	-	2012	0.92	07 ago 2013

Tabla V-1. Catastro de captaciones subterráneas

Ficha	Coord. WGS84 19S		Propietario	Nombre Predio	Ubicación	Tipo	Uso	Cota msnm	Carac. Const.			Constructor	año	NE (ND) [m]	Fecha
	Este [m]	Norte [m]							P. perf. [m]	P. hab. [m]	Sección $\Phi$ ["] - [m]				
95	253524	6103279	Municipalidad Pencahue	Escuela Tapihue	Tapihue	Pozo	P	94.0	40	35	6"	-	2013	5.83	07 ago 2013
96	253482	6102899	Rogelio Díaz Avendaño	Lote-B	Tapihue	Noria	P	91.0	8	7.5	0.8	-	2009	2.42	07 ago 2013
97	251135	6097010	Sucesión Corbalán Arena	Fundo el Espinal	La Orilla	Noria	P	80.0	3.5	3	1.2	-	1988	-	07 ago 2013
98	250210	6095973	Anibal Rodríguez González	El Limón	La Orilla	Noria	P	58.0	7	6.5	0.8	-	2013	0.68	07 ago 2013
99	249137	6088656	Municipalidad Pencahue	Recinto Municipal	Pajonal	Noria	P	56.0	8	7.5	1.1- 2.2	-	1995	1.54 ND	08 ago 2013
100	249142	6088552	Luis Correa Solar	Fundo Pajonal	Pajonal	Noria	P	59.0	12	11	0.86	-	1960	0.62	08 ago 2013
101	249085	6088572	Luis Correa Solar	Fundo Pajonal	Pajonal	Noria	P	60.0	8	7.5	0.84	-	2012	3.67 ND	08 ago 2013
102	249051	6088362	Luis Correa Solar	Fundo Pajonal	Pajonal	Noria	P	54.0	8	7.5	1	-	1986	1.48	08 ago 2013
103	248858	6087868	Oswaldo González	Fundo La Aguada	La Aguada	Noria	P	60.0	8	7.5	1	-	1980	1.48 ND	08 ago 2013
104	248498	6087839	Oswaldo González Morales	Fundo La Aguada	La Aguada	Noria	P	57.0	10	9.5	1	-	2002	5.28	08 ago 2013
105	248522	6087756	Oswaldo González Morales	Fundo La Aguada	La Aguada	Noria	P	60.0	9	8	1	-	2006	3.88	08 ago 2013
106	242464	6081525	Marta Albornoz Castro	Parcela N°9	Matancilla	Noria	P	43.0	14	9	1.45	-	1973	0.9	08 ago 2013
107	249191	6088603	Municipalidad Pencahue	Recinto Municipal	Pajonal	Noria	R-P	61.0	5	4.5	1.2	-	2011	2.03	08 ago 2013
108	249688	6078420	Carlos Acevedo Leppe	La Higuera	Lo Figueroa	Noria	R-P	70.0	4	3.5	1.25	-	2000	0.7	08 ago 2013
109	245996	6078955	-	-	Pencahue	Noria	S/U	81.0	12	12	0.9	-	-	6.26	13 ago 2013
110	245962	6078967	-	-	Pencahue	Noria	S/U	78.0	12	12	0.9	-	2010	6.56	13 ago 2013
111	242173	6079135	Jaime Valenzuela Valenzuela	Sitio-22	Coop. Villa Las Tizas	Noria	P	55.0	9	8.5	1	-	2000	5.32 ND	13 ago 2013
112	242185	6079116	Rosa Correa Díaz	Sitio-21	Coop. Villa Las Tizas	Noria	P	55.0	8.5	8	1	-	2010	2.65	14 ago 2013
113	242210	6078103	-	Sitio-3	Coop. Villa Las Tizas	Noria	S/U	58.0	8	8	0.95	-	2000	3.81	14 ago 2013
114	242080	6079198	Cristian Riveros Varas	Sitio-27	Coop. Villa Las Tizas	Noria	P	52.0	10	9.5	1.1	-	2009	4.48	14 ago 2013
115	242223	6079115	Erica Canales Brant	Sitio-4	Coop. Villa Las Tizas	Noria	P	59.0	8	7.5	1	-	2008	3.19	14 ago 2013
116	242227	6079223	Luis Varas Orostica	Sitio-	Coop. Villa Las Tizas	Noria	P	57.0	8	7.5	1	-	2000	4.47	14 ago 2013
117	242257	6079194	Hugo Sanzana Lagos	Sitio-	Coop. Villa Las Tizas	Pozo	P	60.0	-	-	5"	-	-	15.79	14 ago 2013

### **V.3 Geología**

El presente capítulo está orientado a la delimitación de la zona de relleno y a la identificación de las unidades de roca en el área de interés. Para ello se ha recurrido a toda la información geológica disponible en el SERNAGEOMIN y en estudios anteriores.

Para la delimitación en planta del sistema acuífero principal (relleno), se compatibilizaron distintas fuentes de información. A continuación se describe cada una de ellas, además, se expone la metodología empleada para trazar el contacto roca-relleno.

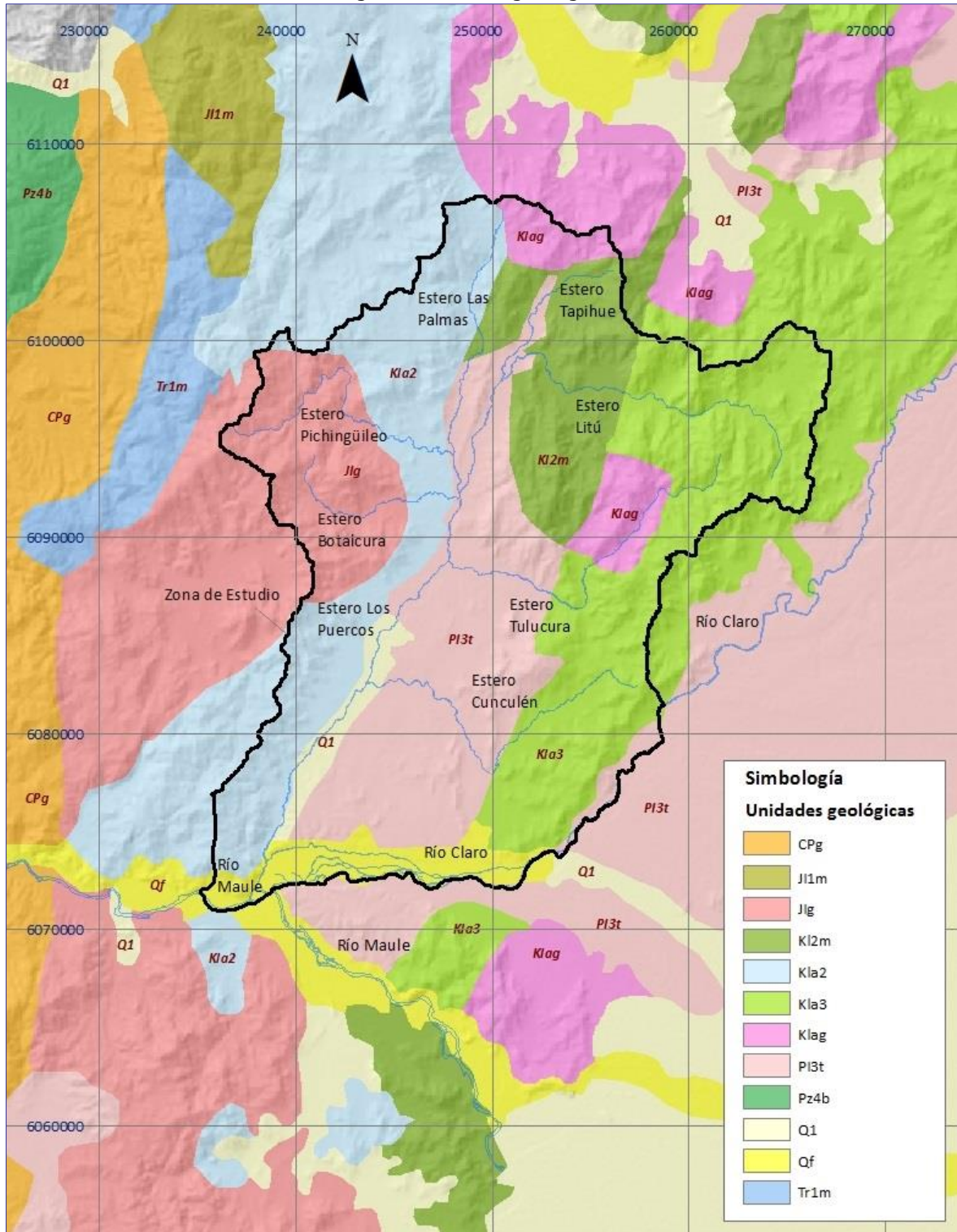
#### **V.3.1 Geología regional**

Con la información del "Mapa geológico de Chile"<sup>3</sup>, se elaboró la Figura V-3. En ella se pueden observar las unidades geológicas principales que existen en el área de interés, en un nivel de detalle regional. La descripción de las unidades que se ubican en el área de estudio, se presentan en la Tabla V-2.

---

<sup>3</sup> Mapa geológico de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003.

Figura V-3. Geología regional



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Tabla V-2. Descripción de unidades geológicas en el área de estudio

Jig: Jurásico Inferior (202-178 Ma). Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita. En la cordillera de la Costa, regiones II a III: Plutones, Flamenco y Caldera-Pajonales.
Kiag: Cretácico inferior alto-Cretácico superior bajo (123-85 Ma). Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. En la cordillera de la Costa, regiones II a IV, al este del sistema de fallas Atacama-El Romeral y asociados a mineralización de Fe-Cu-Au (Candelaria) y Cu-Au (Andacollo); en la cordillera de la Costa, regiones V a X.
PI3t: Pleistoceno. Depósitos piroclásticos, principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. En la depresión central y valles de la cordillera principal, regiones V a VII: Ignimbrita Pudahuel y Toba Loma Seca.
Kia3: Cretácico Inferior alto: Secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas, escasas intercalaciones sedimentarias. En las regiones I y II: formaciones Suca, Punta Barranco y Estratos de Quebrada San Cristóbal; en la Cordillera Patagónica, región XI: Grupo Divisadero.
Q1: Pleistoceno-Holoceno. Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la depresión central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.
Tr1m: Triásico Superior. Secuencias sedimentarias marinas y transicionales: areniscas, conglomerados, limolitas y calizas. En la precordillera y zona costera, regiones II a IV: formaciones Cerro Minado, San Félix y El Quereo.
Qf: Pleistoceno – Holoceno. Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación.
Kia2: Cretácico Inferior alto- Cretácico Superior bajo. Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas. En la Precordillera y Cordillera de la Costa, regiones III a Metropolitana: formaciones Cerrillos, Viñita (occidental) y Las Chilcas.
Ki2m: Cretácico Inferior (Neocomiano). Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas. En la Precordillera, región III: Estratos Cerro El Águila; en la Cordillera Principal, región IV: Formación Los Pelambres; en la Cordillera de la Costa, regiones V y Metropolitana: Formación Lo Prado.
J3i: Jurásico. Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomeraciones basálticas a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: formaciones Camaraca y La Negra; en la Cordillera Principal, región VIII: Formación Nacientes del Biobío (Miembro Icalma).
Ji1m: Jurásico Inferior-Medio. Secuencias sedimentarias marinas litorales o de plataforma: calizas, areniscas calcáreas, lutitas, conglomerados y areniscas con intercalaciones volcanoclásticas y lávicas; basaltos almohadillados. En la precordillera, regiones II a IV: formaciones Montandón y Asientos; en la Cordillera de la Costa; formaciones Pan de Azúcar y Posada Los Hidalgos, en la Cordillera Principal, regiones III a IV: formaciones Lautaro y Tres Cruces; en la Cordillera Principal, regiones VIII y IX: Formación Nacientes del Biobío (Inferior).



### V.3.2 Planos hidrogeológicos de SERNAGEOMIN

Se cuenta con las cartas hidrogeológicas de Chile<sup>4</sup>, elaboradas por el SERNAGEOMIN. Particularmente, la hoja Talca, cubre íntegramente el área de interés e incluye información geológica e hidrogeológica de detalle. Por consiguiente, se usó como base para la caracterización geológica de la zona de estudio.

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)

En el Anexo 10: Carta Hidrogeológica de Chile, se presentan las descripciones de cada unidad. En la Figura V-4 se muestran las unidades geológicas para el área de interés.

Los distintos tipos de depósitos, según sus características hidrogeológicas (ver descripciones en *Anexo 10: Carta Hidrogeológica de Chile*), permiten establecer una jerarquía, en cuanto a los valores permeabilidades asociables a cada unidad sedimentaria. Por lo tanto, esa información se usará para adoptar valores iniciales de permeabilidad en el modelo de flujo subterráneo en las áreas donde no se disponga de datos puntuales de transmisibilidad o permeabilidad (pruebas de bombeo en captaciones).

### V.3.3 Corrección según gravimetría

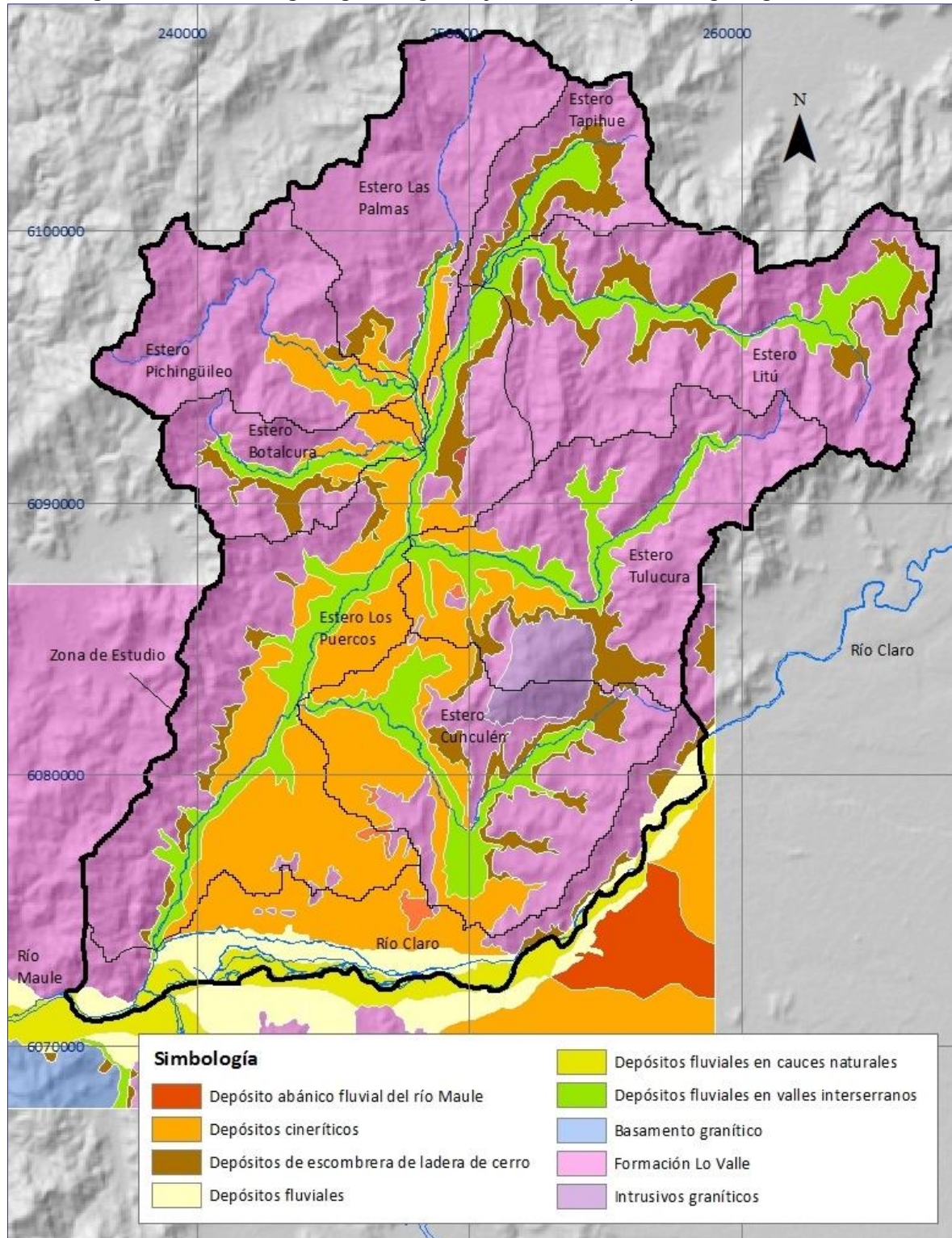
Si bien, la totalidad del área de estudio está cubierta por la hoja Talca descrita en el punto anterior, fue necesario corregir dicha información, según los datos obtenidos en la prospección geofísica realizada para el presente estudio. Se modificaron algunos límites de las unidades de depósitos, según 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-6, que se presenta más adelante.

---

<sup>4</sup> Carta hidrogeológica de Chile, hoja Talca. Arturo Hauser Y. Escala 1:100.000.SERNAGEOMIN 1995.

Figura V-4. Unidades geológicas según hoja Talca de mapa hidrogeológico de Chile



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

## **V.4 Geometría acuífera**

### **V.4.1 Delimitación en planta**

Con la identificación de las unidades sedimentarias (depósitos), realizada en el punto anterior, se definió el contorno del relleno y el rocosa en la zona de interés (ver Figura V-5).

### **V.4.2 Geometría vertical**

Para definir la geometría acuífera en el eje vertical, se usaron los datos de las prospección gravimétrica efectuada en el presente estudio (ver Figura V-6 y *Anexo 13: Perfiles gravimétricos*).

En la Figura V-7, se muestran las curvas de isoprofundidad del relleno. En la Figura V-8 se presenta la profundidad del relleno con una escala cromática, que permite visualizar claramente las zonas de mayor espesor.

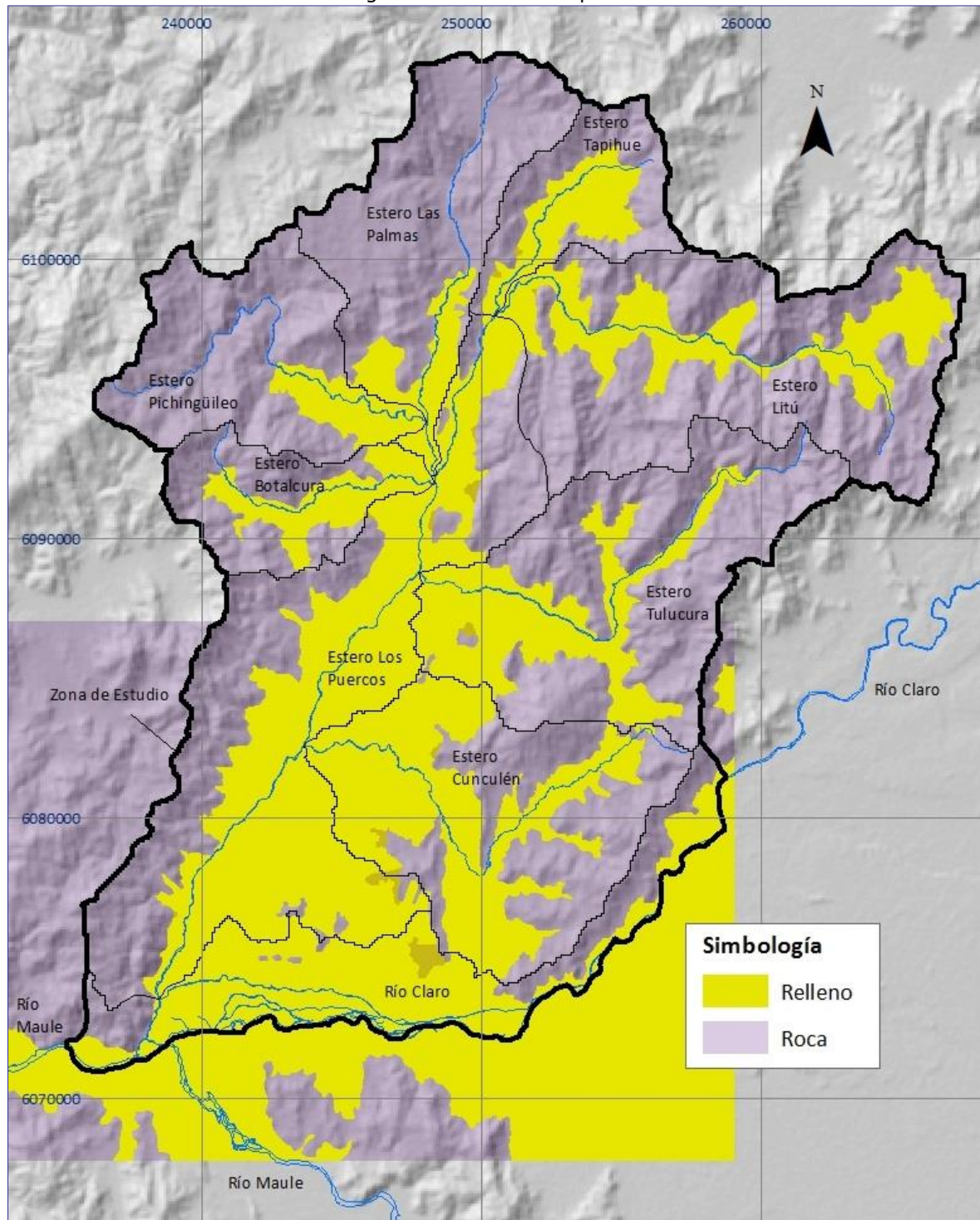
El relleno más profundo (en torno a 145 m), se ubica en torno al cauce del estero los Puercos, aguas abajo de la confluencia de éste con el estero Tulucura.

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 de estudio, permite augurar un potencial limitado, en cuanto a recursos hídricos subterráneos almacenados en los sedimentos. Es por ello, que resulta relevante evaluar los recursos existentes en las unidades de roca que pueden presentar alteraciones.

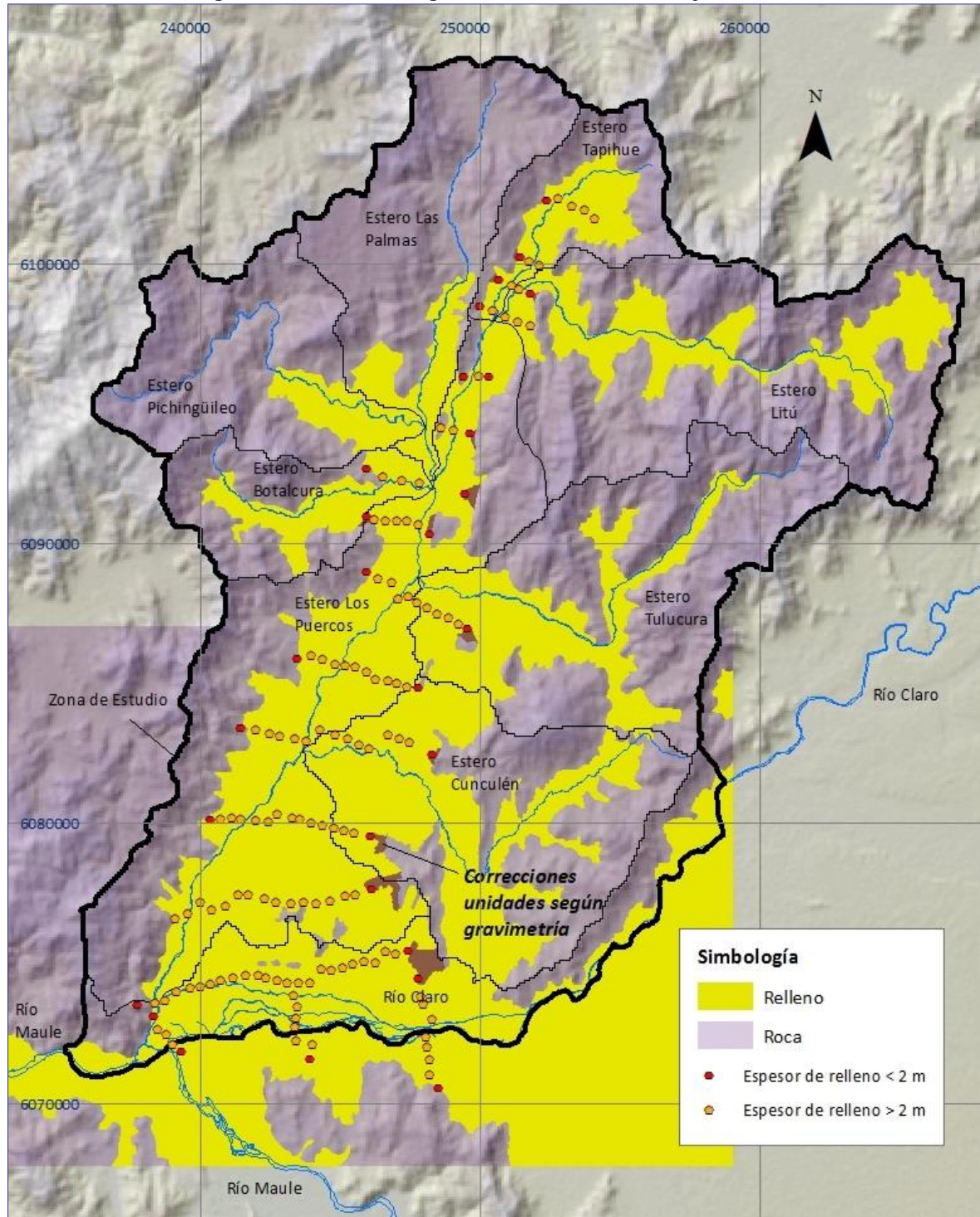
De acuerdo a lo anterior, se concluye que el modelo de flujo subterráneo, debería representar la cuenca de aporte superficial íntegramente, es decir, tanto relleno como roca.

Figura V-5. Relleno en planta



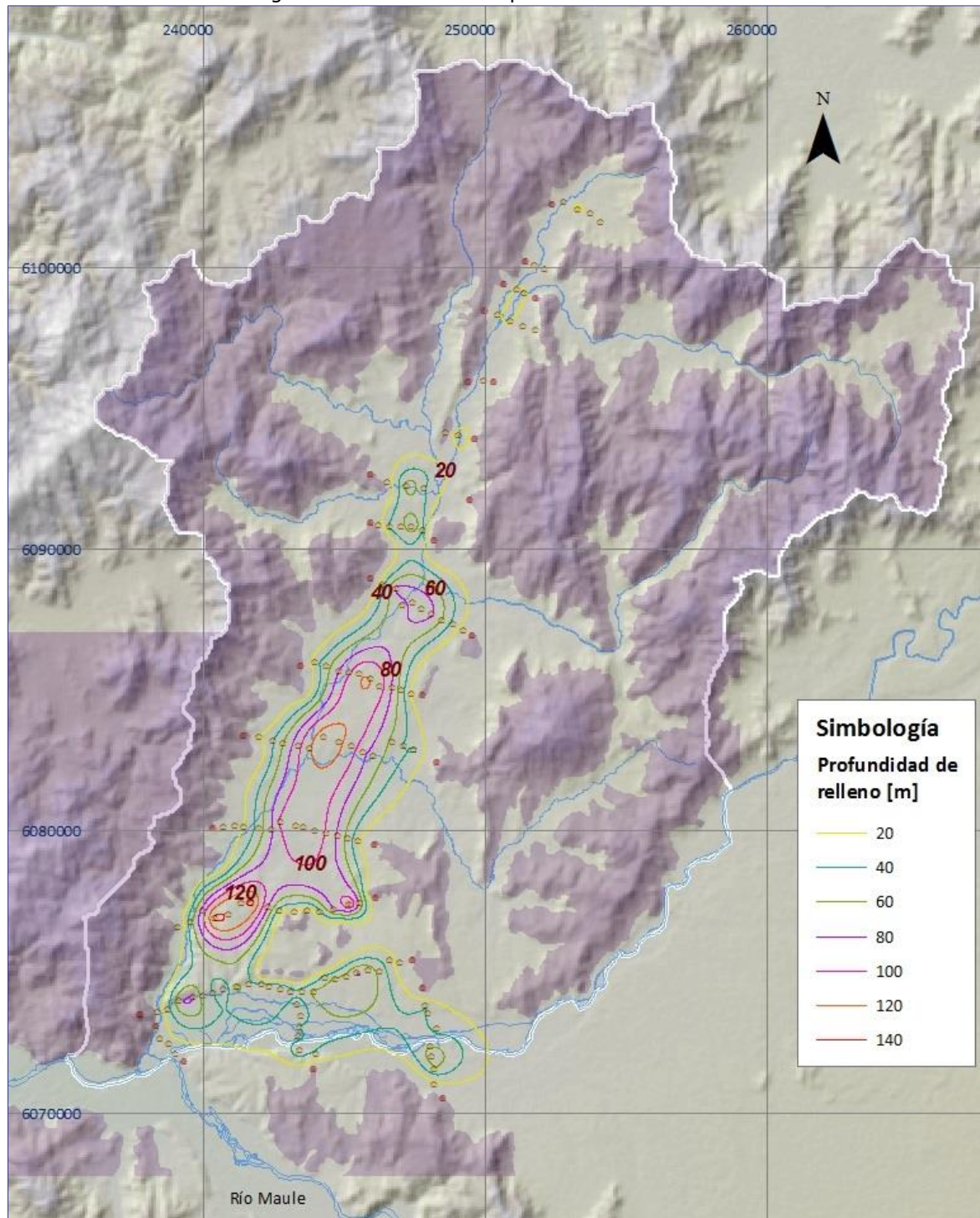
Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura V-6. Estaciones gravimétricas medidas en julio 2013



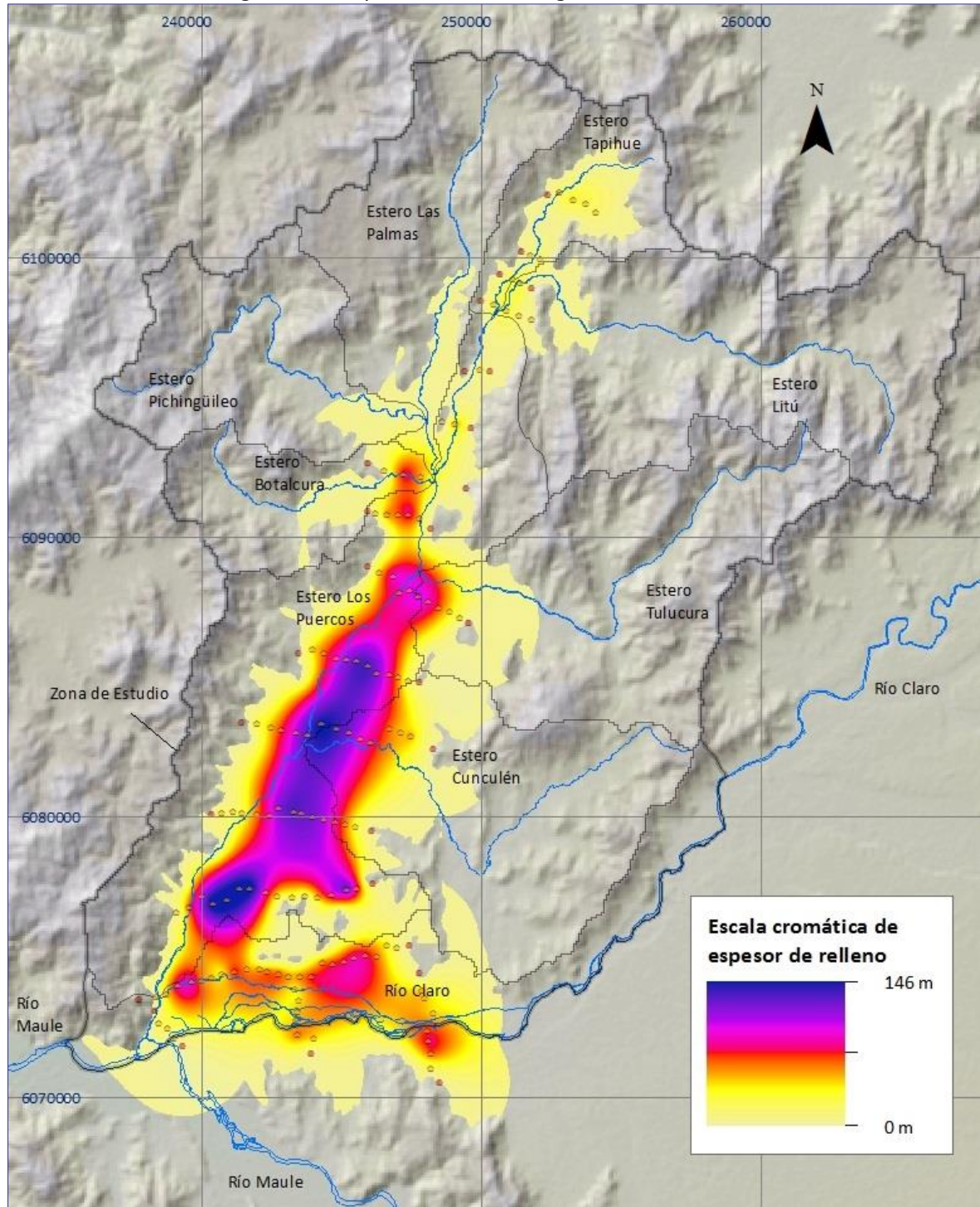
Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura V-7. Curvas de isoprofundidad del relleno



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura V-8. espesor de relleno según escala cromática



## V.5 Propiedades físicas de los acuíferos

Para la estimación de las permeabilidades y las transmisibilidades de los acuíferos del área de interés, se usaron los datos registrados en pruebas de bombeo de gasto variable y gasto constante, realizadas en las captaciones del área de estudio.

Los datos fueron extraídos de los expedientes de derechos de las captaciones y de planos de construcción de las captaciones, recopilados para éste consultor en estudios anteriores.

### V.5.1 Interpretación de pruebas de gasto variable

Con los datos de las pruebas de gasto variable se calcularon las transmisibilidades, usando la ecuación de Dupuit, que se presenta a continuación:

$$T = \frac{Q \cdot \ln(R/r)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta}$$

Con:

T: Transmisibilidad [m<sup>2</sup>/s]

Q: Caudal [m<sup>3</sup>/s]

R: Radio de influencia del sondaje [m]

r: Radio de perforación del sondaje [m]

Δ: Depresión [m]

La expresión  $\ln(R/r)$  se puede aproximar a 7, si se adopta un radio de influencia que varíe entre 200 y 300 m. De esa forma, la ecuación queda:

$$T = \frac{7 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot \Delta}$$

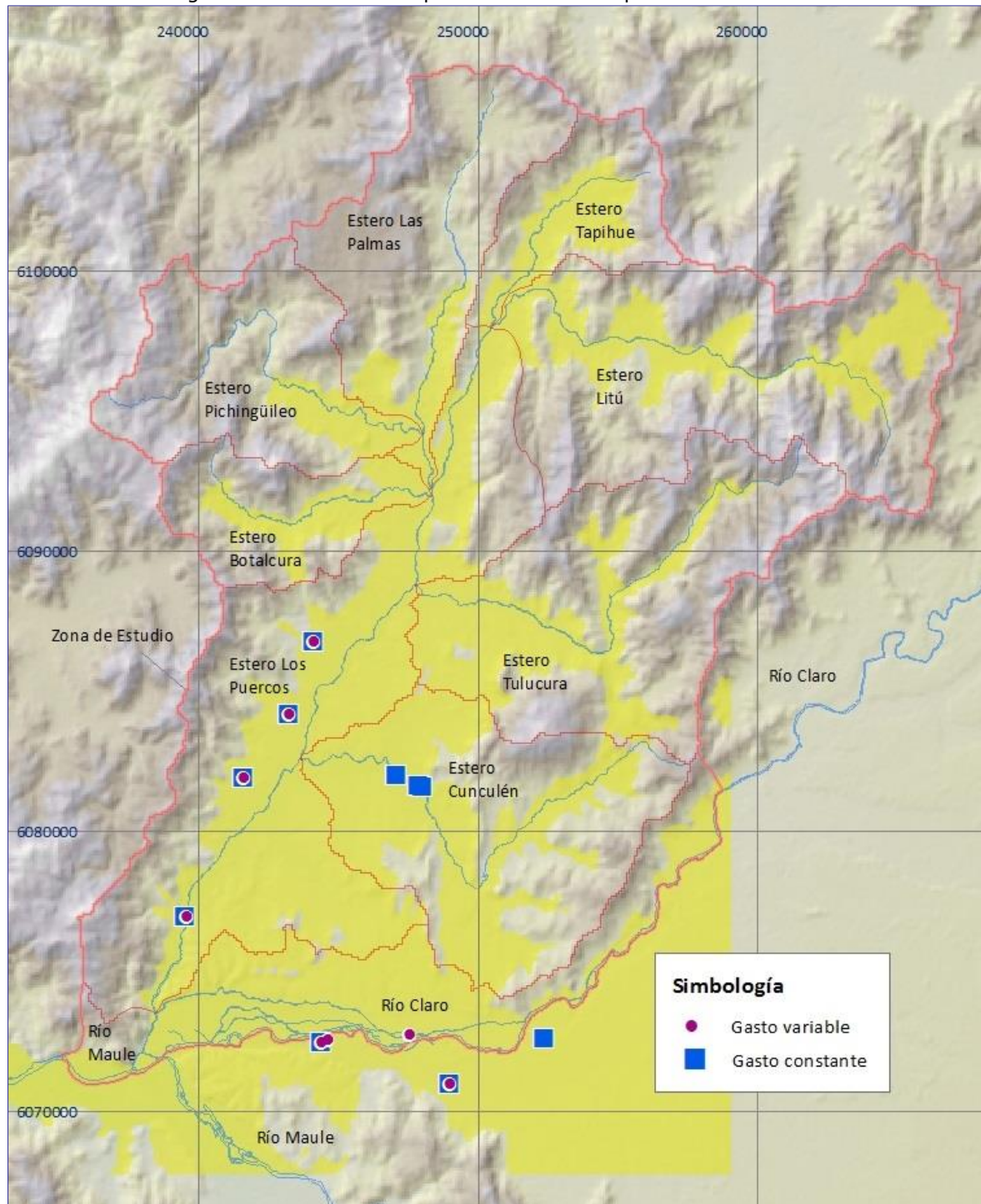
Con los valores de transmisibilidad (T) calculados y los espesores aportantes (H), estimados de la observación directa de las estratigrafías de las captaciones, incluidas en los planos de construcción de los pozos, se calcularon las permeabilidades (k) representativas del relleno, en cada punto con información:

$$k = \frac{T}{H}$$

En el *Anexo 11: Cálculo de las propiedades físicas de los acuíferos* se presentan los valores de transmisibilidades y permeabilidades, determinados en función de los datos de las pruebas de gasto variable. En la Figura V-9 se muestran sus ubicaciones.



Figura V-9. Ubicación de pozos con datos de pruebas de bombeo



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

### V.5.2 Interpretación de pruebas de gasto constante

En las pruebas de gasto constante, para un caudal constante, se mide el nivel dinámico a través del tiempo. Con esos datos, se puede calcular la transmisibilidad y la permeabilidad, usando la ecuación modificada de desequilibrio, que relaciona la depresión del nivel freático ( $\Delta$ ) con el tiempo (t):

$$T = 0,183 * \frac{Q}{\Delta_2 - \Delta_1} * \log(t_2/t_1)$$

Con:

T: transmisibilidad (m<sup>2</sup>/s)

Q: caudal (m<sup>3</sup>/s)

t<sub>i</sub>: tiempo de agotamiento en el instante i (unidad de tiempo cualquiera, cociente)

$\Delta_i$ : depresión en el instante i (m)

La permeabilidad se calcula dividiendo por el espesor saturado:

$$k = \frac{T}{H}$$

En el Anexo 11: Cálculo de las propiedades físicas de los acuíferos se presentan los valores de transmisibilidades y permeabilidades, calculados en función de los datos registrados en las pruebas de bombeo de gasto constante. Las ubicaciones de las captaciones consideradas se muestran en la Figura V-9.

### V.5.3 Valores adoptados

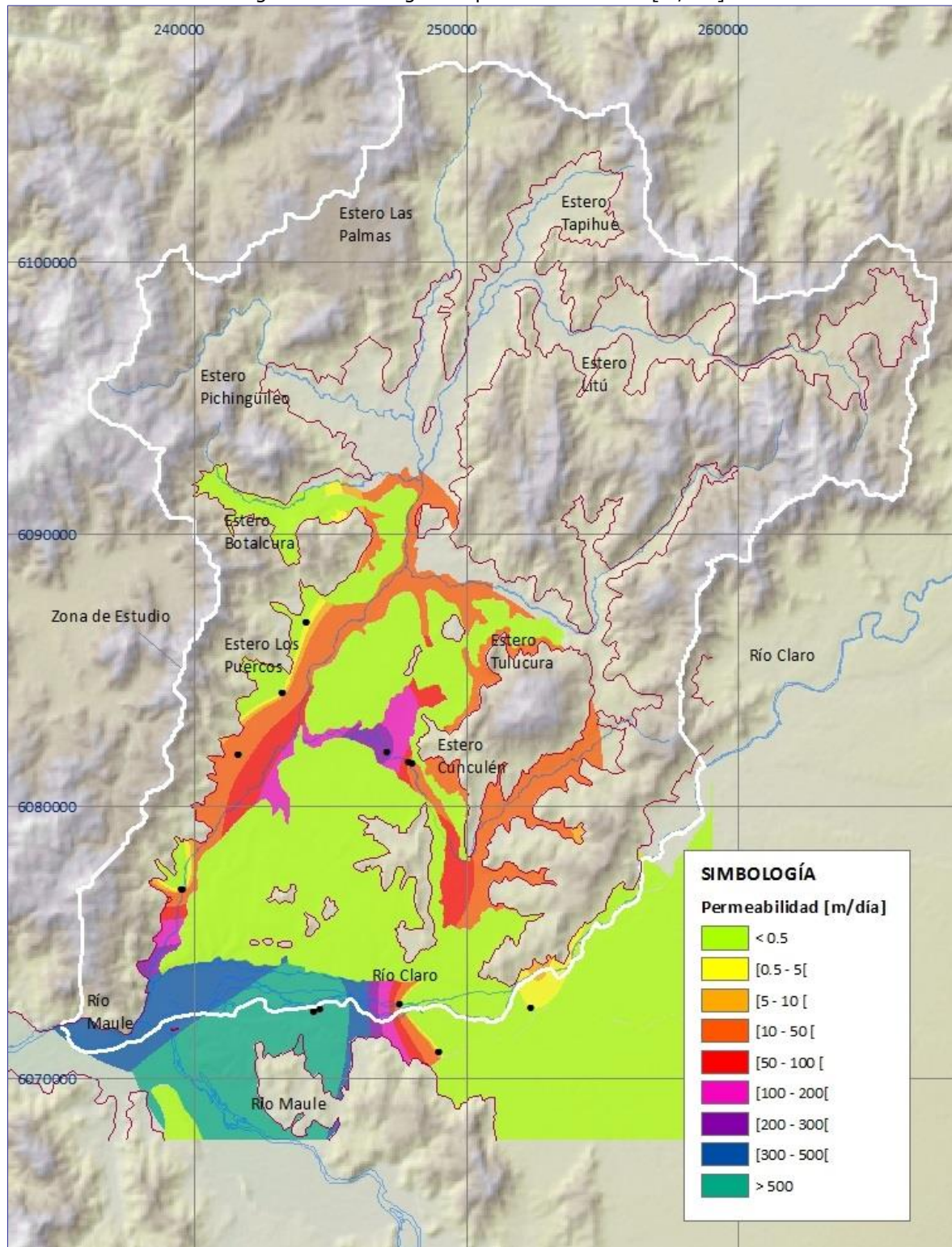
Como se vio en los puntos anteriores, para la determinación de las permeabilidades y transmisibilidades de los acuíferos asociados al estero Los Puercos, se usaron los datos de pruebas de bombeo de gasto variable y de gasto constante.

Las pruebas de gasto constante, generalmente parten del estado estático de la napa y duran más que los intervalos de tiempo que cubren las pruebas de gasto variable para cada caudal, por consiguiente, éstas son más representativas para la estimación de los valores reales de las propiedades físicas de los acuíferos.

Para cada punto con información, se adoptaron valores representativos (ver *Anexo 11: Cálculo de las propiedades físicas de los acuíferos*). 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-10 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.

Figura V-10. Rangos de permeabilidad en [m/día]



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

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

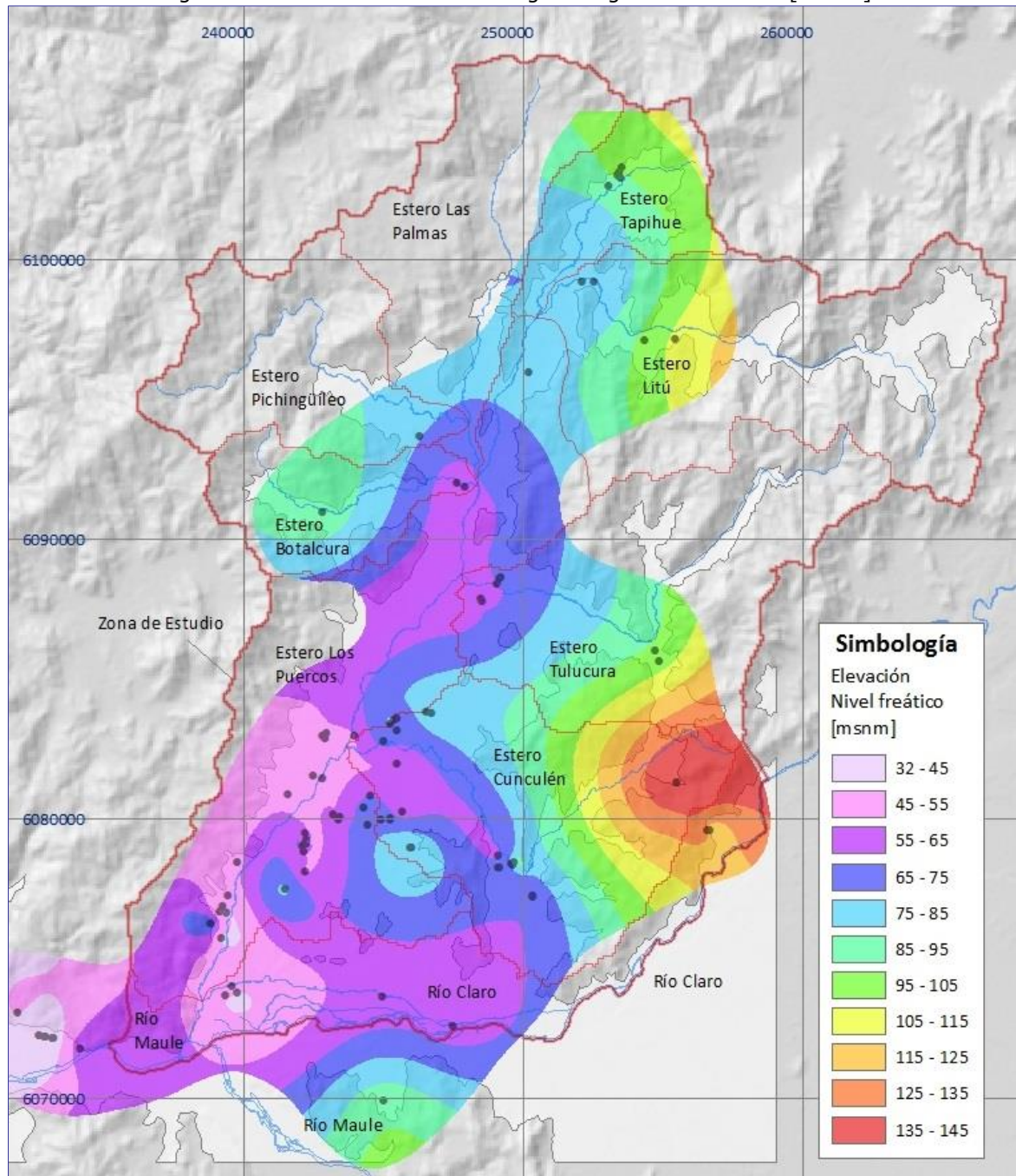
Con los datos de niveles obtenidos en el catastro de captaciones subterráneas<sup>5</sup>, se trazaron las curvas isofreáticas de la Figura V-11 y Figura V-12.

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).

---

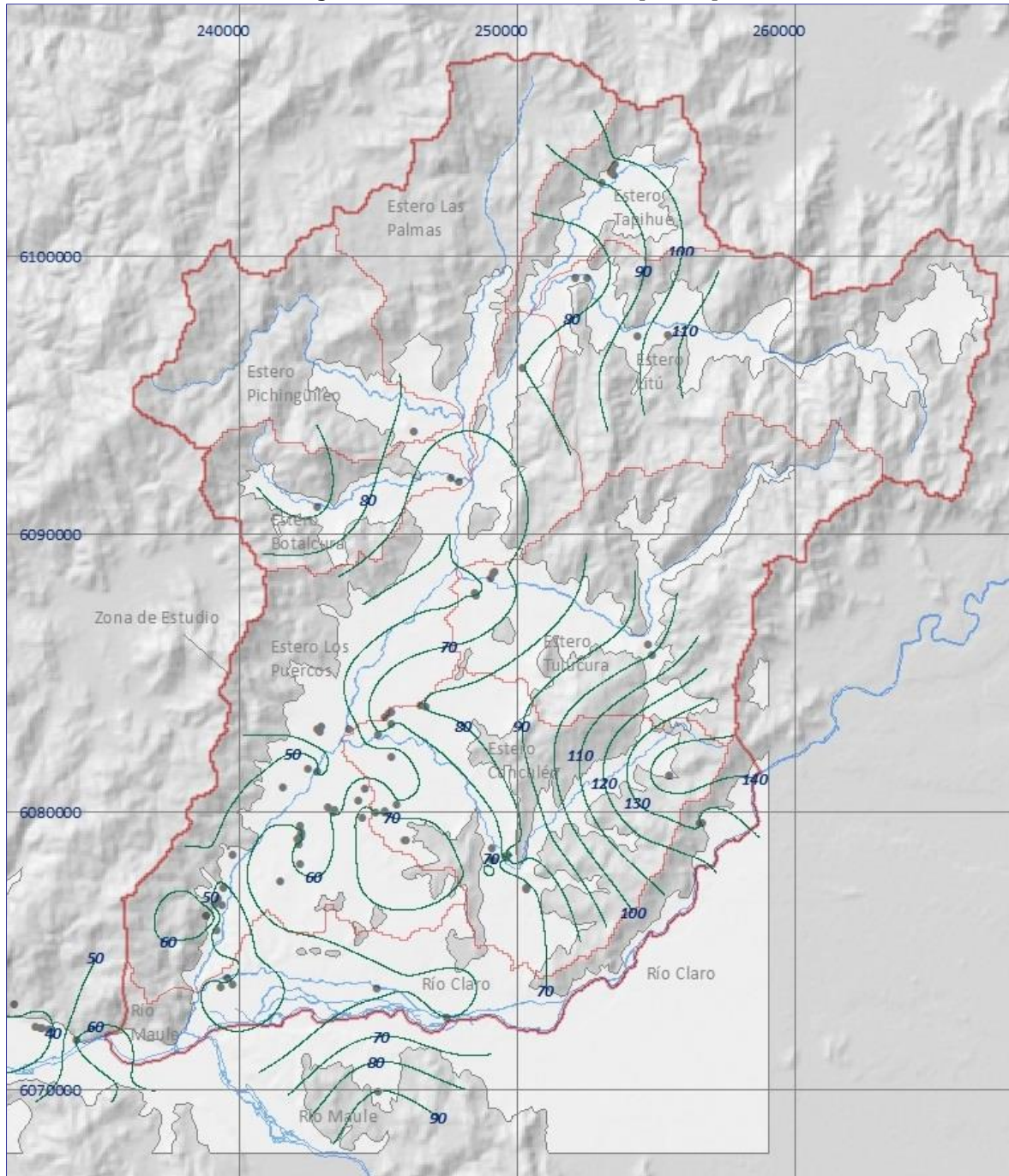
<sup>5</sup> Realizado por GCF en julio de 2013.

Figura V-11. Curvas isofreáticas según rangos de elevación [msnm]



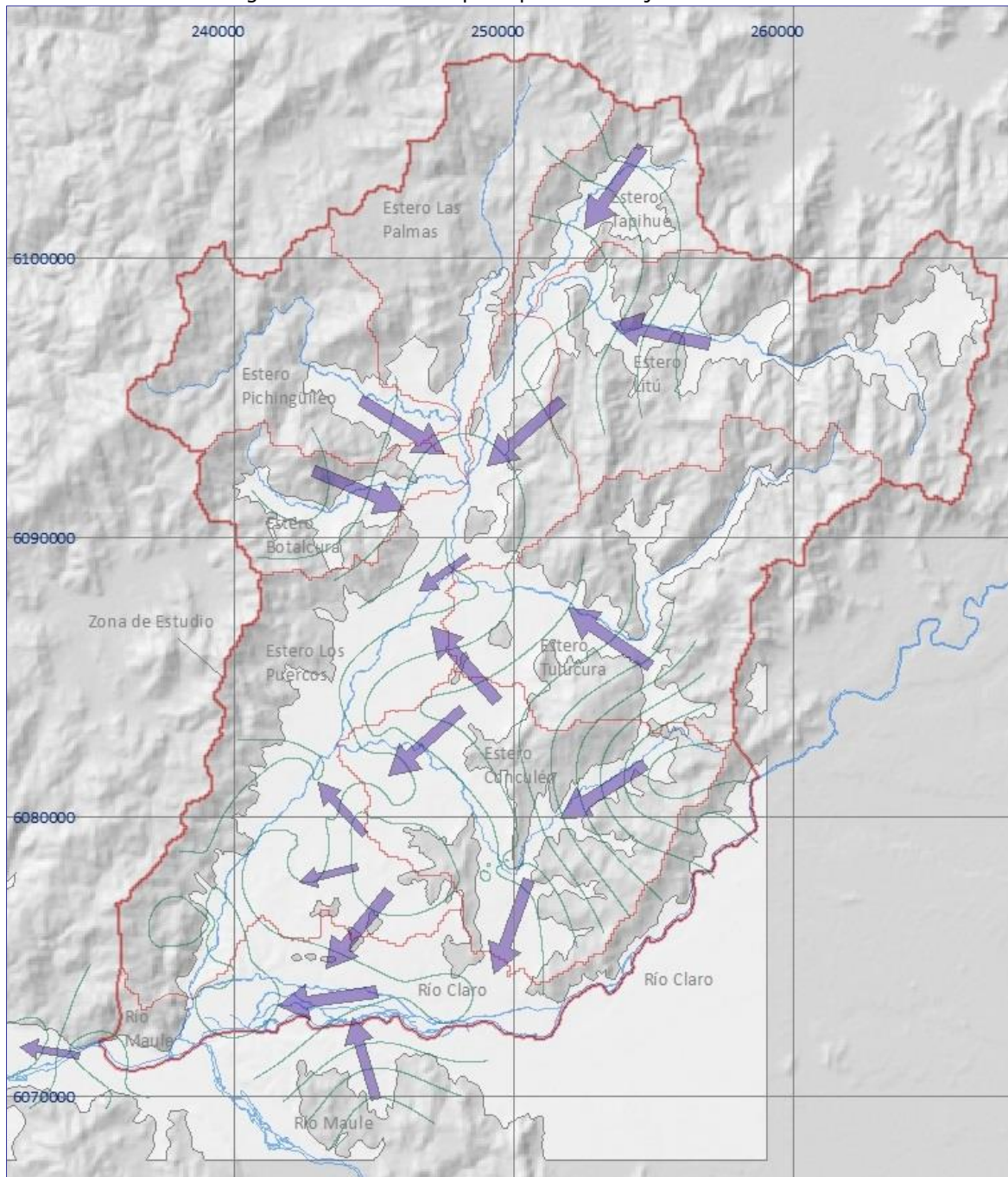
Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura V-12. Curvas isofreáticas [msnm]



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

Figura V-13. Sentidos principales del flujo subterráneo



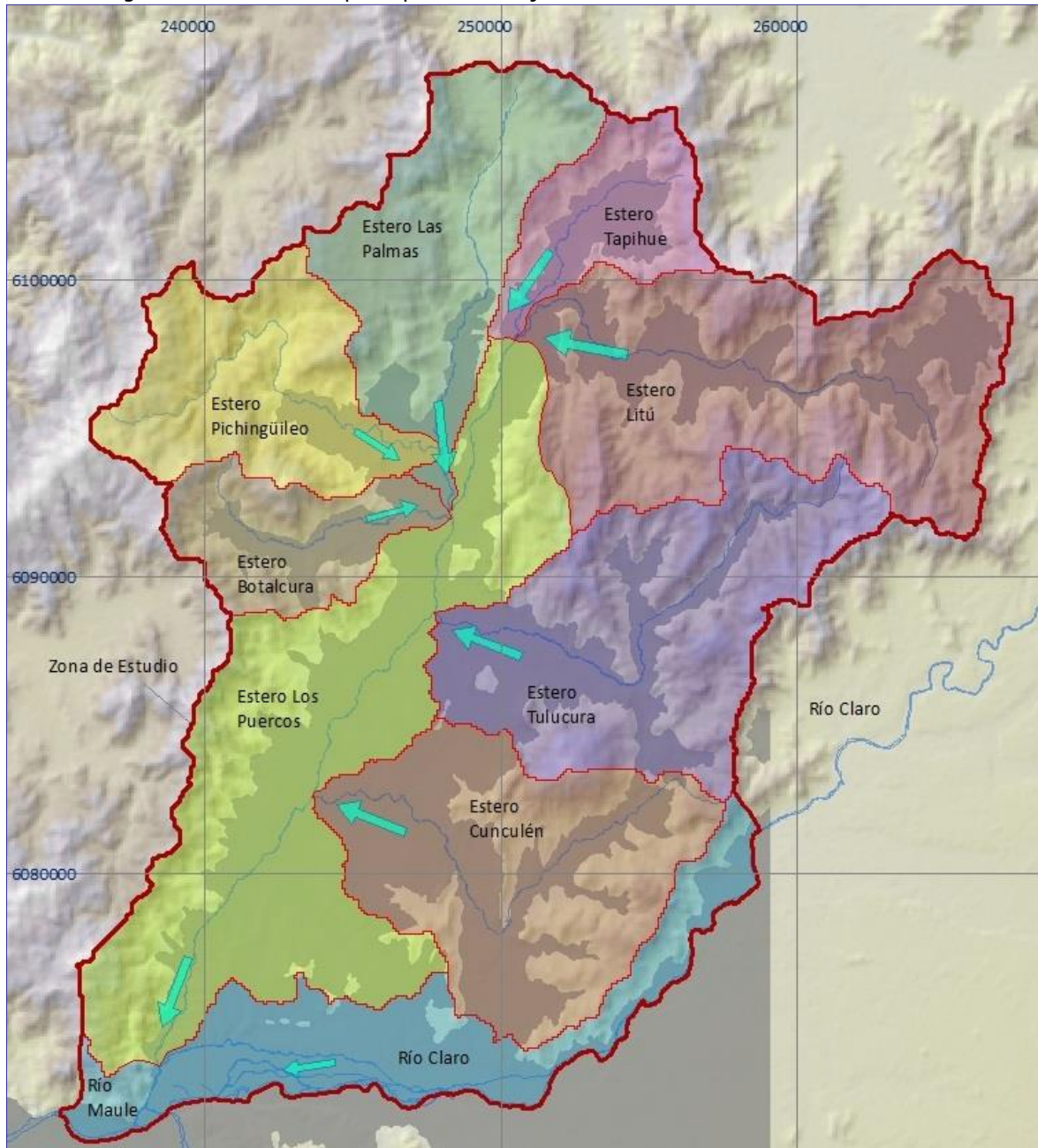
Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S



## 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-14 siguiente.

Figura V-14. 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:

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

Con:

- $Q$  : 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-3 se presentan los valores estimados del flujo potencial pasante por cada uno de los acuíferos de interés:

Tabla V-3. 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 Estudio agronómico (demandas de riego)

#### VI.1.1 Distribución de cultivos

En este subcapítulo se han cuantificado las demandas hídricas, tanto subterráneas como superficiales, asociadas al riego.

Para ello, se solicitó al INE los datos del censo agropecuario de 2007. Dicha información fue entregada (por el INE) como una base de datos en formato Access e incluye las superficies cultivadas con distintas especies vegetales por comuna. El área de interés se encuentra casi íntegramente incluida en la comuna de Pencahue, por lo que la información de esta comuna, se puede adoptar como representativa de la zona de estudio.

El censo contempla un total de 736 tipos de cultivos, agrupados en 7 categorías. Las comunas consideradas, incluyen 98 tipos del total de 736. Los tipos corresponden a distintas especies o una misma especie desagregada según un atributo. El atributo, puede corresponder, por ejemplo, a la fuente hídrica (riego o seco), en la Tabla VI-1 se puede apreciar la clasificación y los códigos usados en el censo agropecuario de 2007.

Tabla VI-1. Atributos asociados a especies vegetales para cada categoría

Categoría	Código del atributo	Descripción del atributo
Cultivo	Riego	Superficie sembrada del cultivo en riego
	Secano	Superficie sembrada del cultivo en seco
Forestal	MA12	Superficie plantada mayor a 12 años
	MA5_12	Superficie plantada mayor a 5 años y menor o igual a 12 años
	MI5	Superficie plantada menor o igual a 5 años
	Total	Superficie total plantada
Forrajera	Riego	Superficie en riego
	Secano	Superficie en seco
Frutal	Plantación	Superficie del frutal plantada año 2006/2007
	Prod	Superficie del frutal en producción
	Total	Superficie del frutal en formación
Hortalizas y Flores	Aire	Superficie al aire libre
	Invernadero	Superficie en invernadero
Viñas	RiegoParr	Parronales en riego
	RiegoViña	Viñas en riego
	Secano	Viñas en seco

En la Tabla VI-2 se presenta el resumen de las áreas asociadas zonas vegetadas<sup>6</sup> en la comuna de Pencahue.

<sup>6</sup> Nota: con "vegetada" se hace referencia a cultivos, bosques nativos y bosques para explotación forestal.

Figura VI-1. Comunas

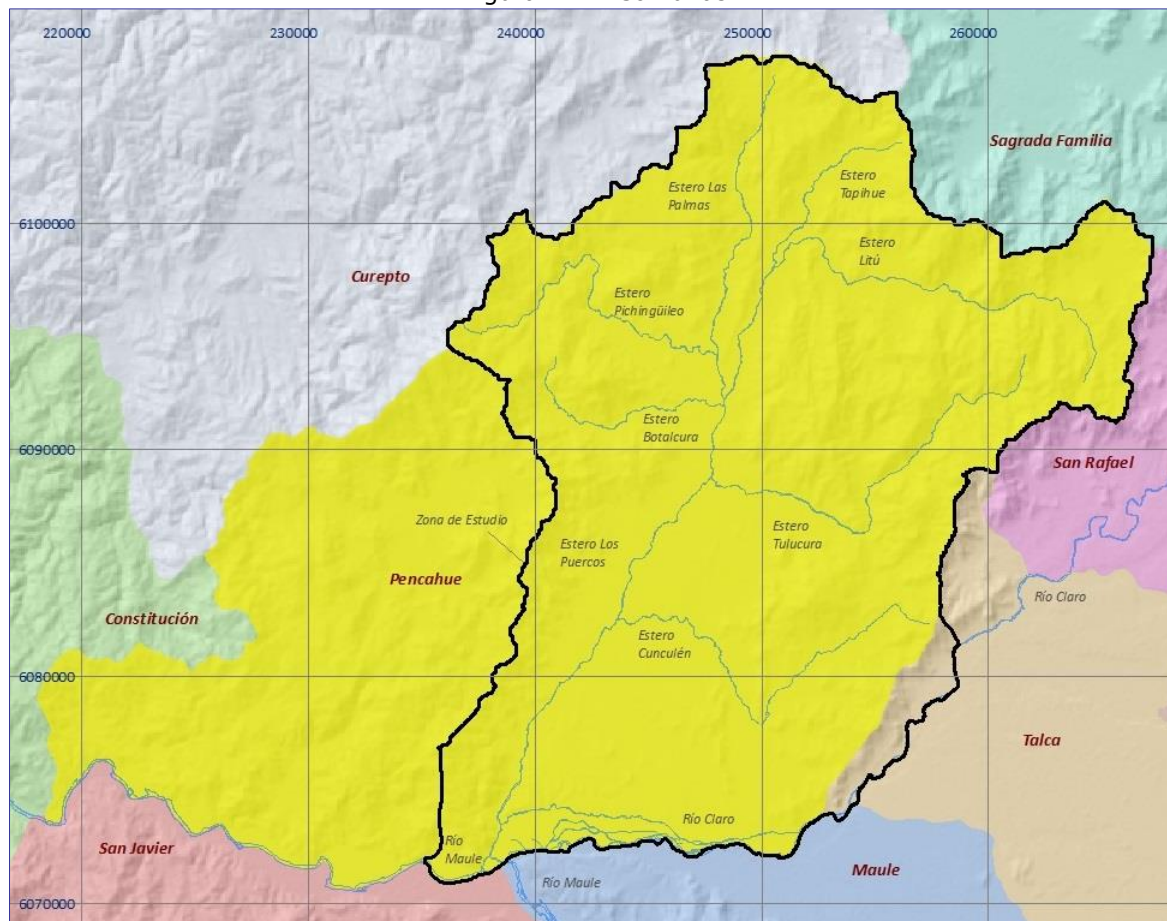


Tabla VI-2. Áreas vegetadas por categorías en comuna de Pencahue [Ha]

<b>Categoría</b>	<b>Área total [Ha] (<math>\Omega_v</math>)</b>
Bosque	4,181
Cultivos	2,060
Forestal	64,408
Forrajera	709
Frutal	3,184
Hortalizas y Flores	8,791
Viñas	4,117
<b>Total</b>	<b>87,449</b>

$$\Omega_{\text{Total Comuna}} = 95,564 \text{ Ha}$$

Además de los tipos de cultivos, el censo agropecuario de 2007 incluye la información de superficies regadas según distintos métodos de riego (ver Tabla VI-3). En la Tabla VI-3 se muestran las eficiencias de aplicación adoptadas para el cálculo de las demandas hídricas para riego.

Tabla VI-3. Áreas cultivadas según método de riego en comuna de Pencahue

Método de riego	Área [Ha]	Eficiencia $\eta$ [1]
Tendido	1526.4	0.35
Surco	1859.0	0.50
Otro	126.2	0.65
Aspersión	44.3	0.75
Carrete	110.0	0.75
Goteo	5229.3	0.90
Microaspersión	0.0	0.85
Total	8895.2	0.716 (prom. pond.)

Fuente de las eficiencias: Reglamento de la Ley 18.450 de fomento a la inversión privada en obras de riego y drenaje. Nota: Las eficiencias están asociadas a conducciones del tipo Californiano

El área regada en la comuna, corresponde principalmente a la zona de riego en el dominio de estudio, con excepción de 140 Ha ubicadas en las localidades de Curtiduría y La Vega. Por consiguiente, se ha considerado que la superficie total regada en el área de estudio es de 8755 Ha.

### VI.1.2 Variables agroclimáticas

En las siguientes tablas se presentan los datos agroclimáticos promedios mensuales para los distritos agroclimáticos presentes en la zona de interés (ver Figura VI-2).

Tabla VI-4. Evapotranspiración potencial [mm/mes]

Distrito agroclimático	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
VII-09	174.0	163.9	136.2	98.5	60.7	33.1	23.0	33.1	60.8	98.5	136.3	163.9	1182.0
VII-12	185.0	174.3	145.2	105.5	65.7	36.7	26.0	36.7	65.8	105.5	145.3	174.3	1266.0
VII-13	188.0	177.0	147.0	106.0	65.0	35.0	24.0	35.0	65.0	106.0	147.0	177.0	1272.0
VII-15	186.0	175.1	145.2	104.5	63.7	33.9	23.0	33.9	63.8	104.5	145.3	175.1	1254.0
VII-16	192.0	180.7	149.7	107.5	65.2	34.3	23.0	34.3	65.3	107.5	149.8	180.7	1290.0

Tabla VI-5. Precipitación [mm/mes]

Distrito agroclimático	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
VII-09	8.3	9.9	14.2	36.7	134.2	161.2	133.2	112.2	46.1	27.0	15.0	11.0	709.0
VII-12	8.9	10.3	15.1	36.8	130.8	155.7	128.8	108.8	45.9	27.0	16.0	12.0	696.1
VII-13	9.9	11.4	16.6	40.2	140.6	167.5	139.6	116.6	49.8	29.9	17.9	13.0	753.0
VII-15	12.2	13.2	20.2	44.3	142.2	167.3	141.2	117.2	54.1	32.0	21.0	15.0	779.9
VII-16	12.9	14.0	21.3	47.1	152.9	179.9	151.9	126.0	58.0	35.0	22.0	16.0	837.0

Nota: Valores preliminares, los definitivos se calcularán con el modelo de precipitaciones

La precipitación efectiva para el mes k, de la Tabla VI-6, se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_{ef}^k = \text{Si}(P^k < E^k, 0, P^k - E^k)$$

Con:

$P^k$  = precipitación promedio mes k

$E^k$  = evapotranspiración potencial promedio mes k.

Tabla VI-6. Precipitación efectiva[mm/mes]

Distrito agroclimático	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
VII-09	0.0	0.0	0.0	0.0	73.5	128.1	110.2	79.1	0.0	0.0	0.0	0.0	390.9
VII-12	0.0	0.0	0.0	0.0	65.1	119.0	102.8	72.1	0.0	0.0	0.0	0.0	359.0
VII-13	0.0	0.0	0.0	0.0	75.6	132.5	115.6	81.6	0.0	0.0	0.0	0.0	405.3
VII-15	0.0	0.0	0.0	0.0	78.5	133.4	118.2	83.3	0.0	0.0	0.0	0.0	413.4
VII-16	0.0	0.0	0.0	0.0	87.7	145.6	128.9	91.7	0.0	0.0	0.0	0.0	453.9

Nota: Valores preliminares, los definitivos se calcularon con el modelo de precipitaciones

### VI.1.3 Demandas por subcuenca

Se identificaron y delimitaron las áreas cultivadas en la zona de estudio (ver Figura VI-3). Para ello, se realizó un reconocimiento visual con Google Earth.

En la comuna de Pencahue, el área identificada como cultivada o arada en Google Earth, resultó de 10849 Ha, sin embargo, la superficie regada según el censo de 2007 debería ser 8755. Por lo tanto, se utilizaron las áreas dibujadas con Google Earth para distribuir la zona de riego por subcuencas, pero 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 (ver Tabla VI-7). En la tabla se incluyen los tipos de cultivos con los identificadores del censo de 2007 y las especies a las que éstos se han asimilado, para disponer de sus respectivos coeficientes de cultivo

Tabla VI-7. Coeficiente de cultivos (kc) [1] de especies existentes en la comuna de Pencahue

N°	C	Tipo de cultivo (Censo)	Asimilado a (kc asociado)	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Ω [Ha]
1	Cultivos	TrigoB_Riego	Trigo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	0.65	0.83	1.06	1.11	1.11	1.04	0.64	93.8
2		Avena_Riego	Avena Grano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.82	0.99	1.15	1.15	1.15	0.75	0.33	1.7
3		Maiz_Riego	Maíz Grano	1.20	0.84	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.83	1.20	1053.4
4		Papa_Riego	Papa	1.12	0.98	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.42	1.00	3.5
5		Tomate_Riego	Tomate Industrial	1.15	0.98	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.92	1.15	388.0
6		Otros_ind_Riego	Otras Especies	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.70	0.70	0.80	10.0
7		OtrosChacras_Riego	Otras Especies	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.70	0.70	0.80	0.6
8		OtrosIndus.2_Riego	Otras Especies	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.70	0.70	0.80	30.0
9		OtrosCereales_Riego	Otras Especies	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.30	0.40	0.40	0.70	0.70	0.80	40.0
10	Frutal	Arandano_Plantacion	Arándano	0.49	0.49	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.35	0.45	60.2
11		Olivo_Plantacion	Olivo	0.44	0.44	0.44	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.44	0.44	821.5
12		Palto_Plantacion	Palto	0.85	0.85	0.82	0.78	0.75	0.75	0.60	0.60	0.60	0.65	0.75	0.85	0.1
13		OtrosF_Plantacion	Otras Especies	0.90	0.90	0.80	0.60	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30	0.60	0.70	0.90	26.1
14		Arandano_Prod	Arándano	0.49	0.49	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.35	0.45	75.3
15		DurazneroF_Prod	Duraznero	0.90	0.80	0.75	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.65	0.75	0.90	7.5
16		DurazneroC_Prod	Duraznero	0.90	0.80	0.75	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.65	0.75	0.90	25.2
17		Limonero_Prod	Limonero	0.60	0.62	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.62	0.60	0.5
18		Olivo_Prod	Olivo	0.44	0.44	0.44	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.44	0.44	345.3
19		HuertoC_Prod	Huerto Casero	0.90	0.90	0.80	0.60	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30	0.60	0.70	0.90	17.7
20		Moras_Prod	Otras Especies	0.90	0.90	0.80	0.60	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30	0.60	0.70	0.90	15.3
21		OtrosF_Prod	Otras Especies	0.90	0.90	0.80	0.60	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30	0.60	0.70	0.90	61.2
22		Arandano_Total	Arándano	0.49	0.49	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.35	0.45	83.5
23		DurazneroF_Total	Duraznero	0.90	0.80	0.75	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.65	0.75	0.90	6.3
24		ManzanoR_Total	Manzano Rojo	1.08	1.08	0.96	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.68	0.88	9.8
25		Olivo_Total	Olivo	0.44	0.44	0.44	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.44	0.44	1509.2
26		Palto_Total	Palto	0.85	0.85	0.82	0.78	0.75	0.75	0.60	0.60	0.60	0.65	0.75	0.85	1.3
27		Tuna_Total	Tuna	0.55	0.55	0.55	0.55	0.50	0.50	0.45	0.45	0.50	0.50	0.50	0.55	1.7
28		OtrosF_Total	Otras Especies	0.90	0.90	0.80	0.60	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30	0.60	0.70	0.90	115.9

Tabla VI-7. Coeficiente de cultivos (kc) [1] de especies existentes en la comuna de Pencahue (continuación)

N°	C	Tipo de cultivo (Censo)	Asimilado a (kc asociado)	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Ω [Ha]
29	Hortalizas y Flores	Reina_aire	Flores	0.90	0.90	0.80	0.60	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30	0.60	0.70	0.90	0.7
30		CebollaT_aire	Cebolla	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.85	1.00	1.00	1.2
31		CebollaA_aire	Cebolla	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.85	1.00	1.00	0.9
32		Choclo_aire	Choclo	1.15	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.80	1.15	6.9
33		Lechuga_aire	Lechuga	0.80	0.90	0.90	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	5.2
34		Melón_aire	Melón	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.60	0.80	1.00	1.00	174.4
35		Pimiento_aire	Pimentón	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.78	1.05	1.00	0.90	2.7
36		Sandía_aire	Sandía	1.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.60	0.80	1.00	77.4
37		Tomate_aire	Tom. Cons. Fresc.	1.15	0.98	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.92	1.15	16.1
38		ZapalloTem_aire	Zapallo Guarda	0.00	0.00	0.00	0.35	0.40	0.40	0.80	0.98	1.01	1.11	0.70	0.00	45.2
39		Zanahoria_aire	Zanahoria	0.80	1.00	1.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.75	0.7
40		Huerta_aire	Huerta Casera	0.58	0.60	0.50	0.31	0.13	0.04	0.11	0.24	0.35	0.35	0.37	0.49	73.7
41		Cilantro_aire	Cilantro	0.00	0.35	0.85	0.90	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.5
42		OtrasHort_aire	Otras Hortalizas	0.80	0.70	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10	0.20	0.40	0.50	0.60	0.70	17.5
43		Ilusion_aire	Flores	0.90	0.90	0.80	0.60	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30	0.60	0.70	0.90	0.3
44		Otras_flores_aire	Flores	0.90	0.90	0.80	0.60	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30	0.60	0.70	0.90	1.3
45		Otras_flores_inver	Flores	0.90	0.90	0.80	0.60	0.20	0.20	0.10	0.10	0.30	0.60	0.70	0.90	585.0
46		Tomate_inver	Tom. Cons. Fresc.	1.15	0.98	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.92	1.15	5257.0
47		OtrasHort_inver	Otras Hortalizas	0.80	0.70	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10	0.20	0.40	0.50	0.60	0.70	2524.0
48		Vifias	TintasFI_RiegoParr	Uva de Mesa	0.85	0.75	0.65	0.45	0.00	0.00	0.00	0.30	0.48	0.65	0.85	30.4
49	TintasCO_RiegoVina		Uva Vinífera	1.05	0.95	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.55	0.80	1.05	109.3	
50	TintasFI_RiegoVina		Uva Vinífera	1.05	0.95	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.55	0.80	1.05	2792.1	
51	BlancasCO_RiegoVina		Uva Vinífera	1.05	0.95	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.55	0.80	1.05	117.3	
52	BlancasFI_RiegoVina		Uva Vinífera	1.05	0.95	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.55	0.80	1.05	271.7	
<b>k<sub>c</sub> promedios ponderados por área</b>				<b>0.92</b>	<b>0.80</b>	<b>0.63</b>	<b>0.13</b>	<b>0.10</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	<b>0.11</b>	<b>0.22</b>	<b>0.56</b>	<b>0.74</b>	<b>0.92</b>	<b>16916</b>

Nota: el área total es de 16916 Ha, que excede el valor adoptado para la superficie regada; esto se debe a que algunas especies son cultivos de secano y la caracterización del censo no necesariamente especifica esta condición para cada especie. Lo anterior no afecta los resultados, dado que la distribución de tipos de cultivos se usa para determinar una distribución promedio de kc para la zona de interés.

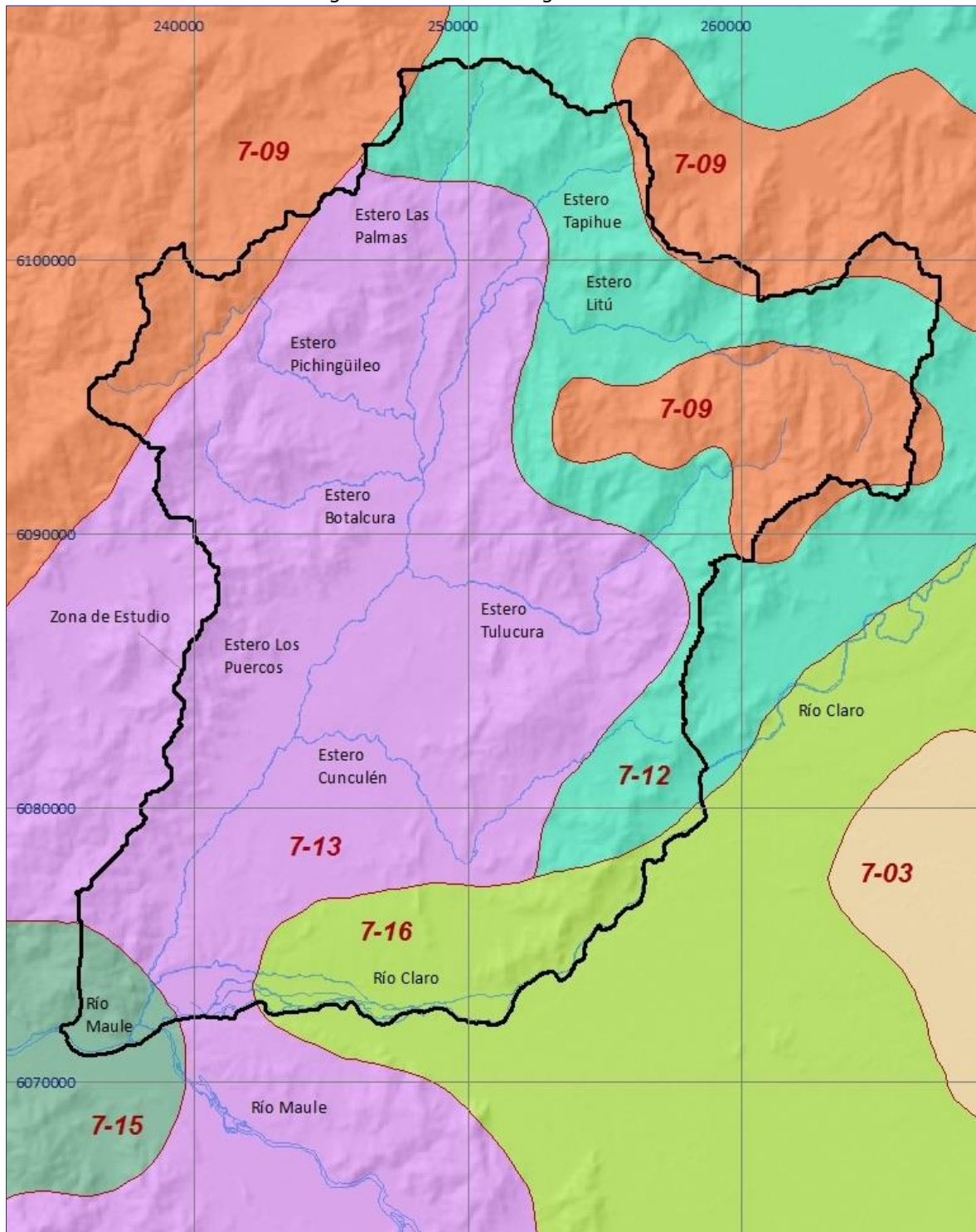
El área total cultivada en la Tabla VI-7es de 16,916 Ha, valor que excede la cifra adoptada para la superficie regada (8755 Ha). Esto se debe a que algunas especies censadas, son cultivos de secano y la caracterización del censo no necesariamente especifica esta condición para todas las especie. Lo anterior no afecta los resultados, dado que la distribución de tipos de cultivos se usó para determinar una distribución promedio de kc para la zona de interés (kc promedios ponderados por área, en Tabla VI-7).

Con los kc, las áreas de riego por subcuenca (ver Figura VI-3) y las variables agroclimáticas promedios mensuales, se calcularon las demandas de riego (ver Tabla VI-8).El cálculo se realizó a nivel de subcuenca. Los valores de la Tabla VI-8, incluyen la eficiencia de aplicación promedio de la comuna (0.716), es decir, corresponden a demandas evapotranspirativas brutas.

Tabla VI-8. Demandas evapotranspirativas brutas de los cultivos [m3/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>

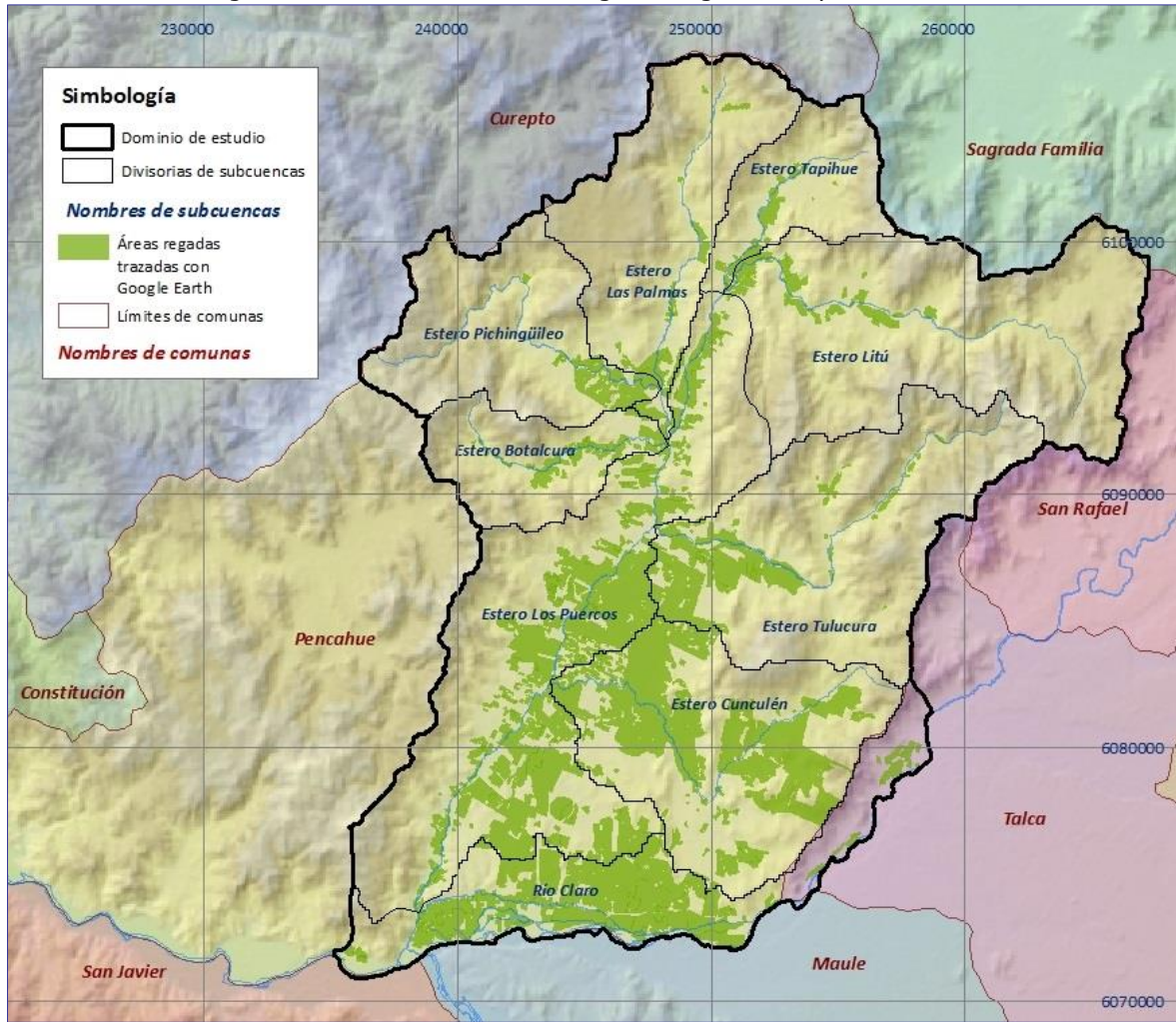
Figura VI-2. Distritos agroclimáticos



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S



Figura VI-3. Zonas cultivadas según Google Earth y subcuencas



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

En la Tabla VI-8 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.

## VI.2 Uso actual de las aguas subterráneas

Este subcapítulo tiene por finalidad realizar un análisis del uso actual del agua subterránea del sistema acuífero en la cuenca del estero Los Puercos, a partir de los datos obtenidos en el catastro de captaciones. Para ello, se han determinado 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 las captaciones de aguas subterráneas existentes se destinan casi exclusivamente al uso doméstico, es decir, al consumo de agua potable.

En los casos en que no se pudo obtener en forma directa la información de caudales de bombeo, se procedió a estimarlos, en función del diámetro de la impulsión, considerando los valores de la siguiente tabla.

Tabla VI-9. Caudales estimados en función del diámetro de la impulsión

Diámetro de la impulsión ["]	Caudal estimado [l/s]
1.0	1
1.5	2
2.0	3
2.5	5
3.0	7
4.0	12
5.0	20

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.

El análisis de la información obtenida del catastro, ha permitido conocer gran parte del número y tipo de captaciones existentes a la fecha, así como el fin a que se destinan las aguas.

En la siguiente tabla se presenta el resumen de la información señalada, ordenada por tipo de captación y por uso.

Tabla VI-10. Número de captaciones cuenca los puercos, por tipo de captación y uso

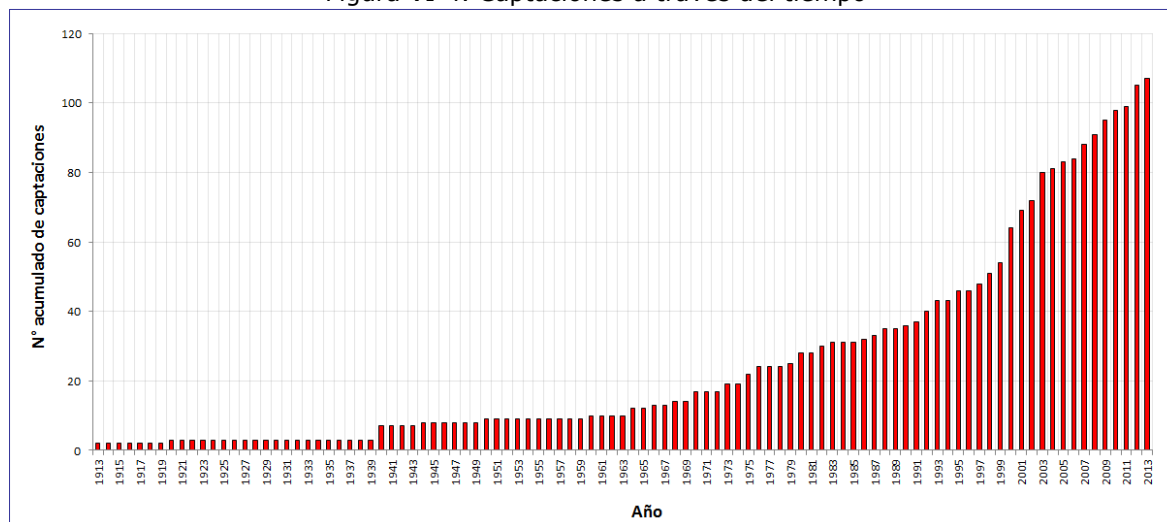
Uso	Tipo de Captación			Total
	Noria	Pozo	Vertiente	
Riego *	16	0	0	16
Agua potable *	63	18	0	81
Sin Uso	14	5	1	20
<b>Total</b>	<b>93</b>	<b>23</b>	<b>1</b>	<b>117</b>

(\*): 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.

### VI.2.1 Construcción de Captaciones en el Tiempo

La información presentada en el Gráfico 1.1-1 siguiente representa la evolución en la construcción de captaciones subterráneas en el tiempo, para la cuenca del estero Los Puercos de acuerdo a los datos obtenidos en el catastro.

Figura VI-4. 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.

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.

### VI.2.2 Uso efectivo del agua subterránea

A partir del análisis de la información obtenida en terreno (catastro de captaciones de aguas subterráneas), se han determinado los volúmenes de extracción de aguas subterráneas por tipo de captación.

Los valores obtenidos, que se presentan en las tablas siguientes, representan los volúmenes de uso efectivo de recursos hídricos subterráneos, asociados a cada uso por temporada.

En la siguiente tabla se presentan los valores de los volúmenes de extracción a partir de las captaciones con información de caudales.

Tabla VI-11. 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
Total	718,937.8	301,149.0

(1): Considerando las 97 captaciones con información.

El número de captaciones consideradas en la determinación de los volúmenes de la tabla anterior, para cada uso, se presenta en la siguiente tabla.

Tabla VI-12. Número de captaciones con información de caudal y frecuencia de uso

Uso	Nº captaciones con información
Potable	78
Riego	2
Mixto R-P *	17
Total	97

(\*): Para efectos de distribuir los volúmenes por uso en las captaciones de uso mixto, que se presentan en la Tabla VI-11, se consideró que el 90% de los volúmenes extraídos se destinan a riego y al 10% a consumo de agua potable.

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-13. 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 verano (oct - mar), el consumo de agua se reparte en forma pareja entre el consumo para agua potable (52%) y el riego (48%), que sólo incluye unas pocas captaciones subterráneas, pues la mayor parte se obtiene de los recursos superficiales del canal Pencahue.

En el período invierno (Abr - Sep), el consumo para agua potable, disminuye en volumen pero aumenta su incidencia relativa, debido a la mayor disminución del riego. Los porcentajes de uso son 77% y 23%, respectivamente.

En resumen, de acuerdo a los antecedentes del catastro de captaciones, realizado en Julio de 2013, cuya información se ha utilizado para elaborar el diagnóstico de la situación del uso actual de las aguas subterráneas, se ha determinado 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.

En términos de volumen, la explotación más relevante del acuífero se produce en verano, siendo muy similares los volúmenes destinados a riego y a agua potable.

En el período invernal, la extracción de aguas subterráneas baja considerablemente, en particular el riego, que se reduce a aproximadamente a un 20% de la extracción del período verano. El consumo en agua potable se reduce a alrededor de un 60%.

Se debe tener en cuenta que pueden haber captaciones no declaradas por sus propietarios, lo que se traduciría en que las extracciones reales desde el sistema acuífero resulten ser mayores a las determinadas a partir del catastro.

## VII Modelos

Uno de los principales objetivos del presente estudio es elaborar una representación matemática del sistema hídrico que permita analizar su funcionamiento y estudiar en detalle la su componente subterránea. Para ello, se han desarrollado distintos modelos, los se listan a continuación junto a las abreviaturas que en adelante se usarán, para referirse a cada uno de ellos.

- 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*<sup>7</sup>)

A continuación, se detalla la concepción y construcción de cada modelo mencionado y cómo se ha usado para concretar la representación del sistema hídrico en el área de interés.

### 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. Como se puede observar en la Figura VII-1, la delimitación subterránea difiere de la superficial (ver Figura V-14). Por ejemplo, fue necesario dividir la cuenca superficial del estero Cunculén, dado que las isofreáticas indican que existe una descarga subterránea hacia el río Claro (ver Figura VII-1).

También la zona de confluencia de los esteros Las Palmas, Pichingüileo y Botalcura, que es posible dividirla superficialmente, se ha representado subterráneamente como un sólo sector.

A continuación se listan los principales aspectos determinan la conceptualización del sistema:

- a) Abundante presencia de cauces naturales
- b) Flujos en roca alterada
- c) Captaciones en áreas donde no existe relleno sedimentario
- d) Extensión del área de interés ( $\approx 33 \text{ km} \cdot 36 \text{ km}$ )
- e) Variabilidad estratigráfica local

---

<sup>7</sup>El MFS es un modelo de flujo subterráneo, materializado con una malla de diferencias finitas, y desarrollado con el programa Visual Modflow.

De acuerdo lo anterior, el sistema acuífero debería representarse como un estrato único, de permeabilidad equivalente, vinculado con los cauces naturales más relevantes. La zona activa debe incluir la cuenca de aporte superficial completa, es decir relleno y zonas de roca. Se deben diferenciar las zonas que corresponden a relleno de las de unidades rocosas, usando valores de permeabilidades equivalentes de distintos órdenes de magnitud. En Figura VII-3 se muestra un esquema con la conceptualización desarrollada.

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

También se pueden presentar casos en los que el nivel piezométrico es surgente, originado vertientes o afloramientos, como se puede visualizar en el esquema.

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

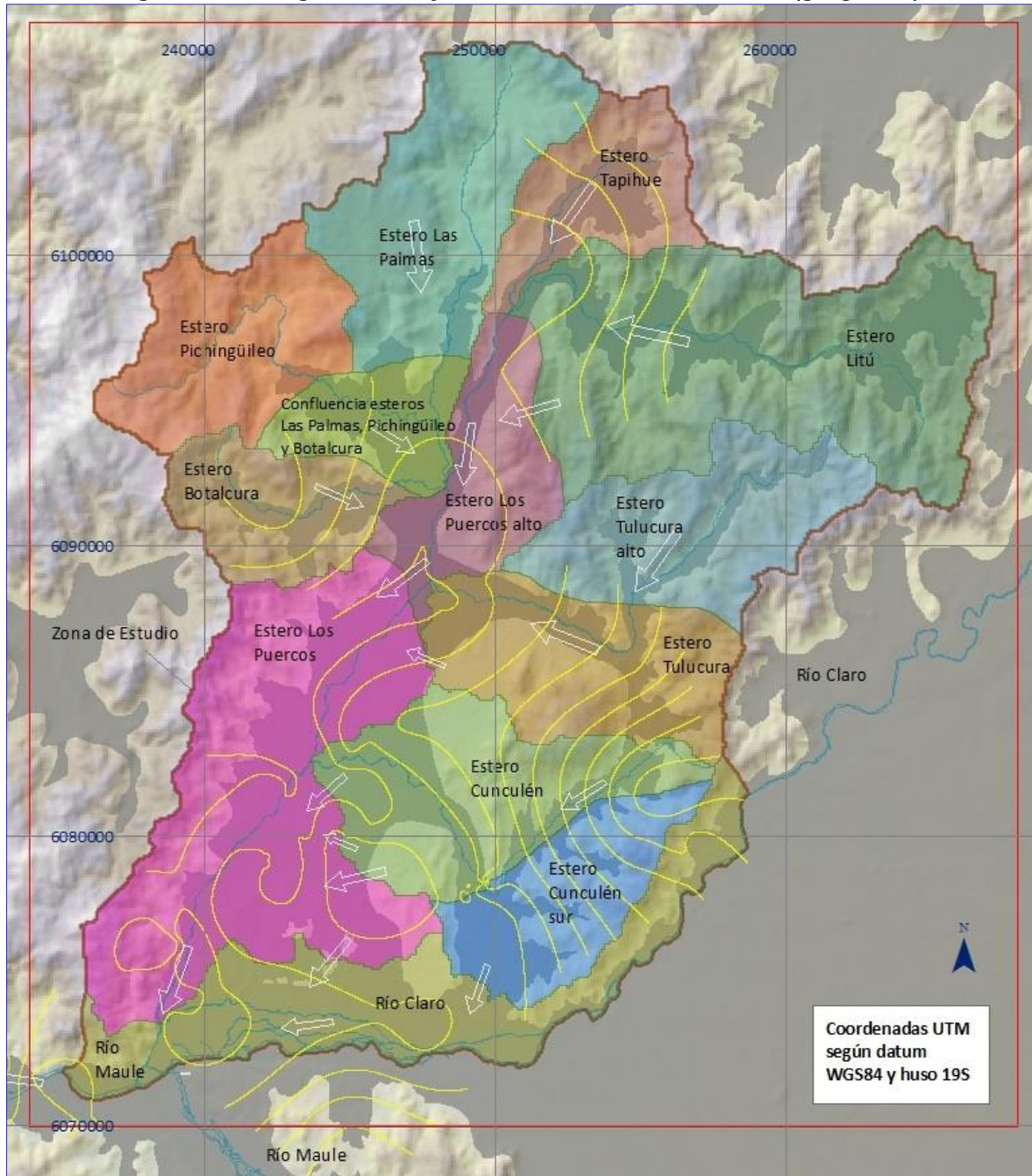




Figura VII-2. Diagrama de flujo subterráneo sistema Pencahue

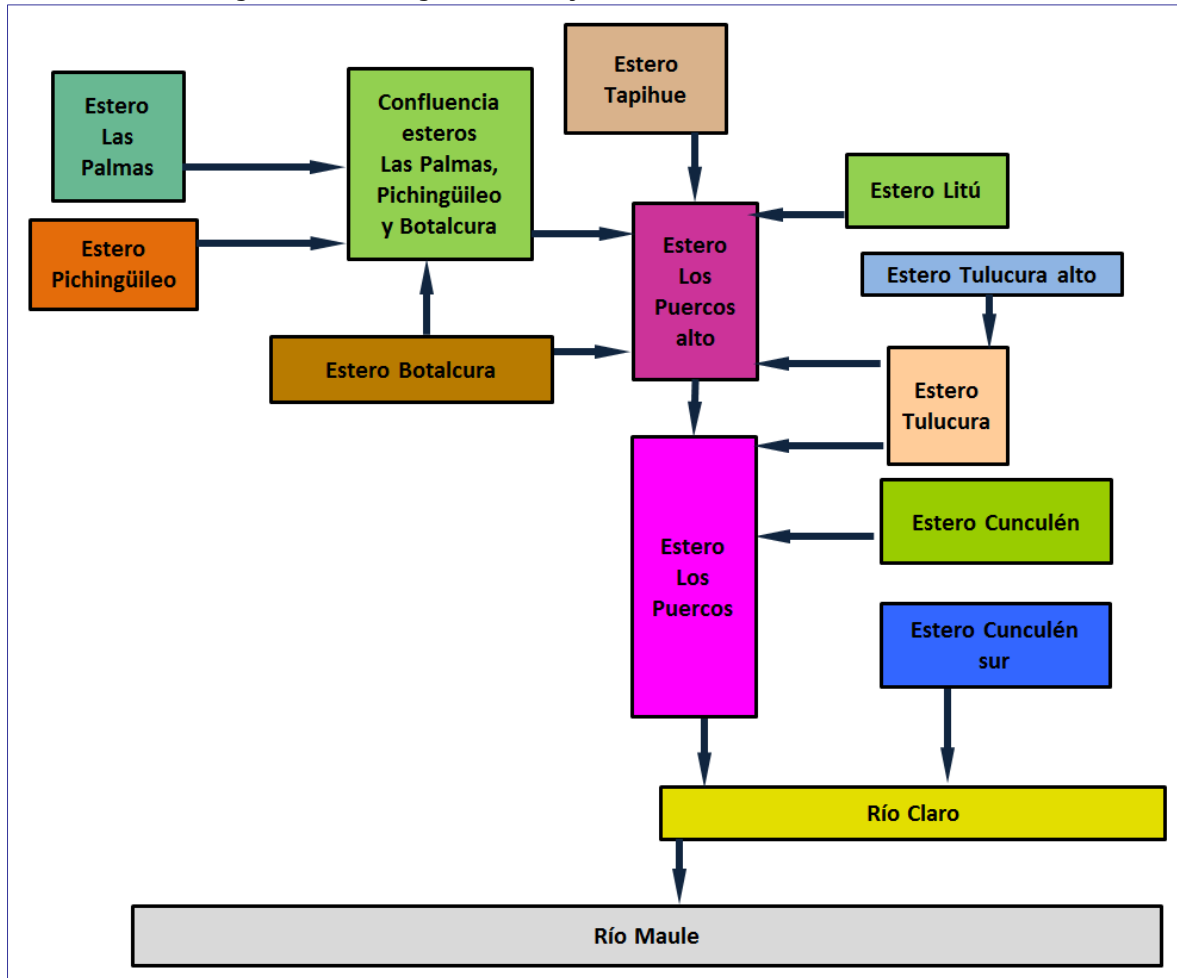
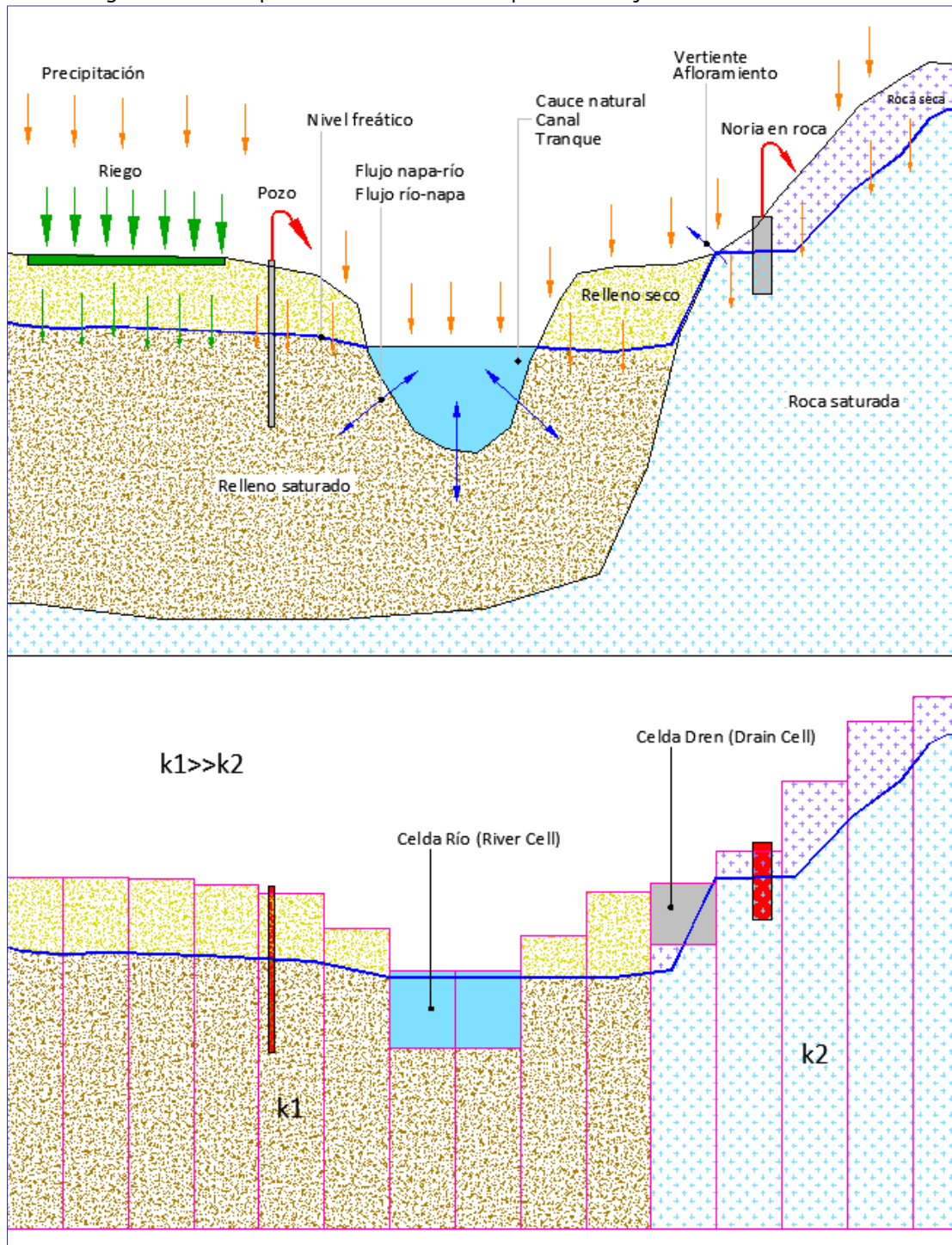


Figura VII-3. Esquema del modelo conceptual del flujo en el área de estudio



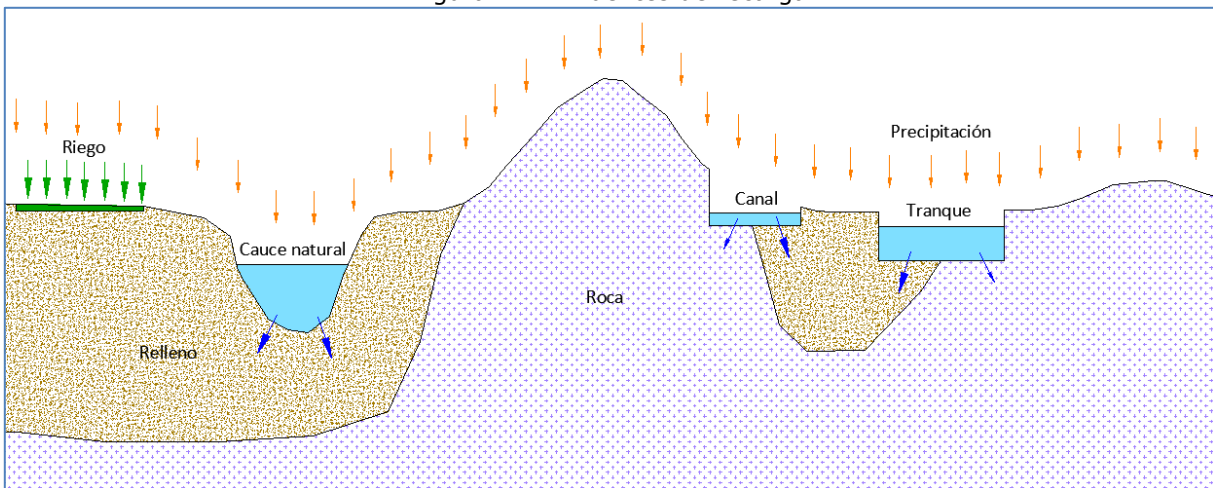
## VII.2 Modelo de recargas

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.

- a) Modelo de distribución espacial de precipitaciones
- b) Modelo de escorrentía superficial para definición de celdas del tipo río (*river cells*, en modelo de flujo subterráneo)
- c) Modelo de recargas por riego

Los mecanismos de recarga al sistema acuífero, se pueden diferenciar según las fuentes de recarga (ver Figura VII-4).

Figura VII-4. Fuentes de recarga



El modelo de recarga solicitado en las bases del estudio, se relaciona sólo con las recargas superficiales distribuidas, que corresponden a las provenientes del riego y de las precipitaciones. Sin embargo, dado que los flujos del sistema están relacionados entre sí, se ha abordado en este capítulo, la conceptualización y la cuantificación de las recargas, tanto superficiales distribuidas, como longitudinales (cauces naturales y canales). En lugar de un modelo único de recargas, se han desarrollado modelos individuales, para cada componente, cuyos resultados se relacionan con el modelo de flujo subterráneo.

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.

Las permeabilidades y los niveles freáticos se obtienen de la operación del modelo hidrogeológico, tras su calibración, por lo tanto, el modelo de recargas sólo es capaz de cuantificar la recarga potencial al acuífero. La recarga efectiva se obtiene tras operar el modelo subterráneo, compatibilizando las recargas potenciales con el funcionamiento del sistema hídrico subterráneo.

A continuación se detalla la forma en la que se estimarán las recargas potenciales asociadas a cada una de las fuentes esquematizadas en la Figura VII-4.

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

Para calcular la recarga efectiva por precipitaciones, se requiere contar con la precipitación distribuida espacialmente y su variación en el tiempo, esto es:

$$P(x,y,z,t) = \text{precipitación en el mes } t \text{ en las coordenadas } [x,y]$$

Se dispone de datos mensuales de precipitaciones medidas y rellenadas en 22 estaciones ubicadas en el entorno del área de estudio, para el período comprendido entre enero de 1956 a febrero de 2013.

Se ha elaborado un modelo de distribución espacial para calcular la precipitación en algún punto en particular del área de interés o la precipitación promedio de un sector específico.

El dominio del MDEP coincide con la malla de diferencias finitas del MFS; 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, dadas por los polígonos de la Figura VII-5.

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 discretización temporal requerida (lluvia semestral, ver punto VII.3.6). En la Figura VII-6 se muestran los resultados para el dominio activo MFS, correspondientes a un mes lluvioso (junio de 2011).

Figura VII-5. Modelo de distribución espacial de precipitaciones

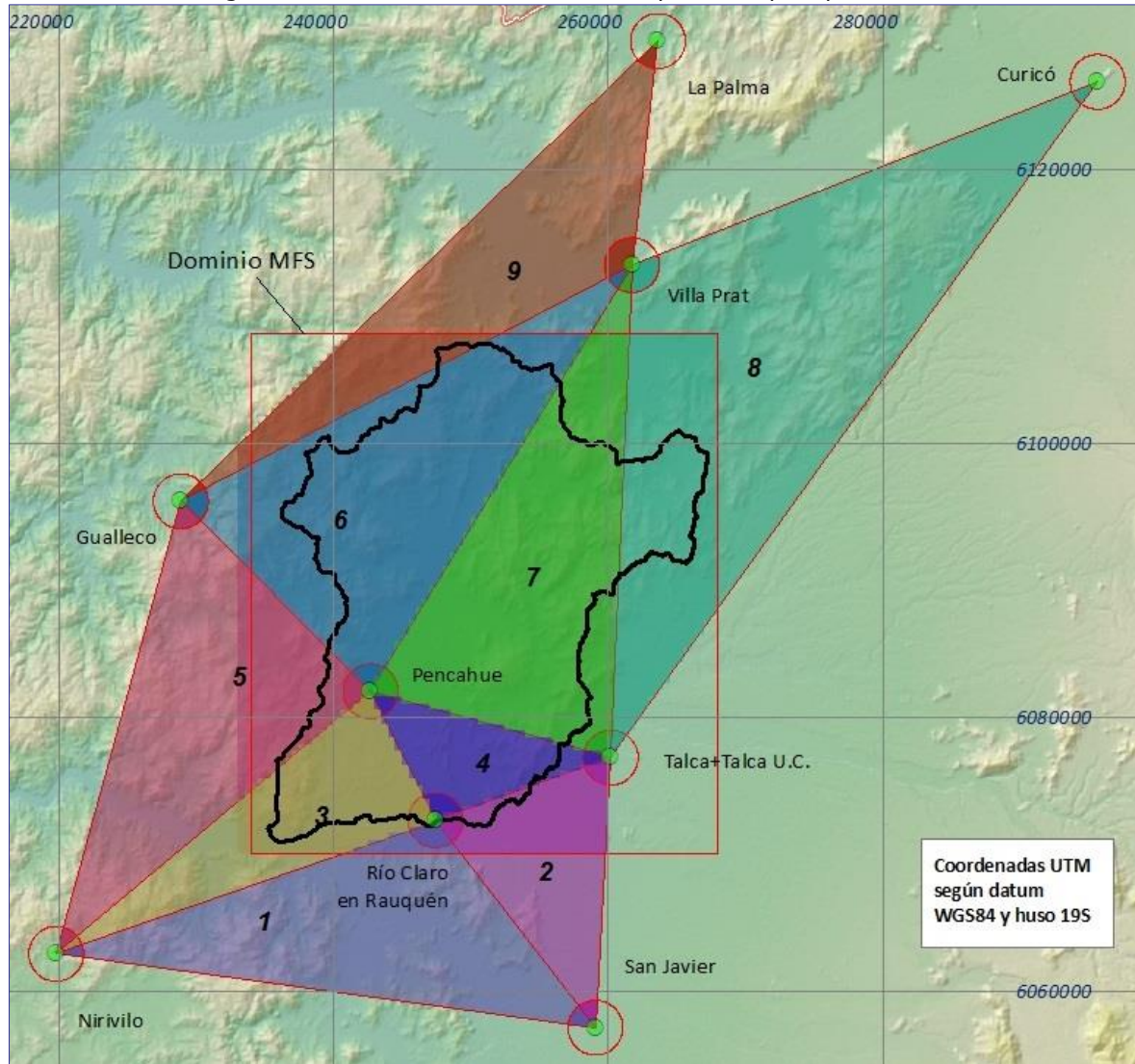
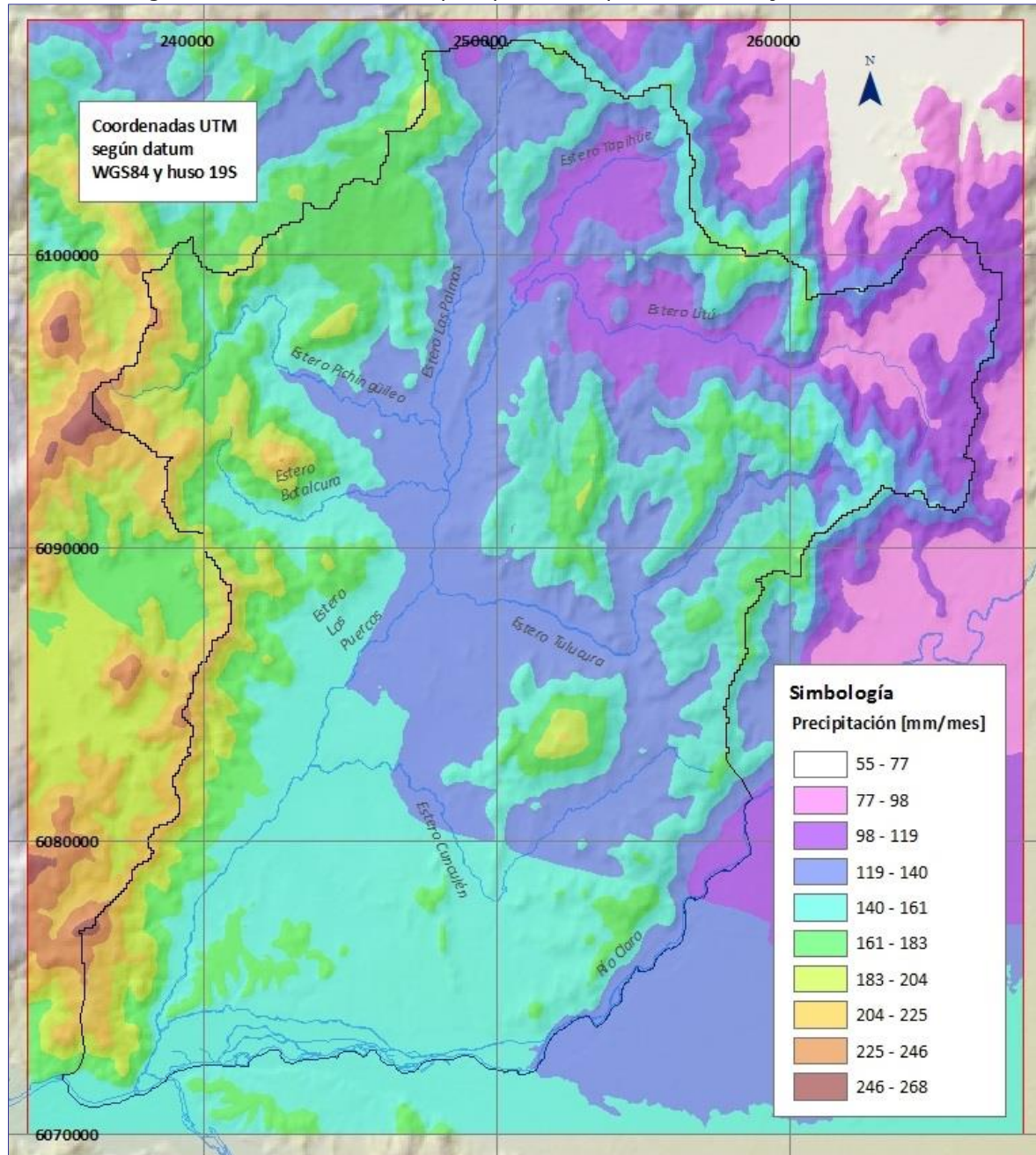


Figura VII-6. Distribución de precipitaciones para el mes de junio de 2011



## 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 han usado las siguientes ecuaciones y variables, válidas para un subsector en el área de estudio:

Especie cultivada<sup>(8)</sup>:  $e$

Comuna:  $c$

Proporción cultivada con especie  $e$  en comuna  $c$  <sup>(8)</sup>:  $P_e^c$

Demanda evapotranspirativa mensual de la especie  $e$  en el mes  $m$ :

$D_e^m = E \cdot k_e^m$  ( $E$  = Evaporación de referencia;  $k_e^m$  = coeficiente de cultivo de especie  $e$  mes  $m$ )

Superficie cultivada <sup>(9)</sup> :  $\Omega$

Superficie asociada a la especie  $e$ :  $\Omega_e = P_e^c \cdot \Omega$

Caudal requerido para riego de la especie  $e$  en el mes  $m$ :  $QR_e^m = D_e^m \cdot \Omega_e$

Superficie de especie  $e$ , regada según método  $e$ :  $\Omega_e^M$

Eficiencia de aplicación de método  $M$ :  $\eta_M$

Pérdidas por riego para especie  $e$ , cultivada según método  $M$ , en el mes  $m$ :

$[P_e^M]^m = (1 - \eta_M) \cdot [\Omega_e^M / \Omega_e] \cdot QR_e^m$

Recarga potencial especie  $e$ :  $RP_e = \sum^M (1 - \eta_M) \cdot [\Omega_e^M / \Omega_e] \cdot QR_e^m$

Recarga potencial total sector analizado:  $RP = \sum^e RP_e$

## VII.2.3 Caudales en cauces naturales

Se cuenta con caudales promedios mensuales medidos y rellenados en las estaciones río Estero Los Puercos en Puente Los Puercos, para un período 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 (ver punto VII.2.1). Por lo tanto, si discretiza el área a nivel de subcuencas, asociadas a cabeceras o tramos de esteros, es posible distribuir los caudales promedios mensuales históricos medidos y rellenados de las estaciones mencionadas, según aportes parciales, asociados a las subcuencas o áreas ubicadas aguas arriba del puente Los Puercos, en función de las áreas y las precipitaciones calculadas con el modelo de distribución espacial de precipitaciones.

Según el esquema planteado, es posible calcular una estadística de 53 años a nivel mensual, en cualquier punto del área de estudio, ubicado aguas arriba de la estación fluviométrica indicada.

Las estadísticas de caudales, correspondientes a cada subcuenca o zona considerada relevante, se usarán 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.

<sup>8</sup> Fuente: Censo agropecuario de 2007.

<sup>9</sup> Se midió trazando polígonos con Google Earth.

A continuación se ejemplifica el cálculo de los caudales promedios mensuales en una subcuenca cualquiera ubicada aguas arriba de la estación fluviométrica Estero Los Puercos en puente Los Puercos.

Para un mes  $t$  dado (se ha omitido el índice temporal  $t$  en las siguientes ecuaciones):

$$Q_{\text{Estero Los Puercos en puente Los Puercos}} = \sum_{k=1}^{k=m} Q_k$$

$$Q_j = \frac{P_j \cdot \Omega_j}{\sum_{k=1}^{k=m} P_k \cdot \Omega_k} \cdot Q_{\text{Estero Los Puercos en puente Los Puercos}}$$

Con:

$Q_{\text{Estero los Puercos en puente Los Puercos}}$  = Caudal medido y rellenado en estación estero Los Puercos en puente los Puercos.

$Q_j$  = Caudal en subcuenca  $j$

$P_j$  = Precipitación en subcuenca  $j$ . Se calcula con modelo de distribución espacial de precipitaciones

$\Omega_j$  = Superficie subcuenca  $j$

$m$  = Número de subcuencas consideradas agua arriba del puente Los Puercos

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.

Los flujos en los canales dependen de la disponibilidad hidrológica y de la distribución de acciones del sistema Pencahue (ver Figura VII-7). 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 representarán 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. Durante la próxima semana (fines de septiembre de 2013), en una sección previa a la primera entrega, se realizarán aforos. El objetivo es comparar esos caudales con los captados en bocatoma y así cuantificar las pérdidas en el tramo descrito.

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

Figura VII-7. Diagrama general de repartición de acciones en el sistema de canales Pencahue

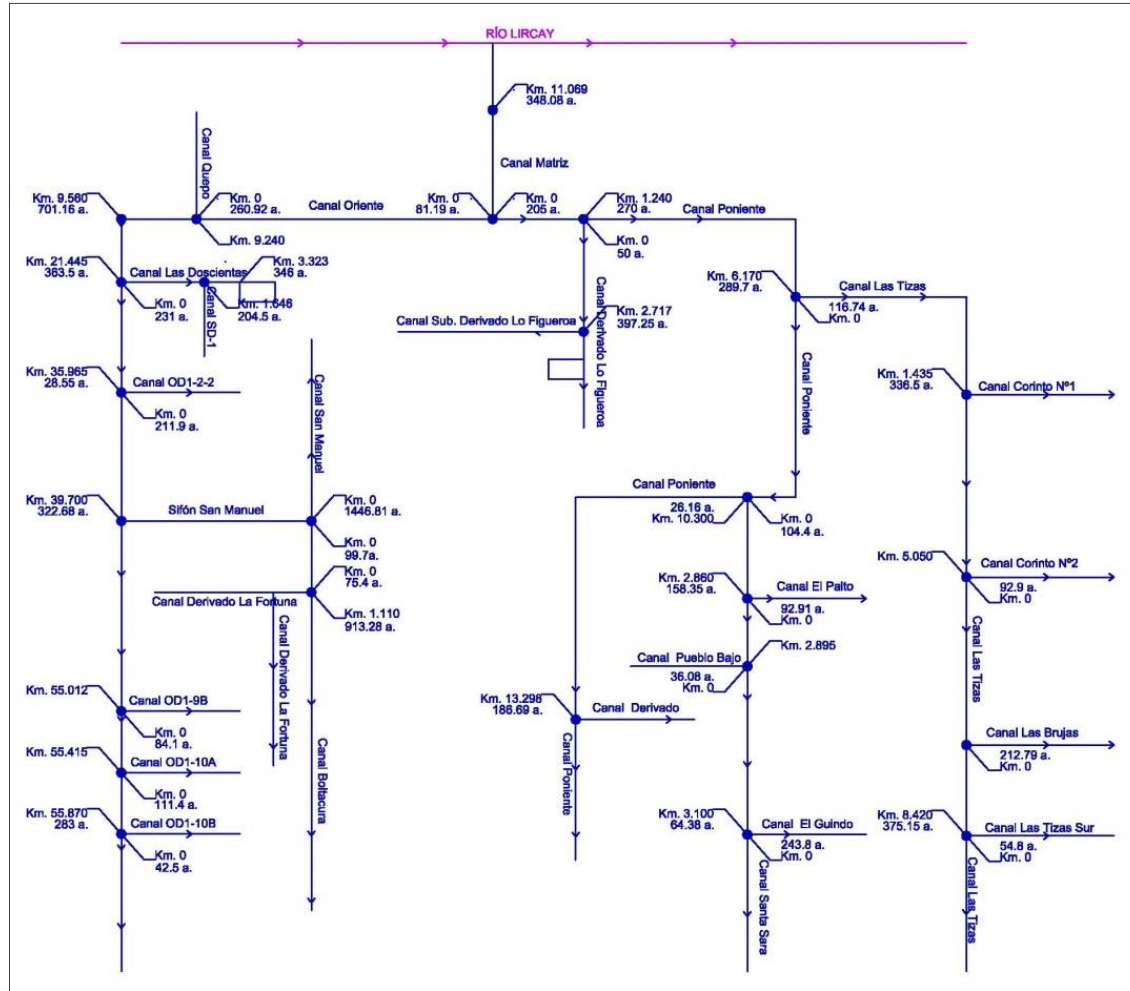
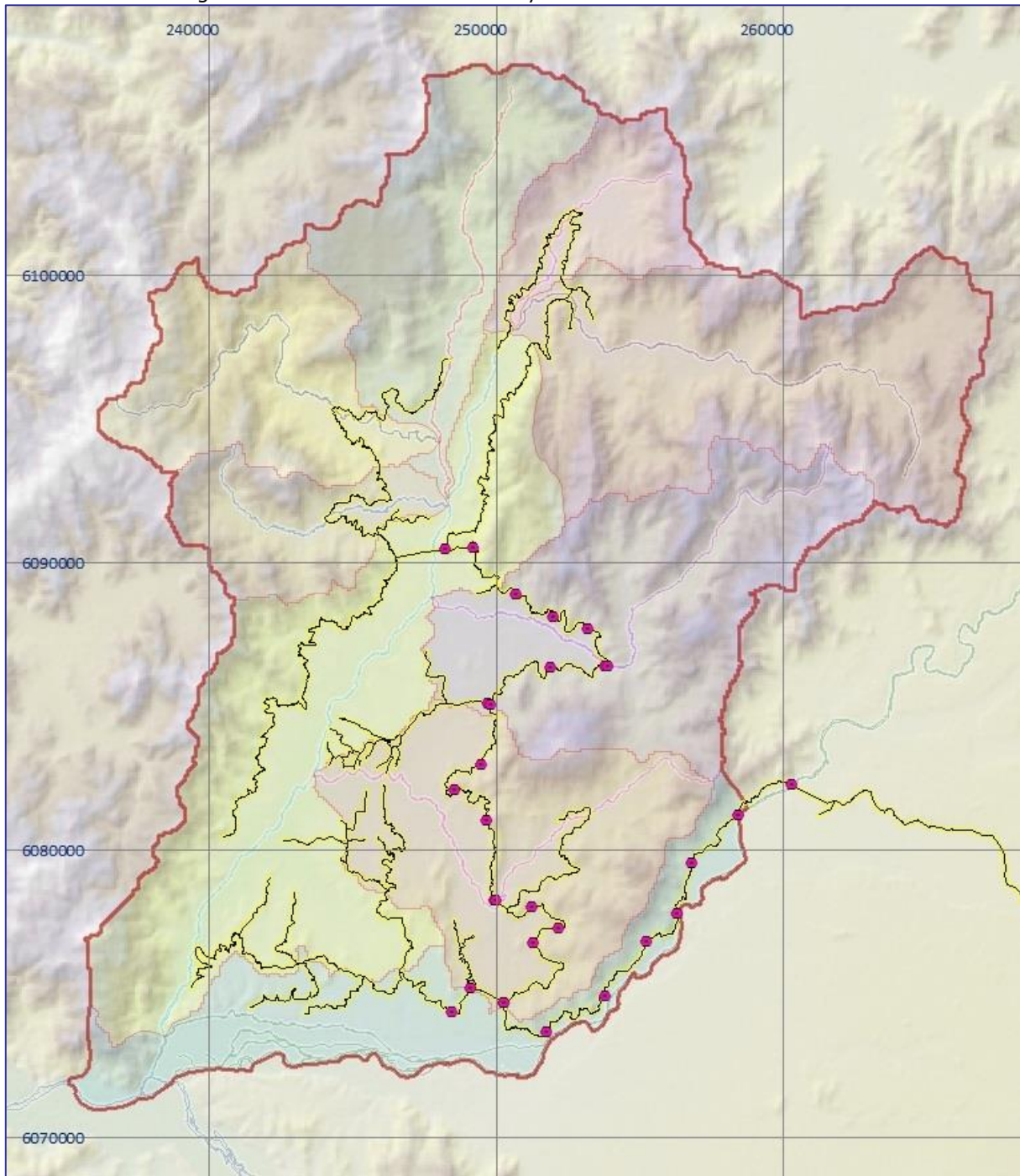


Figura VII-8. Red canal Pencahue y secciones medidas en terreno



Coordenadas UTM según datum WGS84 y huso 19S

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

Como el desarrollo del estudio requirió de la elaboración de distintos modelos (precipitaciones, recarga, flujo subterráneo, etc.), en adelante, se hará referencia al modelo de flujo subterráneo, como el *MFS*<sup>10</sup>.

#### VII.3.1 Dominio

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-9 se puede apreciar el dominio *MFS* señalado.

El dominio tiene una dimensión oeste-este de 34 km y una longitud sur-norte de 38 km.

#### VII.3.2 Malla

La malla de diferencias finitas usada para representar el medio subterráneo con el programa *Visual Modflow*, tiene celdas de 100·100 m. Lo que equivale a 340 columnas y 380 filas. Se usó un estrato único de permeabilidad equivalente. En la Figura VII-10 se muestra la malla definida.

Tabla VII-1. Dimensiones malla *MFS*

Coordenada x inicial [m]	Coordenada x final [m]	Distancia x [m]	Dimensión celda x [m]	Nº de columnas
234000	268000	34000	100	340
Coordenada y inicial [m]	Coordenada y final [m]	Distancia y [m]	Dimensión celda y [m]	Nº de filas
6070000	6108000	38000	100	380

#### VII.3.3 Zonas activas e inactivas

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). En la Figura VII-11 se muestran las celdas de cada tipo.

---

<sup>10</sup>El *MFS* es un modelo de flujo subterráneo, materializado con una malla de diferencias finitas, y desarrollado con el programa *Visual Modflow*.

Figura VII-9. Dominio MFS

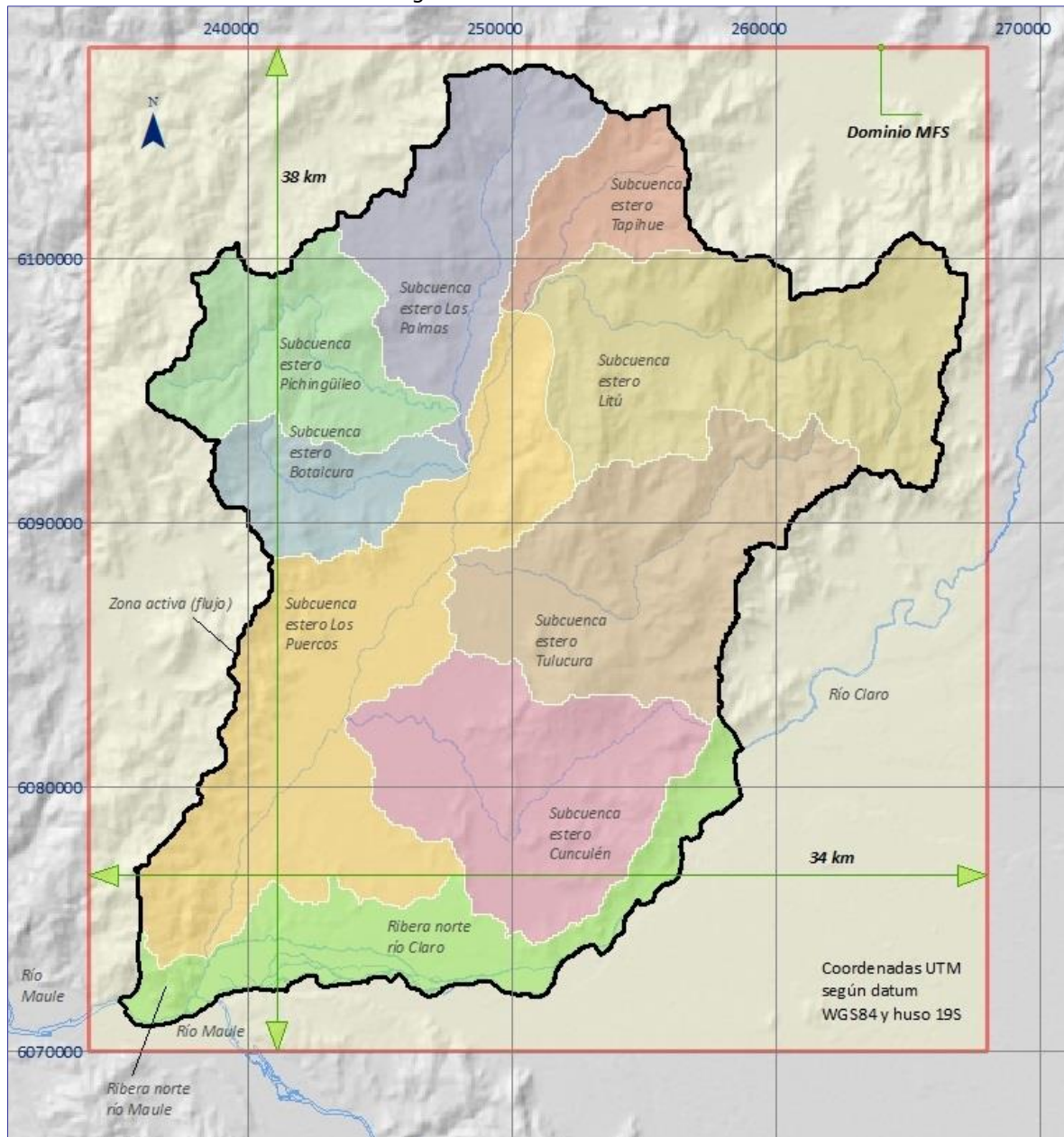
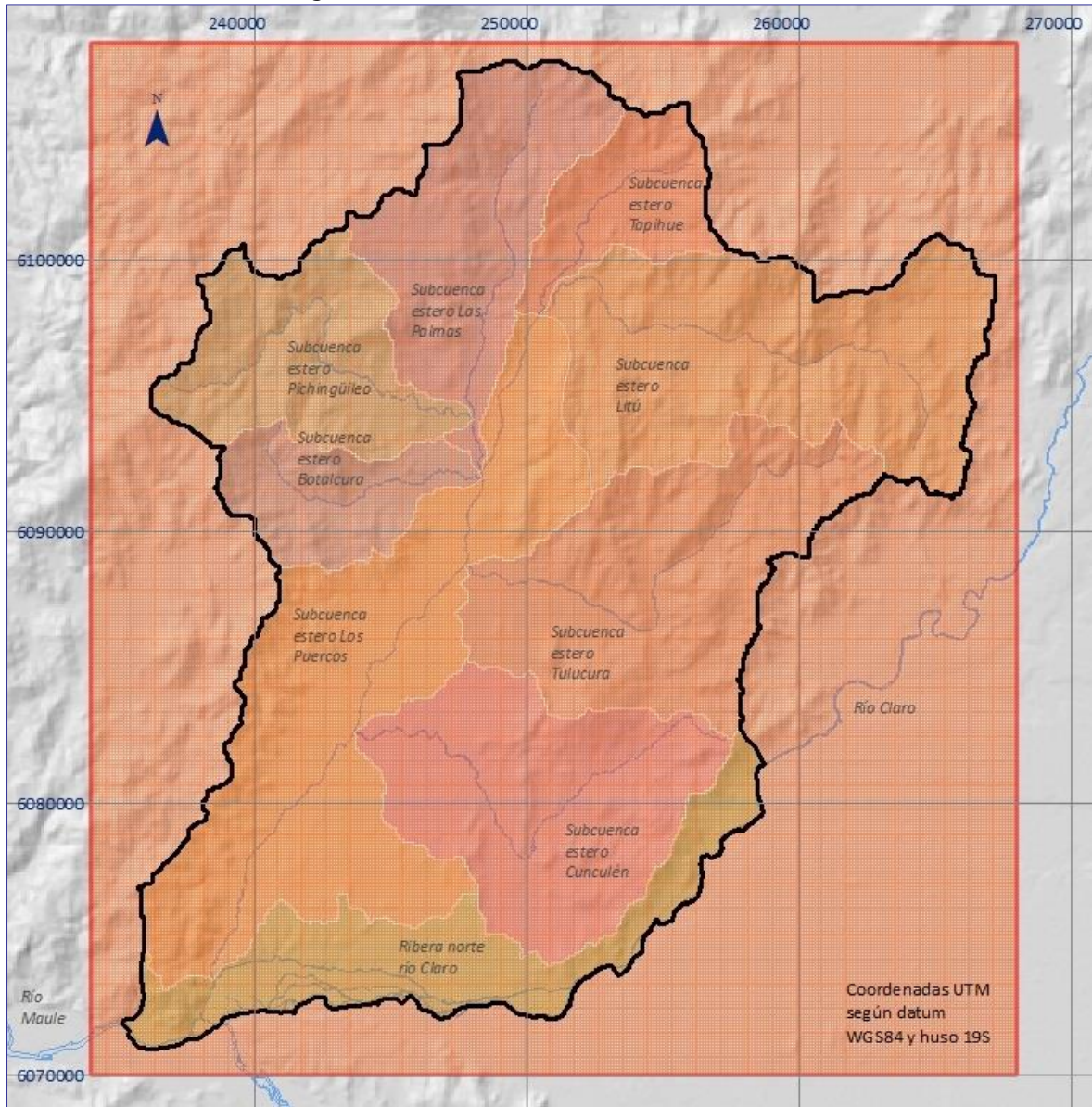
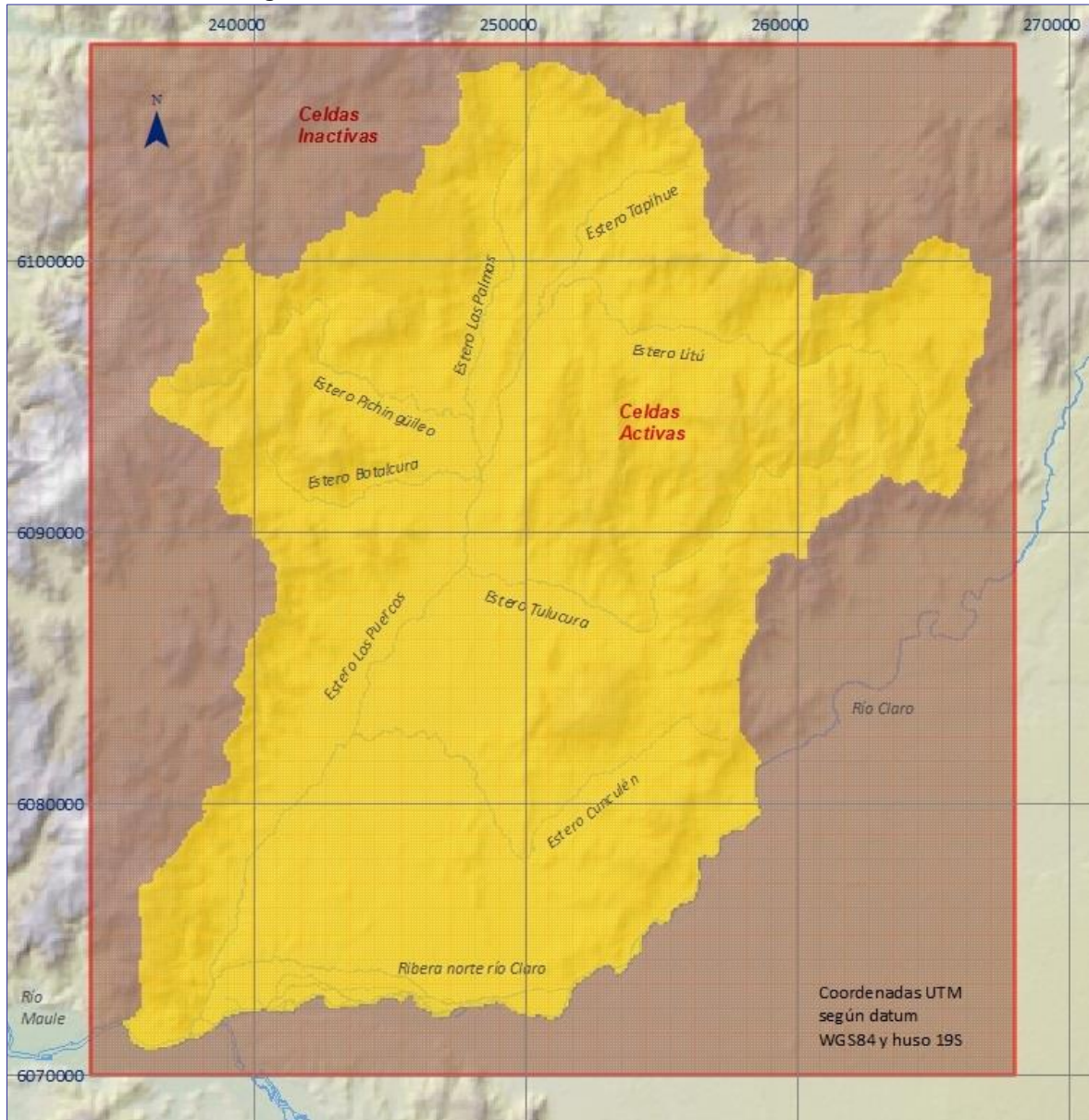


Figura VII-10. Malla de diferencias finitas MFS



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

Figura VII-11. Celdas activas e inactivas en malla MFS



#### **VII.3.4 Dimensión vertical**

Como se indicó previamente, el MFS tiene una capa (layer) única, de permeabilidad equivalente. La dimensión vertical de esa capa depende del espesor del medio saturado representado y de si éste corresponde a roca o relleno.

Para la zona de relleno, se generó una superficie, que describe la delimitación del fondo de los depósitos. Equivalentemente, esa superficie coincide con el límite superior del basamento rocoso. Los datos usados se obtuvieron de la exploración geofísica realizada para este estudio<sup>11</sup> (ver Figura VII-12).

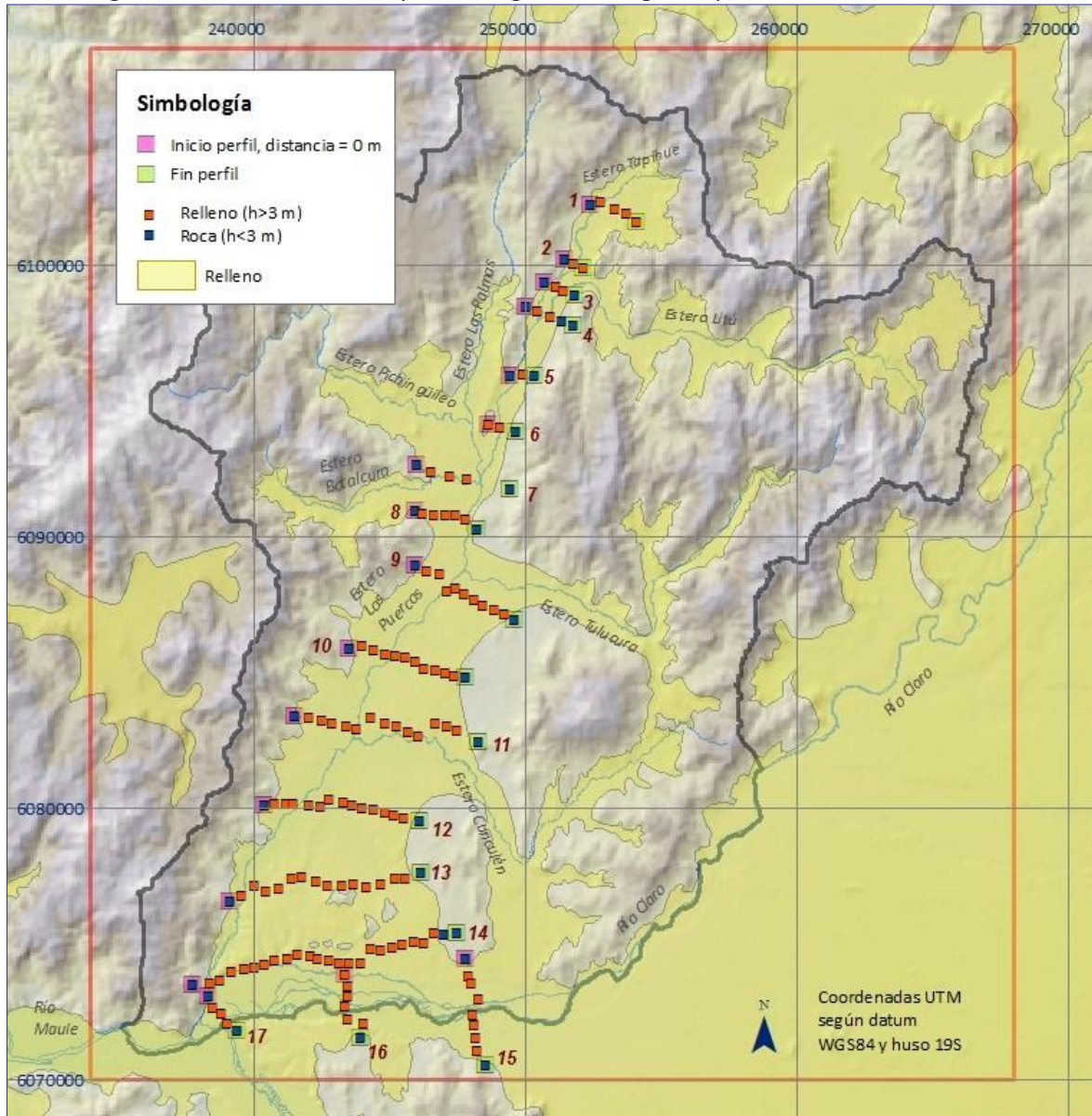
Se adoptó como criterio de existencia de relleno en un punto dado, la medición de un espesor superior a 3 m. En los puntos en que se midió menos de 3 m, se consideró como zona con roca aflorando superficialmente. En la Figura VII-12 se muestra la categorización según ese criterio. Como se puede apreciar en la figura, la delimitación del contacto roca-relleno, fue compatibilizada con lo indicado.

---

<sup>11</sup>Geodatos, julio de 2013.



Figura VII-12. Puntos de exploración geofísica según espesor de relleno detectado



### VII.3.5 Permeabilidad equivalente

El medio permeable real incluye el relleno sedimentario y el medio rocoso. Las zonas de roca que han sido excavadas para la construcción de norias de uso doméstico, permiten extraer caudales, cuya magnitud depende del nivel de alteración de la roca. Generalmente las norias en roca no exceden los 10 m de profundidad, por ello, se adoptó como profundidad útil en los cerros, los primeros 30 m.

Para mejorar la convergencia del modelo elaborado con diferencias finitas, se debe evitar el simular estratos delgados con pendientes elevadas. Por ello, se usó una representación basada en las permeabilidades equivalentes. Si se obtiene una distribución real de permeabilidades  $k$ , el modelo con espesores modificados, usará una permeabilidad  $k'$ , igualando las capacidades conductivas.

La capa modificada equivalente considera los espesores de relleno reales (y las permeabilidades sin corregir), cuando estos exceden los 80 m. Si la potencia del relleno, es menor que 80 m, ésta se incrementa a 80 m y se calcula una permeabilidad equivalente según el esquema de la Figura VII-14. Las expresiones para las permeabilidades equivalentes se presentan bajo la figura mencionada.

Figura VII-13. Curvas de isoprofundidad del basamento rocoso

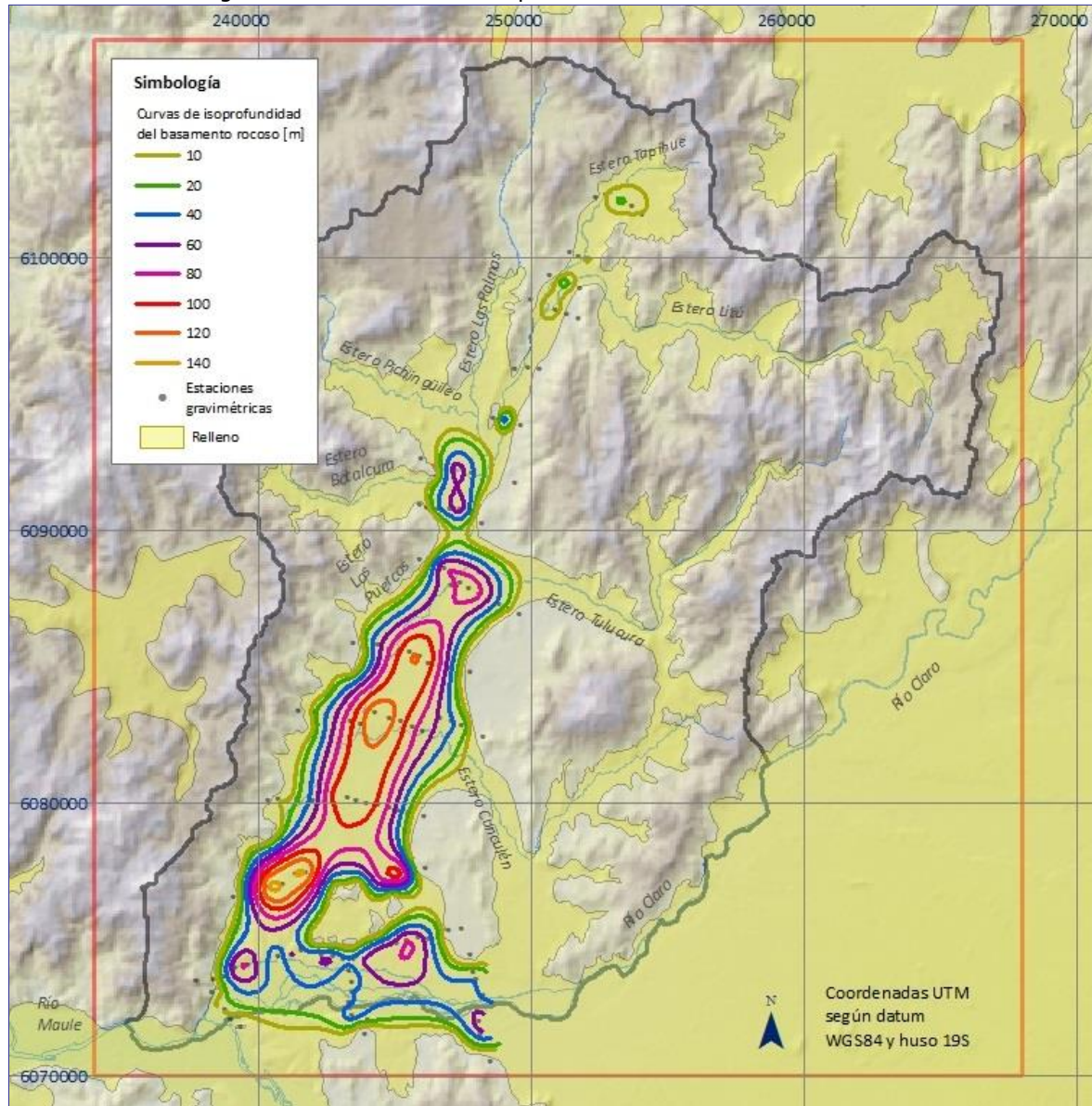
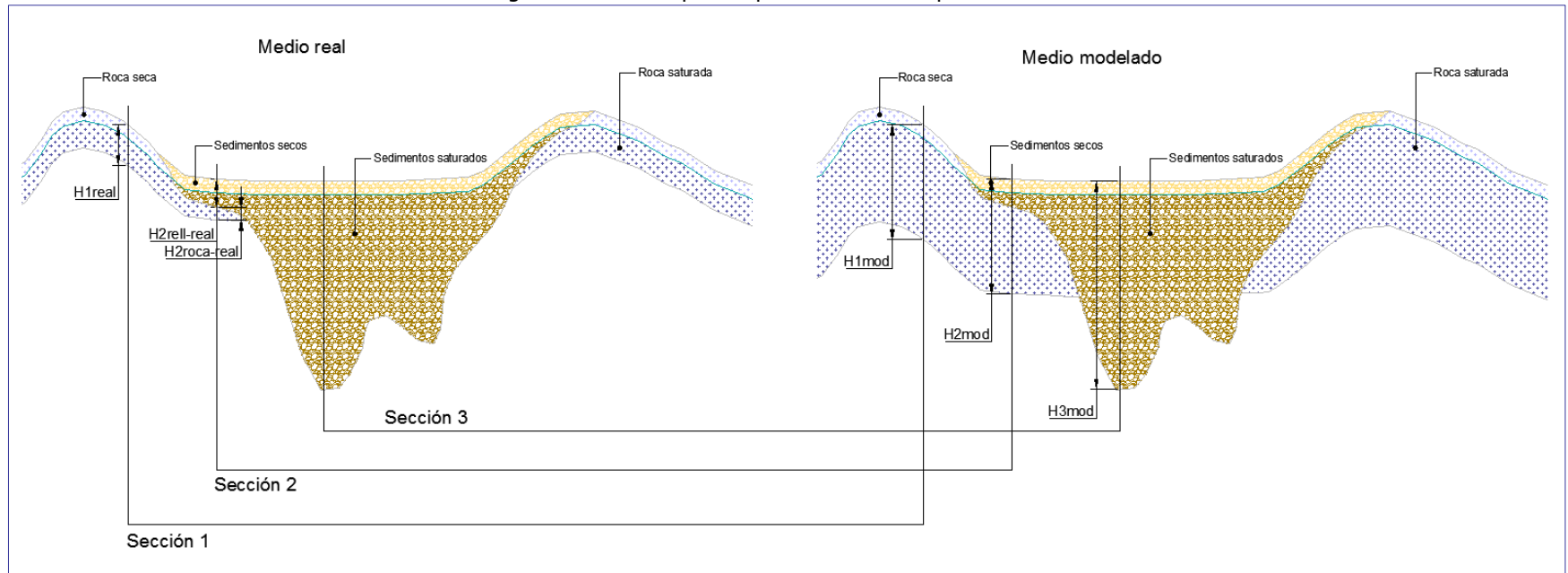


Figura VII-14. Esquema permeabilidad equivalente



Sección 1:

$$k_1 \cdot H_1^{\text{real}} = k_1' \cdot H_1^{\text{mod}} \rightarrow k_1' = k_1 \cdot H_1^{\text{real}} / H_1^{\text{mod}}$$

Sección 2:

$$k_2^{\text{relleno}} \cdot H_2^{\text{relleno-real}} + k_2^{\text{roca}} \cdot H_2^{\text{roca-real}} = k_2' \cdot H_2^{\text{mod}}$$

$$\rightarrow k_2' = (k_2^{\text{rell}} \cdot H_2^{\text{rell-real}} + k_2^{\text{roca}} \cdot H_2^{\text{roca-real}}) / H_2^{\text{mod}}$$

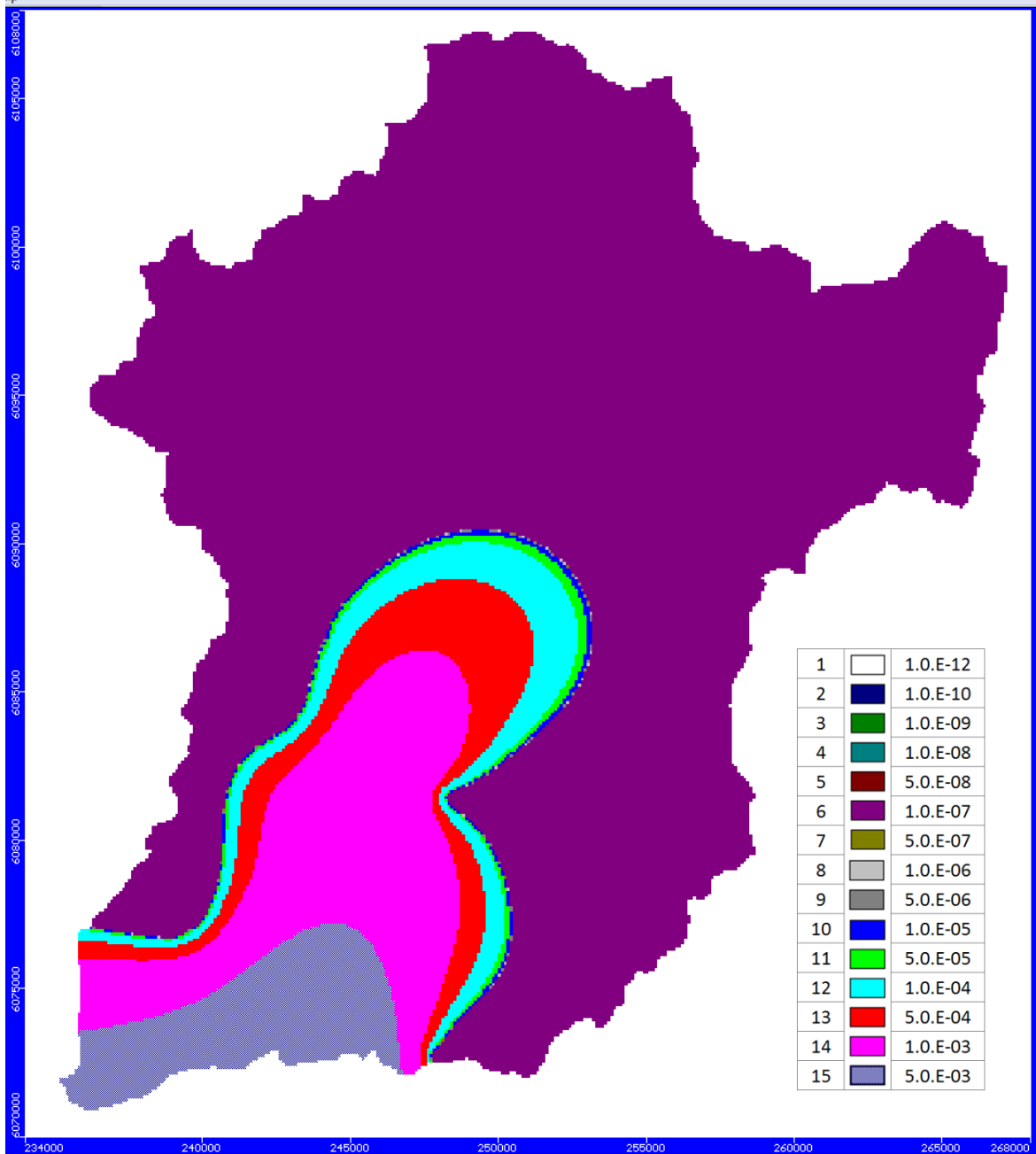
Sección 3:

$$k_3 = k_3'$$

En la Figura VII-15 se presentan las permeabilidades reales y en la Figura VII-16, la distribución de permeabilidades equivalentes.

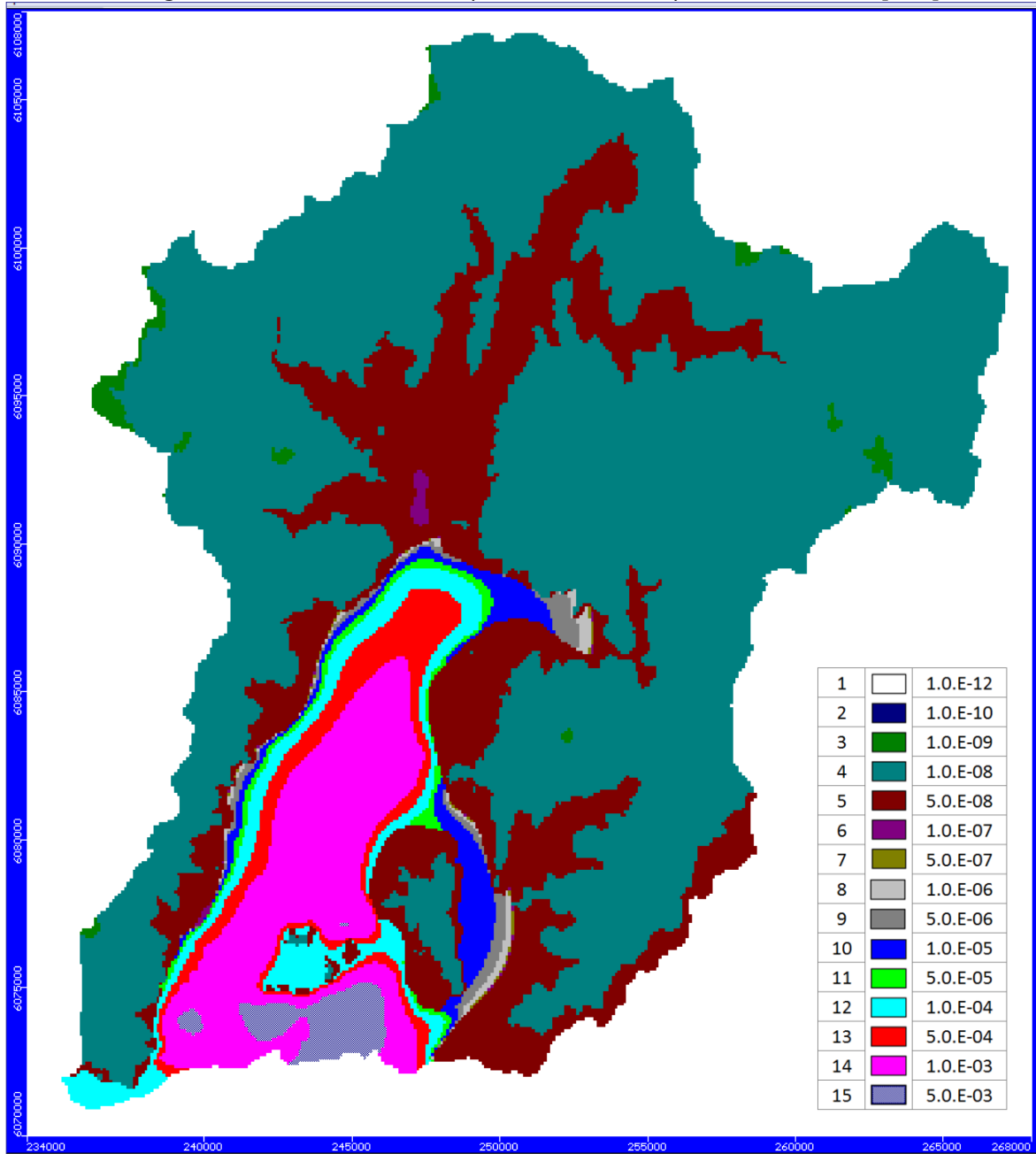
Tras la calibración del modelo, se realizó el proceso inverso, para obtener la distribución real de permeabilidades, es decir, la correspondiente a los espesores de relleno reales.

Figura VII-15. Distribución de permeabilidades reales<sup>12</sup> en MFS [m/s]



<sup>12</sup> "Reales", se refiere a que la distribución fue generada con las permeabilidades puntuales calculadas con los datos de pruebas de bombeo.

Figura VII-16. Distribución de permeabilidades equivalentes en MFS [m/s]



### **VII.3.6 Discretización temporal**

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

El intervalo de modelación base (*Stress Period*), fue fijado en 6 meses. De esa forma, el período histórico quedó dividido en 105 semestres. Los semestres coinciden con años hidrológicos; para la zona de interés, el año hidrológico comienza en mayo (ver Tabla VII-2).

### **VII.3.7 Cauces superficiales**

Los cauces superficiales se representaron con celdas de tipo río. La variación temporal (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. En la Figura VII-17 se muestran las celdas tipo río usadas en el MFS.

### **VII.3.8 Afloramientos**

En zonas con reducida capacidad de conducción, los medios se saturan completamente y se producen surgencias de agua; es decir, el nivel freático tiende a superar el nivel de terreno, generando un afloramiento. Frecuentemente, dichas surgencias ocurren en áreas bajas y originan recuperaciones en cauces menores y zonas de vegas.

Una forma de representar los afloramientos es a través de celdas de tipo río, pero el incorporar estos elementos en todos los cauces del área modelada podría sobredimensionar la disponibilidad hídrica, puesto que este tipo de celdas, además de captar afloramientos, inducen aportes al acuífero (flujo río-napa).

Por esa razón, los afloramientos se simulaban usando celdas de tipo dren en todas las celdas a las que no se les asoció el tipo río; éstas permiten la salida de los excesos de agua y así es posible representar afloramientos, recuperaciones y vertientes.

En la Figura VII-18 se pueden observar las celdas de tipo dren utilizadas en el modelo. Se debe tener en cuenta que no necesariamente todas las celdas dren extraen agua; sólo algunas evacúan los excesos de agua subterránea, aquellas en las cuales el nivel piezométrico modelado supera el nivel de terreno.

Tabla VII-2. Discretización temporal MFS

Stress Period	Inicio	Fin	Número de días	Stress Period	Inicio	Fin	Número de días
1	01 may 1960 00:00	01 nov 1960 00:00	184	54	01 nov 1986 00:00	01 may 1987 00:00	181
2	01 nov 1960 00:00	01 may 1961 00:00	181	55	01 may 1987 00:00	01 nov 1987 00:00	184
3	01 may 1961 00:00	01 nov 1961 00:00	184	56	01 nov 1987 00:00	01 may 1988 00:00	182
4	01 nov 1961 00:00	01 may 1962 00:00	181	57	01 may 1988 00:00	01 nov 1988 00:00	184
5	01 may 1962 00:00	01 nov 1962 00:00	184	58	01 nov 1988 00:00	01 may 1989 00:00	181
6	01 nov 1962 00:00	01 may 1963 00:00	181	59	01 may 1989 00:00	01 nov 1989 00:00	184
7	01 may 1963 00:00	01 nov 1963 00:00	184	60	01 nov 1989 00:00	01 may 1990 00:00	181
8	01 nov 1963 00:00	01 may 1964 00:00	182	61	01 may 1990 00:00	01 nov 1990 00:00	184
9	01 may 1964 00:00	01 nov 1964 00:00	184	62	01 nov 1990 00:00	01 may 1991 00:00	181
10	01 nov 1964 00:00	01 may 1965 00:00	181	63	01 may 1991 00:00	01 nov 1991 00:00	184
11	01 may 1965 00:00	01 nov 1965 00:00	184	64	01 nov 1991 00:00	01 may 1992 00:00	182
12	01 nov 1965 00:00	01 may 1966 00:00	181	65	01 may 1992 00:00	01 nov 1992 00:00	184
13	01 may 1966 00:00	01 nov 1966 00:00	184	66	01 nov 1992 00:00	01 may 1993 00:00	181
14	01 nov 1966 00:00	01 may 1967 00:00	181	67	01 may 1993 00:00	01 nov 1993 00:00	184
15	01 may 1967 00:00	01 nov 1967 00:00	184	68	01 nov 1993 00:00	01 may 1994 00:00	181
16	01 nov 1967 00:00	01 may 1968 00:00	182	69	01 may 1994 00:00	01 nov 1994 00:00	184
17	01 may 1968 00:00	01 nov 1968 00:00	184	70	01 nov 1994 00:00	01 may 1995 00:00	181
18	01 nov 1968 00:00	01 may 1969 00:00	181	71	01 may 1995 00:00	01 nov 1995 00:00	184
19	01 may 1969 00:00	01 nov 1969 00:00	184	72	01 nov 1995 00:00	01 may 1996 00:00	182
20	01 nov 1969 00:00	01 may 1970 00:00	181	73	01 may 1996 00:00	01 nov 1996 00:00	184
21	01 may 1970 00:00	01 nov 1970 00:00	184	74	01 nov 1996 00:00	01 may 1997 00:00	181
22	01 nov 1970 00:00	01 may 1971 00:00	181	75	01 may 1997 00:00	01 nov 1997 00:00	184
23	01 may 1971 00:00	01 nov 1971 00:00	184	76	01 nov 1997 00:00	01 may 1998 00:00	181
24	01 nov 1971 00:00	01 may 1972 00:00	182	77	01 may 1998 00:00	01 nov 1998 00:00	184
25	01 may 1972 00:00	01 nov 1972 00:00	184	78	01 nov 1998 00:00	01 may 1999 00:00	181
26	01 nov 1972 00:00	01 may 1973 00:00	181	79	01 may 1999 00:00	01 nov 1999 00:00	184
27	01 may 1973 00:00	01 nov 1973 00:00	184	80	01 nov 1999 00:00	01 may 2000 00:00	182
28	01 nov 1973 00:00	01 may 1974 00:00	181	81	01 may 2000 00:00	01 nov 2000 00:00	184
29	01 may 1974 00:00	01 nov 1974 00:00	184	82	01 nov 2000 00:00	01 may 2001 00:00	181
30	01 nov 1974 00:00	01 may 1975 00:00	181	83	01 may 2001 00:00	01 nov 2001 00:00	184
31	01 may 1975 00:00	01 nov 1975 00:00	184	84	01 nov 2001 00:00	01 may 2002 00:00	181
32	01 nov 1975 00:00	01 may 1976 00:00	182	85	01 may 2002 00:00	01 nov 2002 00:00	184
33	01 may 1976 00:00	01 nov 1976 00:00	184	86	01 nov 2002 00:00	01 may 2003 00:00	181
34	01 nov 1976 00:00	01 may 1977 00:00	181	87	01 may 2003 00:00	01 nov 2003 00:00	184
35	01 may 1977 00:00	01 nov 1977 00:00	184	88	01 nov 2003 00:00	01 may 2004 00:00	182
36	01 nov 1977 00:00	01 may 1978 00:00	181	89	01 may 2004 00:00	01 nov 2004 00:00	184
37	01 may 1978 00:00	01 nov 1978 00:00	184	90	01 nov 2004 00:00	01 may 2005 00:00	181
38	01 nov 1978 00:00	01 may 1979 00:00	181	91	01 may 2005 00:00	01 nov 2005 00:00	184
39	01 may 1979 00:00	01 nov 1979 00:00	184	92	01 nov 2005 00:00	01 may 2006 00:00	182
40	01 nov 1979 00:00	01 may 1980 00:00	182	93	01 may 2006 00:00	01 nov 2006 00:00	184
41	01 may 1980 00:00	01 nov 1980 00:00	184	94	01 nov 2006 00:00	01 may 2007 00:00	181
42	01 nov 1980 00:00	01 may 1981 00:00	181	95	01 may 2007 00:00	01 nov 2007 00:00	184
43	01 may 1981 00:00	01 nov 1981 00:00	184	96	01 nov 2007 00:00	01 may 2008 00:00	182
44	01 nov 1981 00:00	01 may 1982 00:00	181	97	01 may 2008 00:00	01 nov 2008 00:00	184
45	01 may 1982 00:00	01 nov 1982 00:00	184	98	01 nov 2008 00:00	01 may 2009 00:00	181
46	01 nov 1982 00:00	01 may 1983 00:00	181	99	01 may 2009 00:00	01 nov 2009 00:00	184
47	01 may 1983 00:00	01 nov 1983 00:00	184	100	01 nov 2009 00:00	01 may 2010 00:00	182
48	01 nov 1983 00:00	01 may 1984 00:00	182	101	01 may 2010 00:00	01 nov 2010 00:00	184
49	01 may 1984 00:00	01 nov 1984 00:00	184	102	01 nov 2010 00:00	01 may 2011 00:00	181
50	01 nov 1984 00:00	01 may 1985 00:00	181	103	01 may 2011 00:00	01 nov 2011 00:00	184
51	01 may 1985 00:00	01 nov 1985 00:00	184	104	01 nov 2011 00:00	01 may 2012 00:00	182
52	01 nov 1985 00:00	01 may 1986 00:00	181	105	01 may 2012 00:00	01 nov 2012 00:00	184
53	01 may 1986 00:00	01 nov 1986 00:00	184				

Figura VII-17. Celdas tipo río en MFS

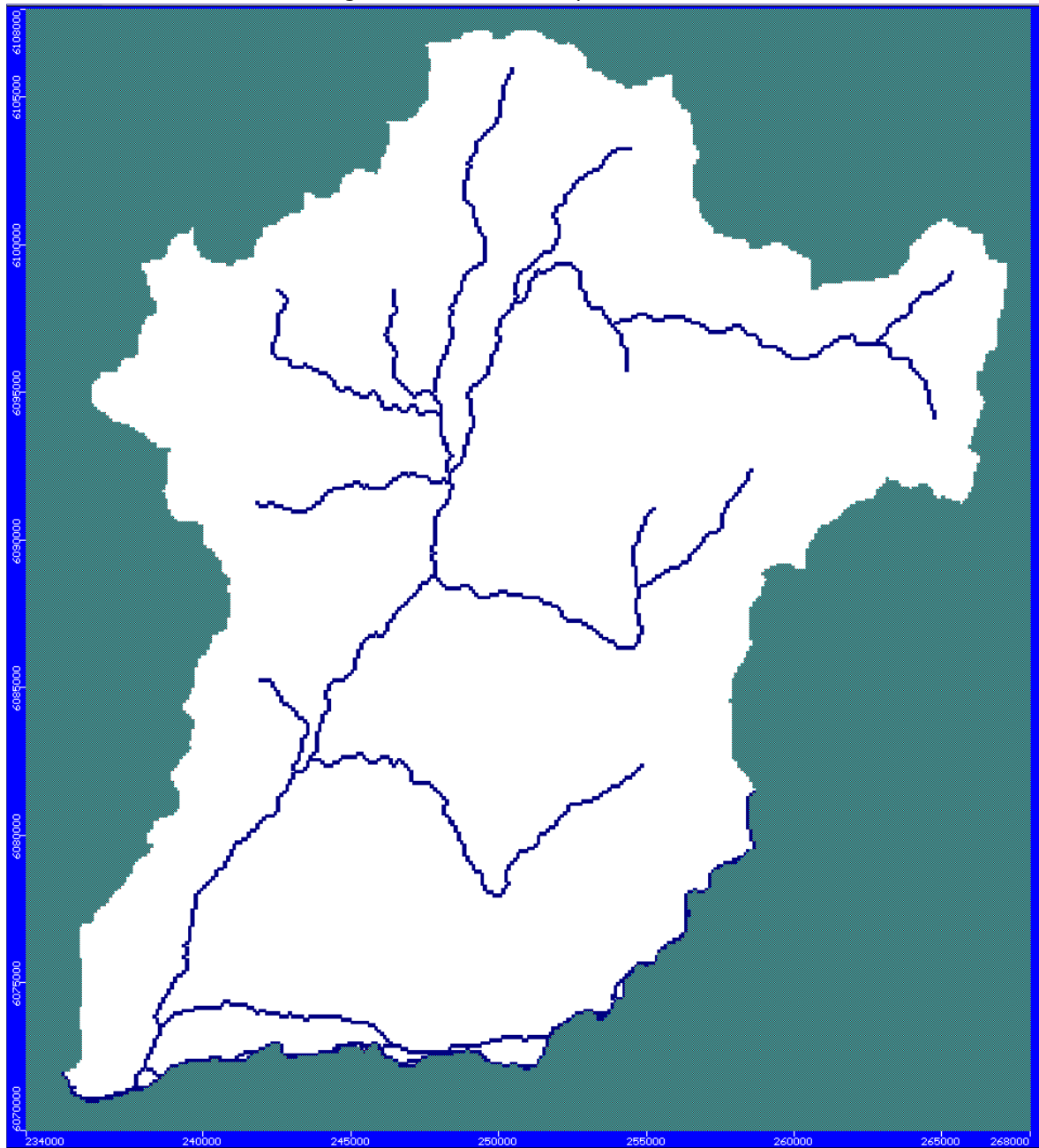
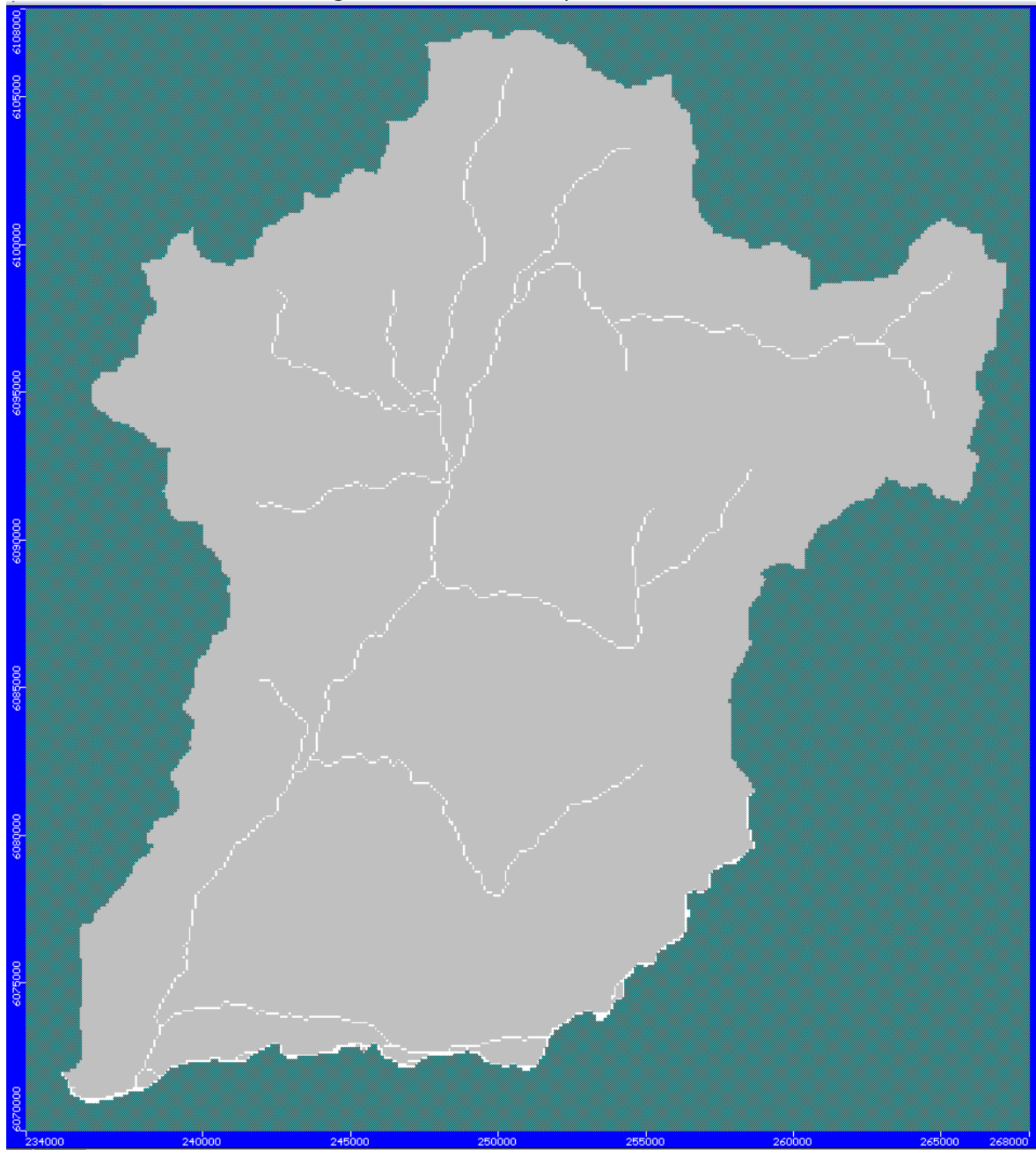




Figura VII-18. Celdas tipo dren en MFS



### **VII.3.9 Recarga superficial**

La recarga superficial proviene de la infiltración de precipitaciones y sobrantes de agua usada en riego.

#### **VII.3.9.a 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.

La recarga que se concentra en los lechos de los cauces fue considerada en la componente del flujo río-napa, descrita en el punto VII.3.7. La recarga distribuida fuera de los cauces principales, depende, entre otros, del agua de lluvia disponible para infiltrar y de la capacidad de conducción vertical de los medios permeables.

La recarga por precipitaciones fue estimada como una fracción de las precipitaciones distribuidas espacialmente y calculadas según la metodología explicada en el punto VII.2.1. La proporción de las precipitaciones que infiltra, se determinó iterativamente, operando el modelo.

#### **VII.3.9.b Riego**

Las recargas provenientes del riego se calcularon en como una fracción los sobrantes que se obtienen por ineficiencias en la aplicación del agua de riego. Ese volumen<sup>13</sup> sobrante se evapora, se incorpora a los cauces superficiales o infiltra. La porción que infiltra corresponde a la recarga superficial por riego; ésta se determinó iterativamente, operando el modelo, de forma semejante al caso de la recarga por precipitación. Los caudales de riego fueron cuantificados en el subcapítuloVI.1. En el mismo subcapítulo se delimitaron en planta las zonas de riego.

#### **VII.3.9.c Zonas de recarga en MFS**

Se intersectaron las áreas riego con las subcuencas (ver Figura VII-1) y con la distribución de permeabilidades. De dicho proceso surgieron 96 zonas; cada una de ellas tiene distintas características de permeabilidad, tipo de recarga (precipitación o precipitación + riego) y subcuenca.

En la Figura VII-19 se muestra la intersección de áreas de riego, permeabilidades y sectores. En la Figura VII-20 se presentan las 96 zonas de recarga resultantes.

---

<sup>13</sup> El volumen que se obtiene por ineficiencias de aplicación es  $(1-\eta) \cdot V_R$ , con  $\eta$ =eficiencia de aplicación del método de riego y  $V_R$  = volumen de agua para riego. Una fracción  $\delta \cdot (1-\eta) \cdot V_R$  logra infiltrar, el resto  $((1-\delta) \cdot (1-\eta) \cdot V_R)$ , se evapora o retorna a la escorrentía superficial.

Figura VII-19. Zonas regadas, permeabilidades equivalentes y sectorización según niveles estáticos

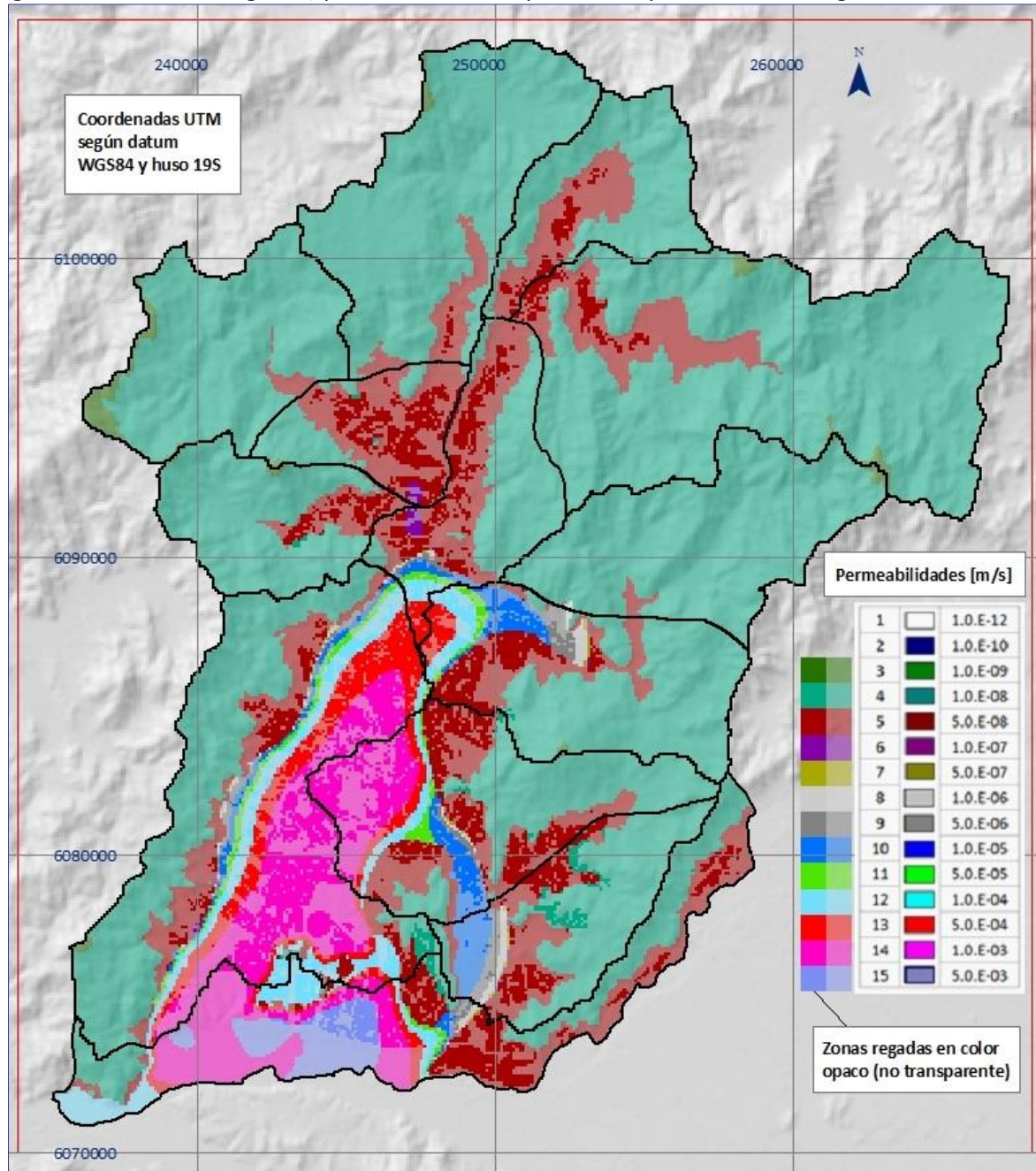
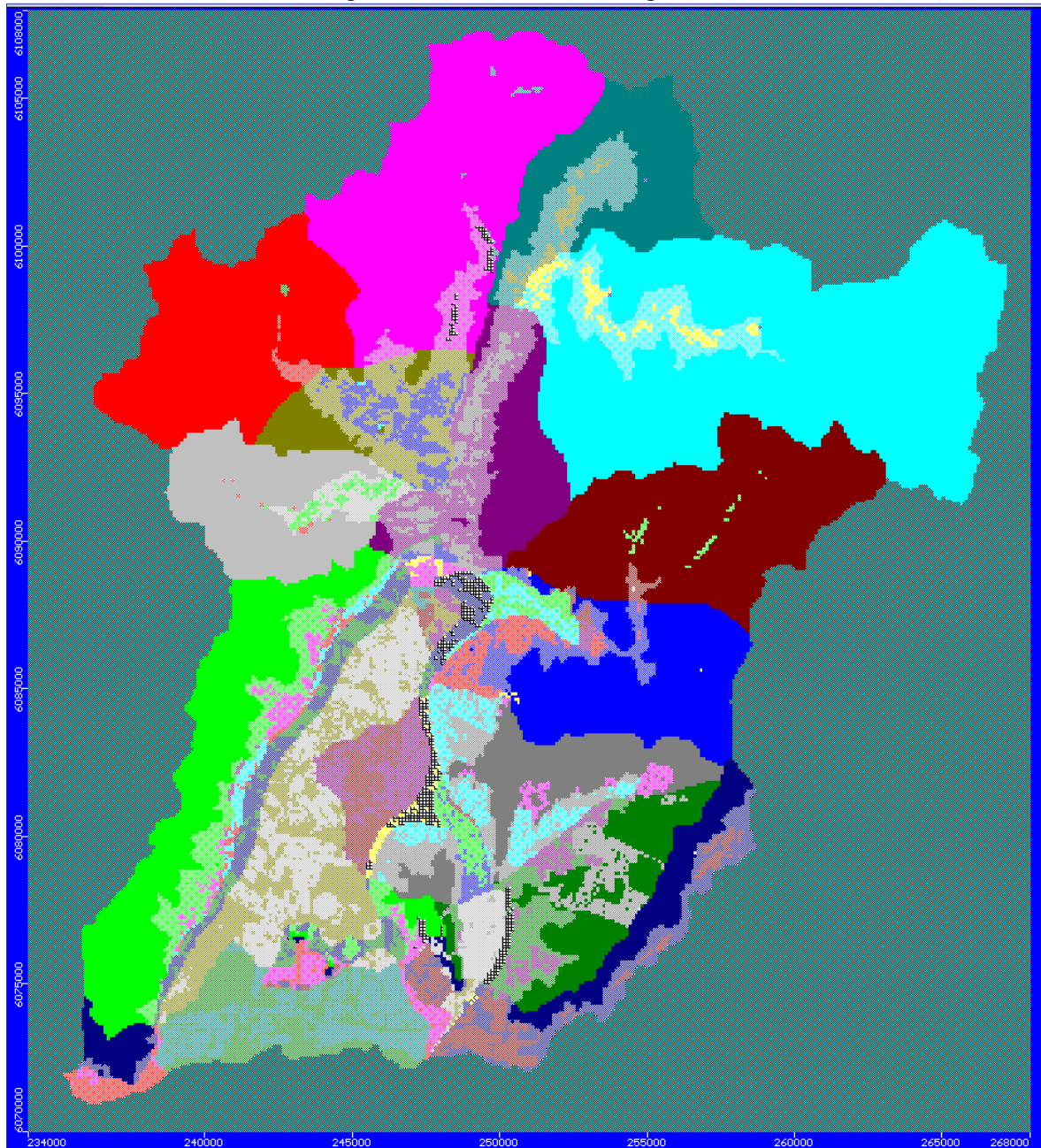


Figura VII-20. Zonas de recarga MFS



### **VII.3.10 Calibración en régimen permanente**

Se generó malla de régimen permanente, con recargas promedio de precipitaciones y cauces con conductancias variables espacialmente.

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. Dado que los niveles de 2013, no representan la condición promedio, previa a las extracciones y al riego del valle, que describe la malla de régimen permanente, se buscó un ajuste aproximado.

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 (ver Figura VII-22).

Como se puede observar en la Figura VII-21, el error RMS se redujo de 11.5 m a 5.5 m. Se usaron 89 puntos de control (ver Figura VII-21). Los pozos cuya ubicación coincide con una misma celda, fueron unificados, usando el nivel promedio entre ambos.

### **VII.3.11 Calibración en régimen impermanente**

Se construyó una malla para el régimen impermanente. Como se detalla en el punto VII.3.6, ésta incluye 105 intervalos semestrales (stress periods), que cubren el período histórico 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. En la Figura VII-23. Calibración en régimen impermanente

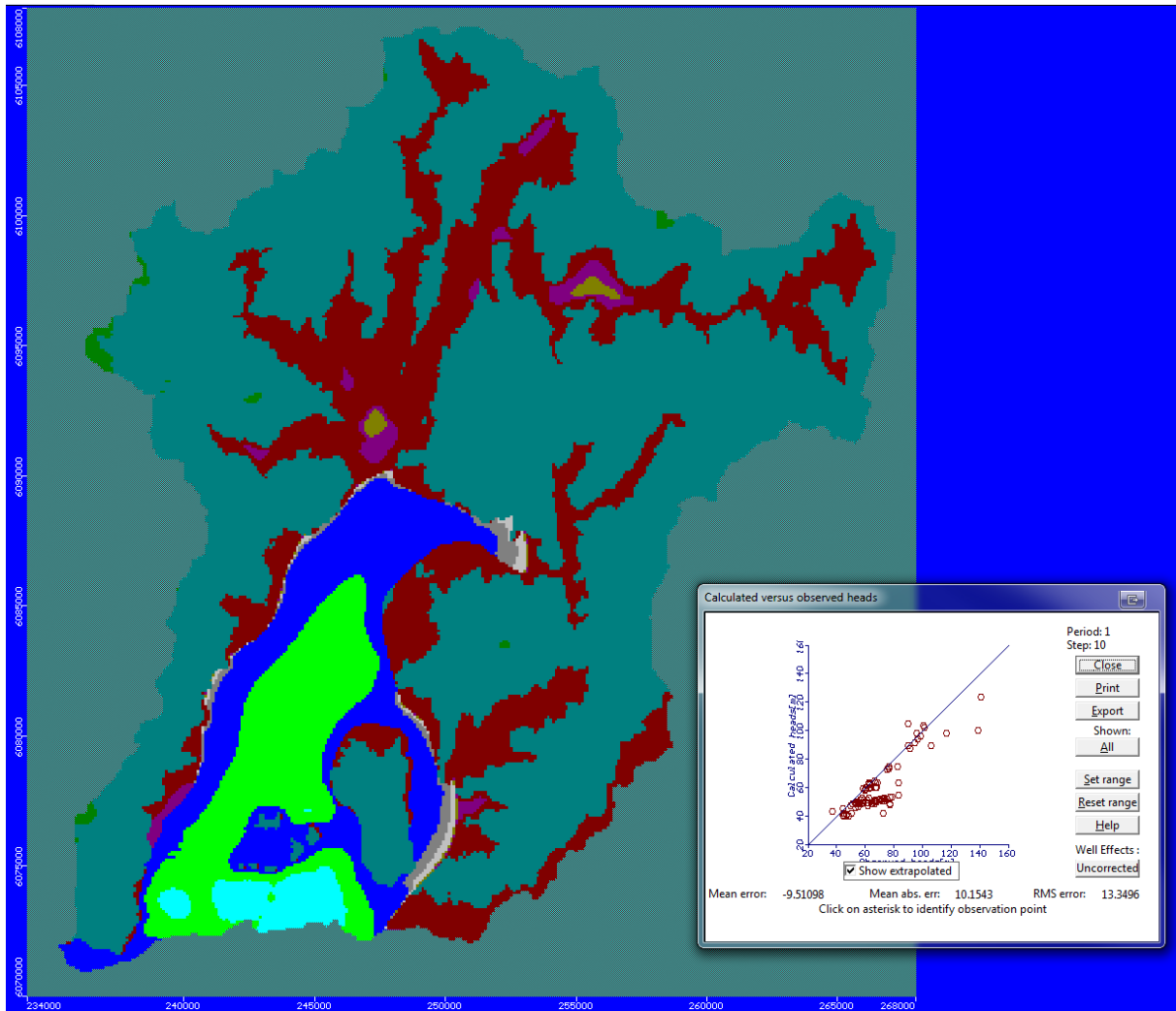














Tabla VII-3. Coeficientes de almacenamiento(S), MFS (régimen impermanente)

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 muestran las captaciones incorporadas al MFS.

Los coeficientes de almacenamiento se asignaron según la distribución de permeabilidad, de acuerdo a los valores de la Tabla VII-3.

Se modificó la distribución en algunos sectores donde los descensos resultaron excesivos, debido al bombeo histórico impuesto (comparar Figura VII-22 con Figura VII-23).

En la Figura VII-23. Calibración en régimen impermanente

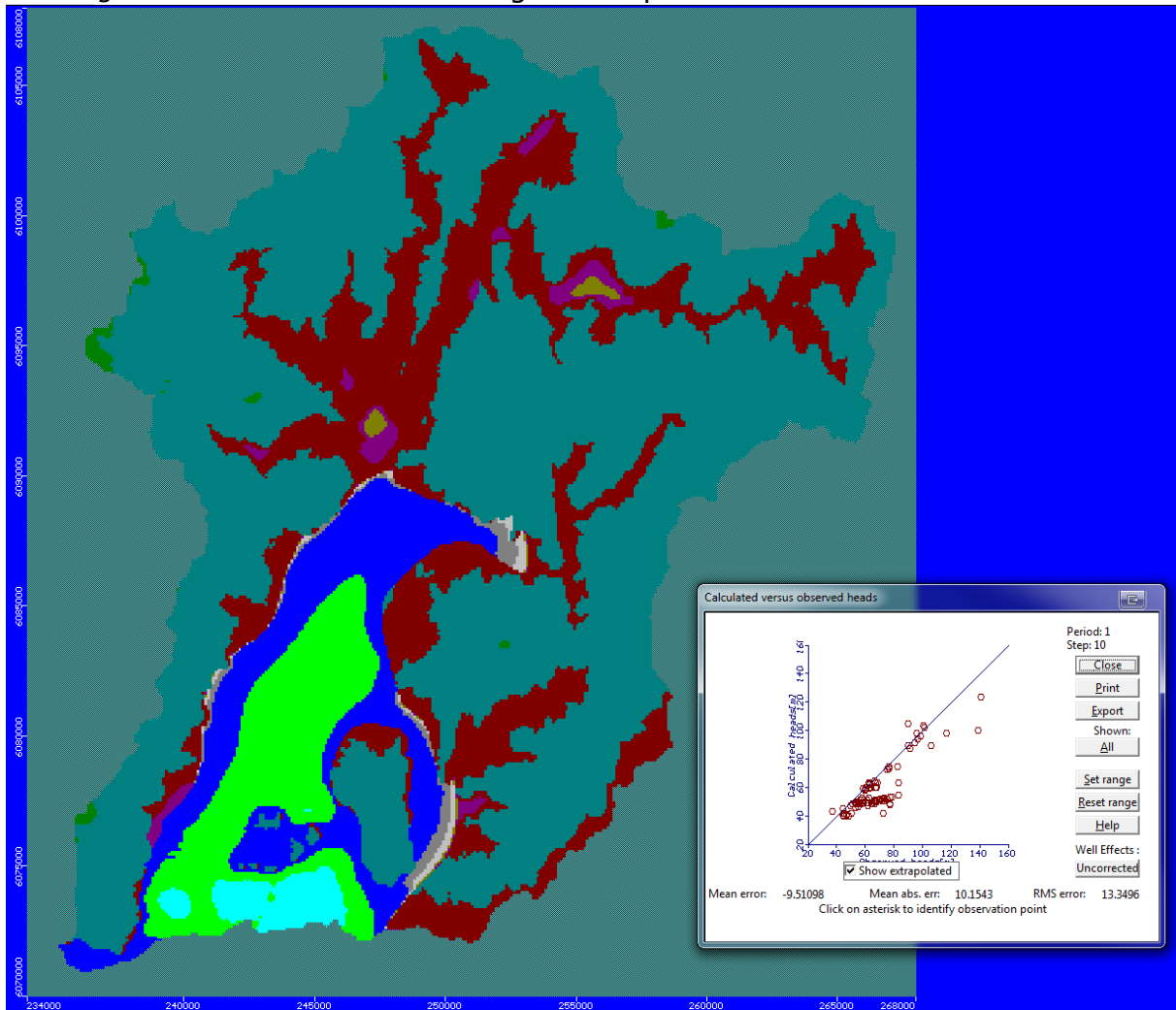














Tabla VII-3. Coeficientes de almacenamiento(S), MFS (régimen impermanente)

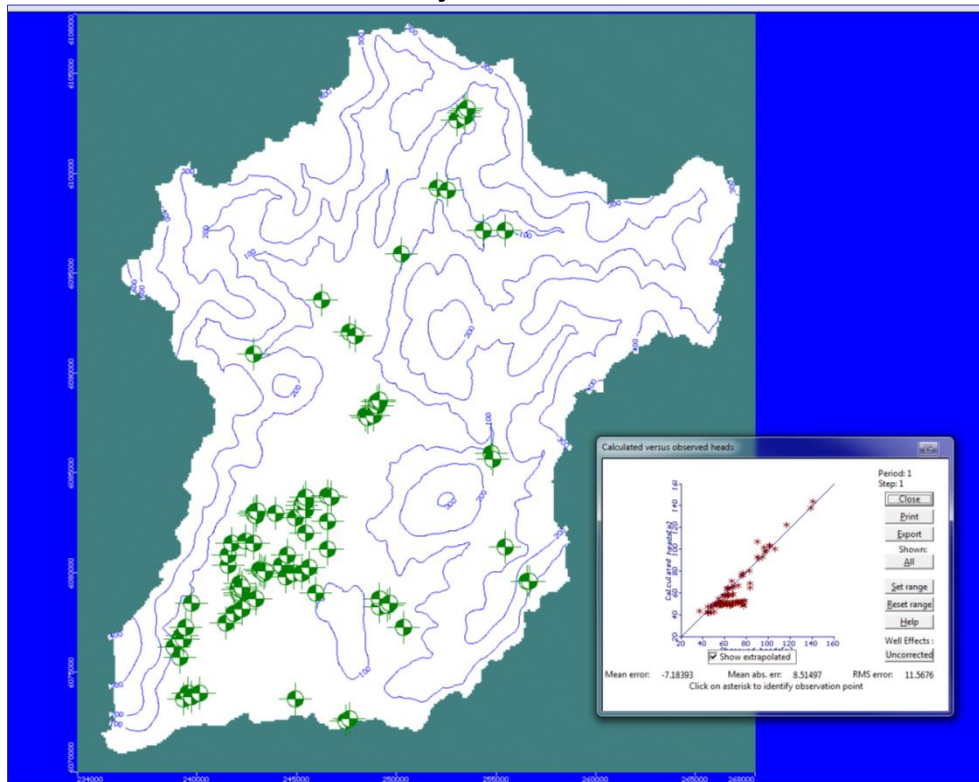
VMF	N°	k [m/s]	S [%]	VMF	N	k [m/s]	S [%]
	1	1.0.E-12	0.1		7	5.0.E-07	6.7
	2	1.0.E-10	2.3		8	1.0.E-06	7.5
	3	1.0.E-09	4.5		9	5.0.E-06	7.7
	4	1.0.E-08	5.3		10	1.0.E-05	7.8
	5	5.0.E-08	5.6		11	5.0.E-05	8.6
	6	1.0.E-07	6.4		12	1.0.E-04	8.9



se puede apreciar el ajuste entre niveles medidos y simulados, que resultó semejante a 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.

Figura VII-21. Calibración en régimen permanente  
Ajuste inicial



Ajuste final

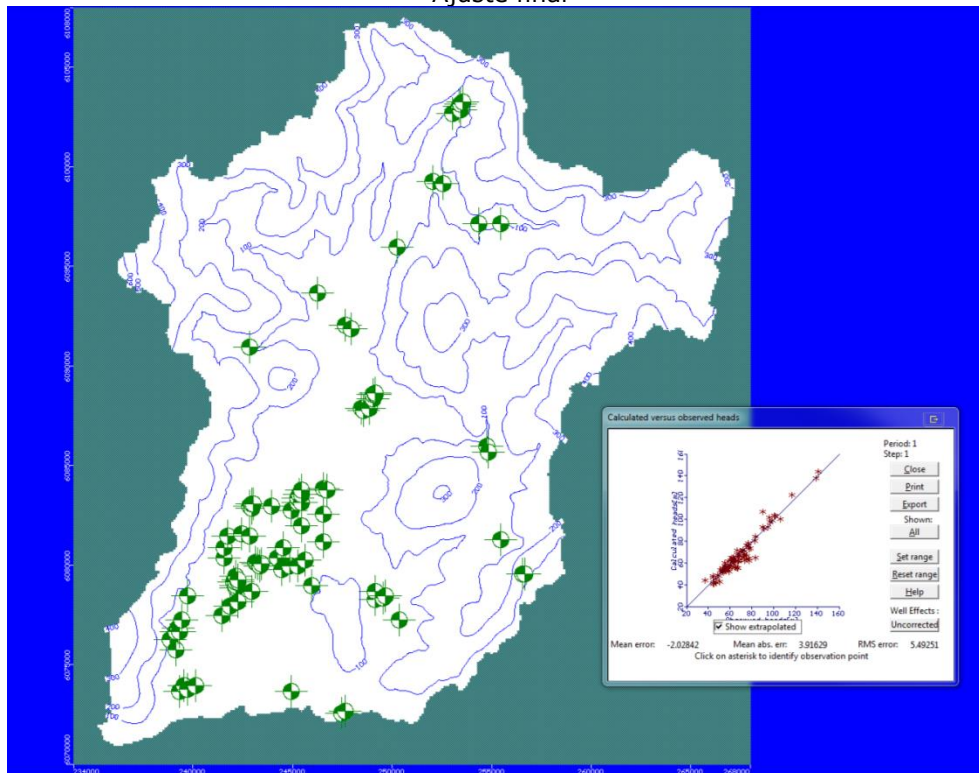
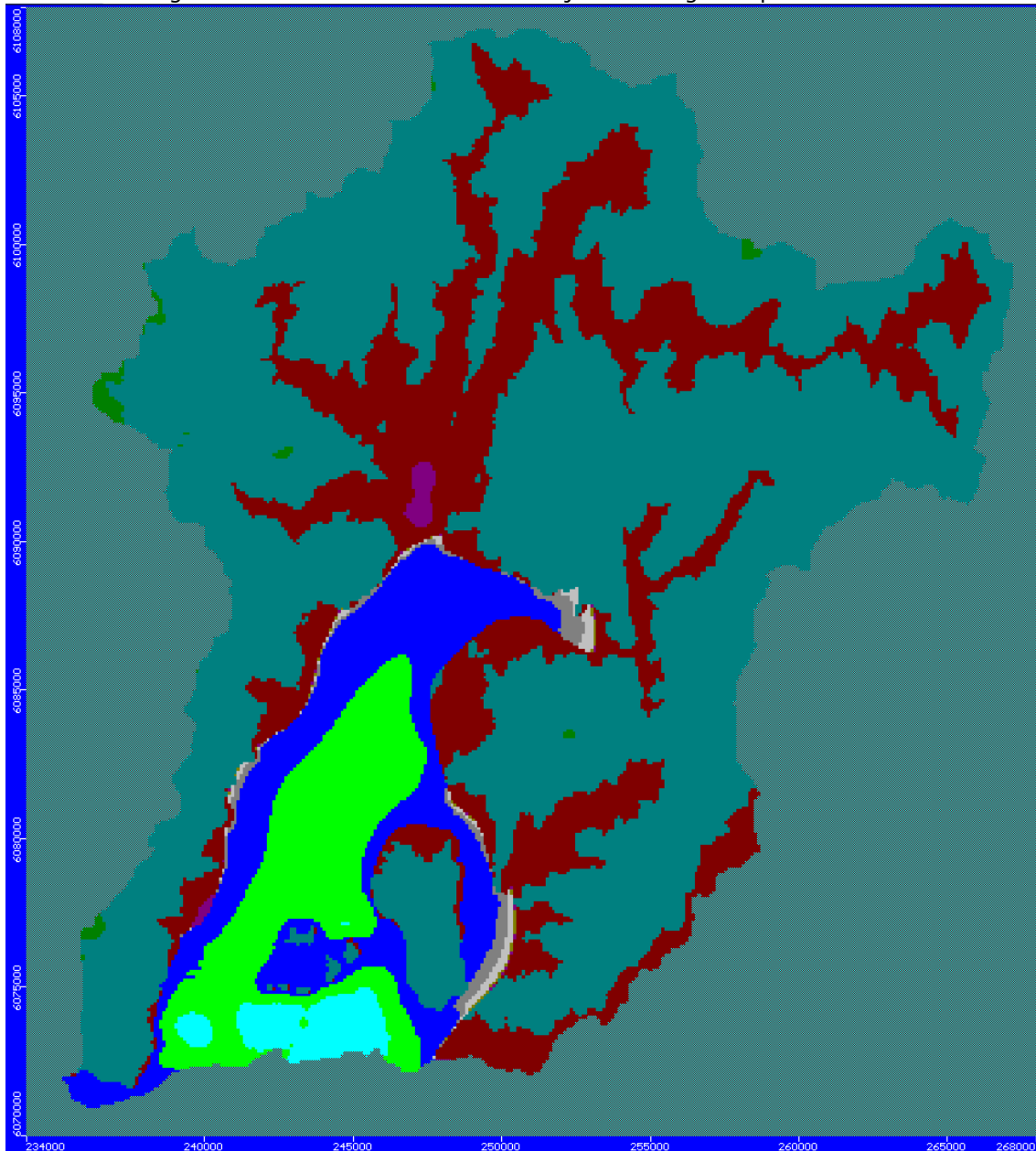


Figura VII-22. Permeabilidades tras ajuste en régimen permanente



VMF	N°	k [m/s]	VMF	N	k [m/s]
	1	1.0.E-12		7	5.0.E-07
	2	1.0.E-10		8	1.0.E-06
	3	1.0.E-09		9	5.0.E-06
	4	1.0.E-08		10	1.0.E-05
	5	5.0.E-08		11	5.0.E-05
	6	1.0.E-07		12	1.0.E-04

Figura VII-23. Calibración en régimen impermanente

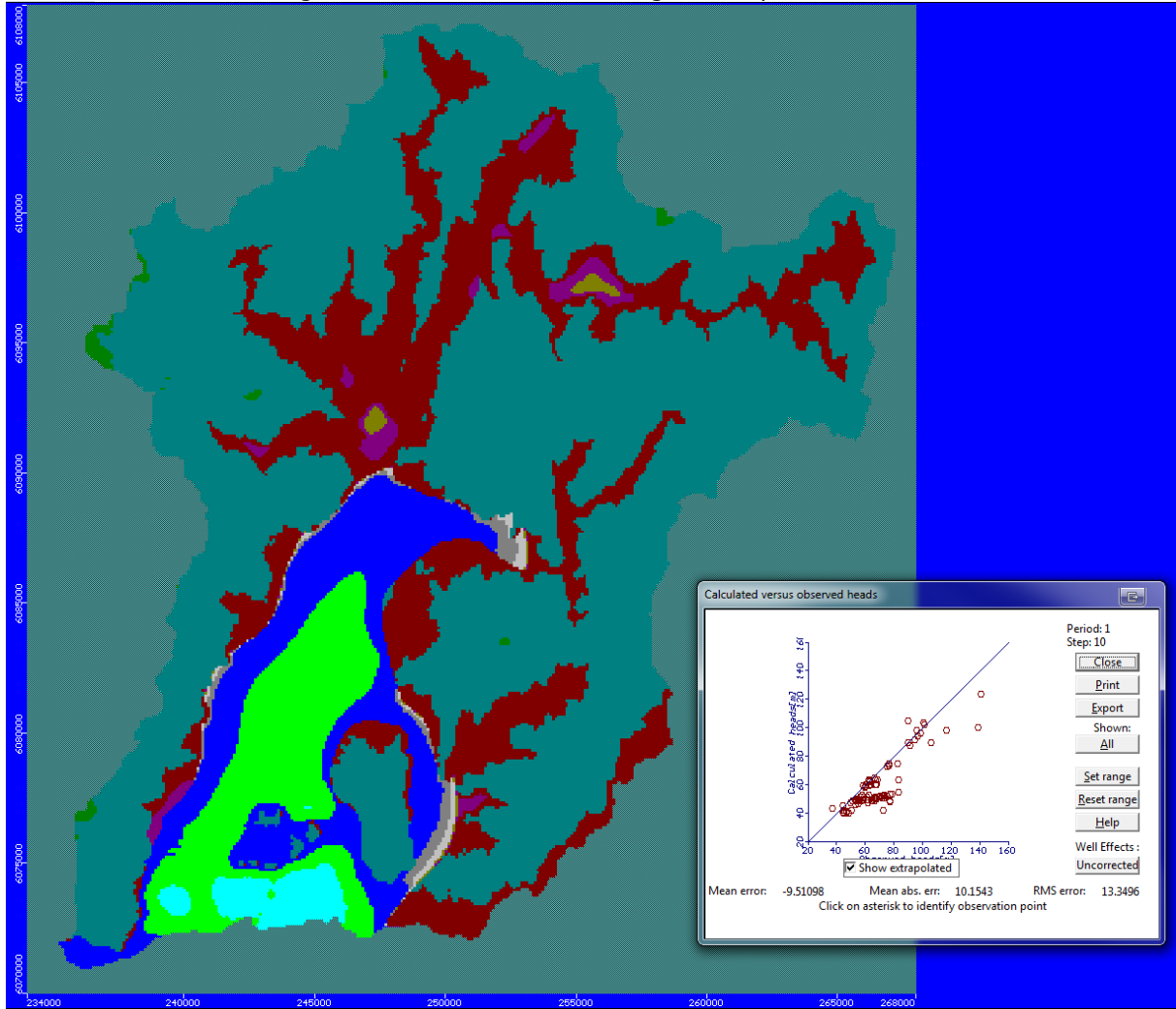


Tabla VII-3. Coeficientes de almacenamiento(S), MFS (régimen impermanente)

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

### VII.3.12 Operación MFS

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

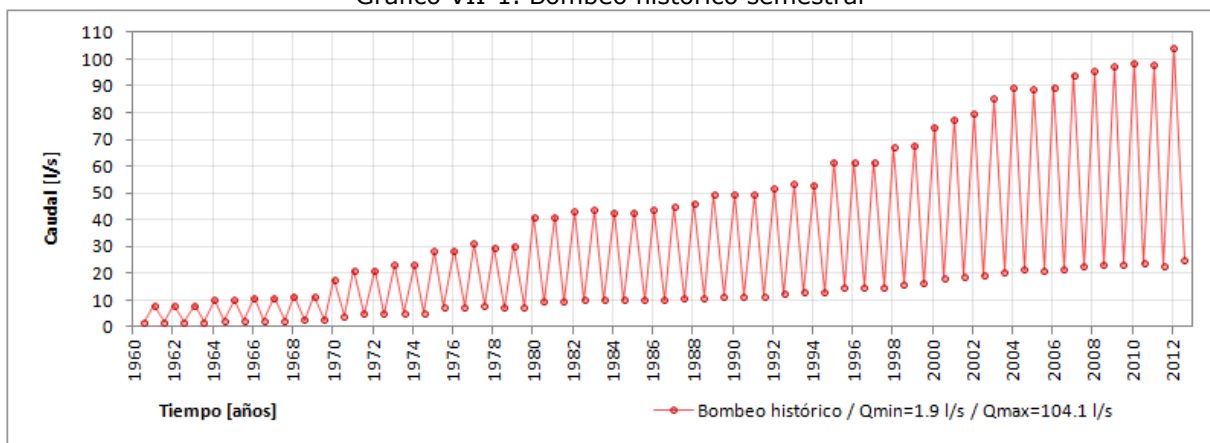
- Escenario 1*: Base
- Escenario 2*: Uso actual prolongado
- Escenario 3*: Demanda futura
- Escenario 4*: Derechos constituidos
- Escenario 5*: Derechos constituidos + pendientes

A continuación se describen las principales características de cada escenario.

#### VII.3.12.a 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 (ver punto VII.3.11).

Gráfico VII-1. Bombeo histórico semestral

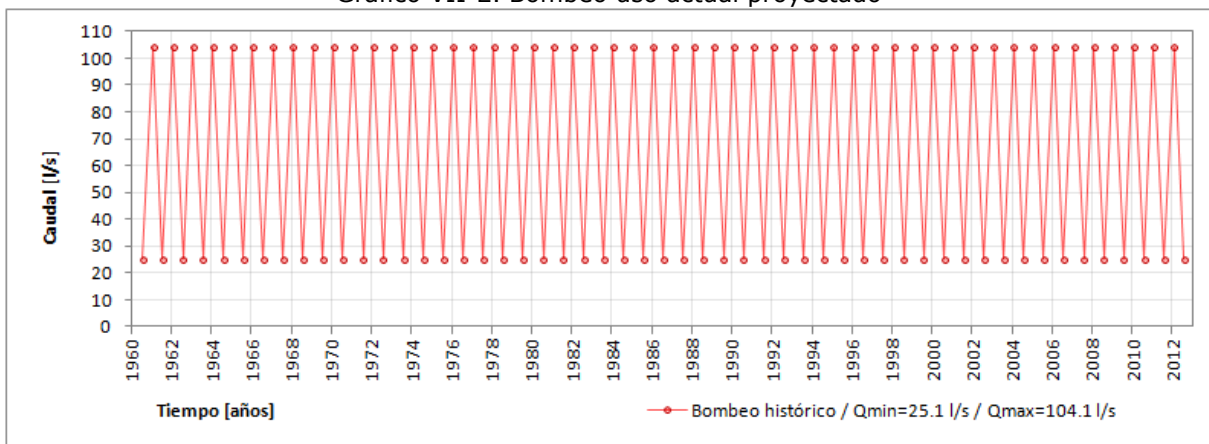


Semestre de invierno: 1 mayo al 1 de noviembre / Semestre de verano: 1 de noviembre al 1 de mayo

#### VII.3.12.b 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 (ver Gráfico VII-2). Las recargas incluyen las infiltraciones de precipitaciones y riego en todo el período. En el *Escenario 1* (punto anterior), las recargas por riego parten en 1999, con el inicio de la operación del canal Pencahue; previo a 1999, sólo hay recarga por precipitaciones.

Gráfico VII-2. Bombeo uso actual proyectado



### VII.3.12.c 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-3 se muestra el bombeo histórico y sus proyecciones lineales para los caudales de invierno y verano. En el Gráfico VII-4 se muestra el resultado obtenido.

Gráfico VII-3. Bombeo semestral

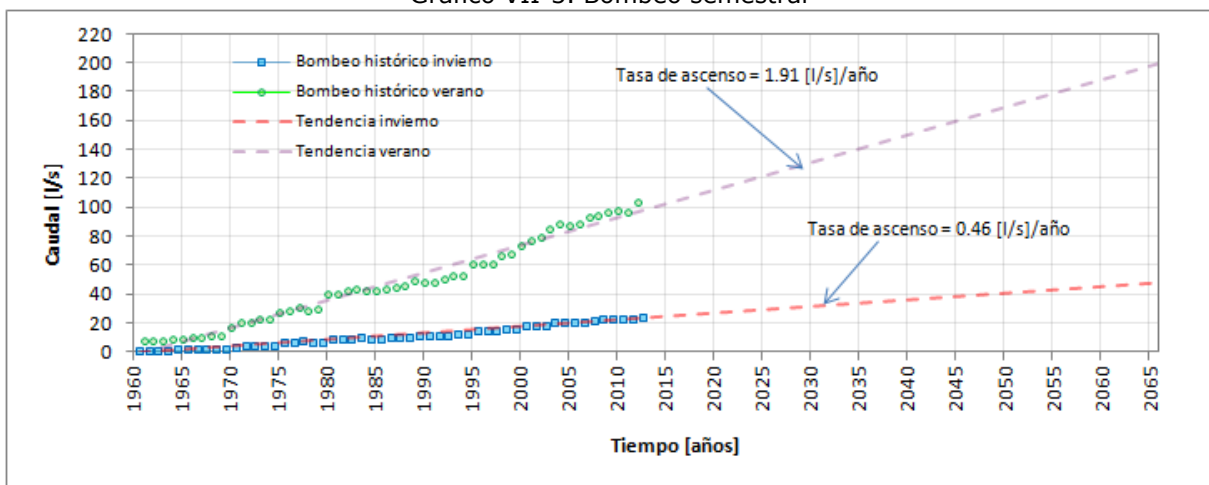
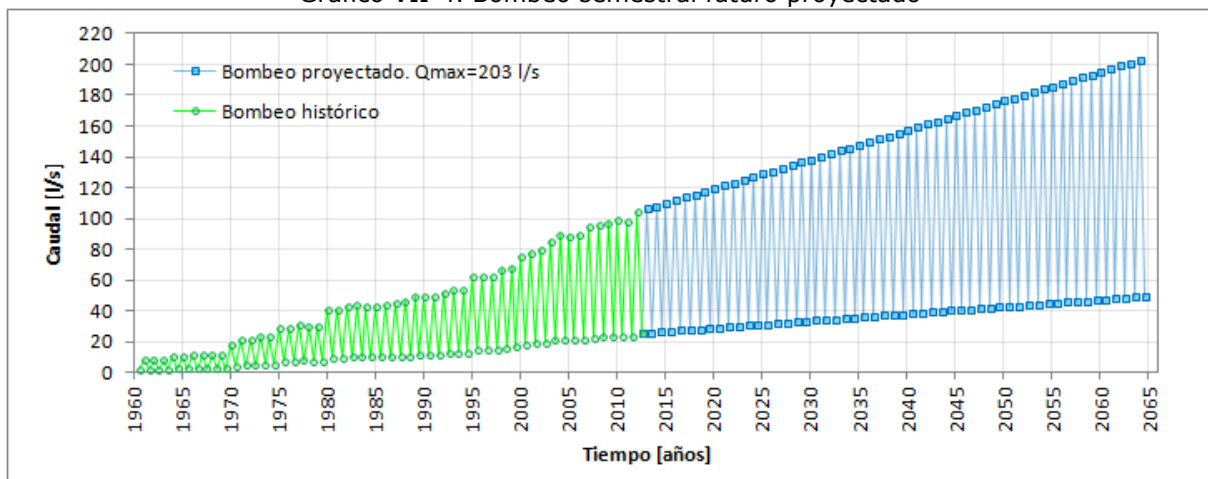


Gráfico VII-4. Bombeo semestral futuro proyectado



Escenarios de derechos:

#### VII.3.12.d Escenario 4: Derechos constituidos

En este escenario hipotético, se asumió que se extraen los caudales totales otorgados según los derechos de explotación.

Tabla VII-4. Extracciones Escenario 4

Nº	Expediente Nº	X [m]	Y [m]	Identificador de captación en malla VMF	Situación	Q [l/s]
1	ND-0702-2192	254878	6085612	W2192	Otorgado	0.20
2	ND-0702-2531	245364	6083515	W2531	Otorgado	0.20
3	ND-0702-2122	245462	6083771	W2122	Otorgado	0.30
4	ND-0702-2135	245419	6083737	W2135	Otorgado	0.30
5	ND-0702-2549	245269	6083440	W2549	Otorgado	0.30
6	ND-0702-3264	247931	6091963	W3264	Otorgado	0.39
7	ND-0702-2781	245900	6084485	W2781	Otorgado	0.40
8	ND-0702-2611	246073	6084415	W2611	Otorgado	0.50
9	ND-0702-2520	244075	6087391	W2520	Otorgado	0.50
10	ND-0702-2536	245469	6083652	W2536	Otorgado	0.60
11	ND-0702-2136	249814	6078729	W2136	Otorgado	1.50
12	ND-0702-2140	249775	6078766	W2140	Otorgado	1.50
13	ND-0702-1980	249109	6078682	W1980	Otorgado	1.80
14	ND-0702-1577	256125	6077008	W1577	Otorgado	3.00
15	ND-0702-2537	243954	6082945	W2537	Otorgado	4.00
16	ND-0702-3379	247131	6082015	W3379	Otorgado	4.40
17	ND-0702-3378	248045	6081592	W3378	Otorgado	7.60
18	ND-0702-1472	241669	6081947	W1472	Otorgado	8.00
19	ND-0702-1555	240335	6074348	W1555	Otorgado	8.00
20	ND-0702-558	244811	6074163	W558	Otorgado	10.00
21	ND-0703-5163	250563	6089039	W5163	Otorgado	15.00
22	ND-0702-3377	247900	6081660	W3377	Otorgado	15.50
23	ND-0702-1376	247883	6073004	W1376	Otorgado	22.00
					Total	105.99

### VII.3.12.e Escenario 5: Derechos constituidos + pendientes

A los bombeos del escenario anterior, se suman los correspondientes a solicitudes de derechos pendientes.

Tabla VII-5. Extracciones que se suman a Escenario 4 para configurar Escenario 5

N°	Expediente N°	X [m]	Y [m]	Identificador de captación en malla VMF	Situación	Q [l/s]
1	ND-0702-1775	245495	6082525	W1775	Pendiente	1.000
2	ND-0702-1621	239526	6074060	W1621	Pendiente	0.005
3	ND-0702-3414	245156	6085368	W3414	Pendiente	0.800
4	ND-0702-2550	249340	6077244	W2550	Pendiente	0.900
5	ND-0702-3415	244649	6080076	W3415	Pendiente	0.900
6	ND-0702-1620	237774	6071922	W1620	Pendiente	1.000
7	ND-0702-1918	246661	6083706	W1918	Pendiente	1.000
8	ND-0702-2202	250344	6077669	W2202	Pendiente	1.000
9	ND-0702-2259	244890	6079980	W2259	Pendiente	1.000
10	ND-0702-2583	245250	6079937	W2583	Pendiente	1.000
11	ND-0702-3413	247441	6091705	W3413	Pendiente	1.100
12	ND-0702-3413	247649	6092080	W3413	Pendiente	1.100
13	ND-0702-1802	250709	6076418	W1802	Pendiente	1.100
14	ND-0702-2316	251070	6077361	W2316	Pendiente	1.500
15	ND-0702-2318	250339	6077235	W2318	Pendiente	1.500
16	ND-0702-1947	256654	6079652	W1947	Pendiente	2.000
17	ND-0702-1948	256595	6079636	W1948	Pendiente	2.000
18	ND-0702-2199	250323	6077204	W2199	Pendiente	2.000
19	ND-0702-2321	250728	6077172	W2321	Pendiente	2.000
20	ND-0702-2323	250487	6077385	W2323	Pendiente	3.000
21	ND-0702-3422	249700	6078423	W3422	Pendiente	3.060
22	ND-0702-3422	249908	6078797	W3422	Pendiente	3.060
23	ND-0702-3826	239398	6076616	W3826	Pendiente	4.000
24	ND-0702-2477	255932	6097764	W2477	Pendiente	4.000
25	ND-0702-3045	244461	6081112	W3045	Pendiente	4.000
26	ND-0702-3836	243283	6084131	W3836	Pendiente	4.500
27	ND-0702-1994	247441	6092588	W1994	Pendiente	4.500
28	ND-0702-3416	244360	6080390	W3416	Pendiente	7.000
29	ND-0702-3654	244138	6086722	W3654	Pendiente	49.000
Total pendientes						109.03
Total escenario 5						215.02

### VII.3.12.f Resultados de Escenario 1

Los flujos que se muestran en el Gráfico VII-5, revelan el funcionamiento histórico del sistema, representado con el MFS. Las recargas totales aumentan desde 1999 en adelante, debido al aporte del canal Pencahue. 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.

### VII.3.12.g Resultados de Escenario 2

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 (ver Gráfico VII-6). 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.



### VII.3.12.h Resultados de Escenario 3

En este escenario 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 de 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.

### VII.3.12.i Resultados de Escenario 4

Al imponer un bombeo total continuo de 106 l/s en los puntos con derechos otorgados, 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 pozos ubicados en las celdas que se secaron. Los pozos modificados y sus caudales asociados en cada iteración se presentan en la Tabla VII-6.

Tabla VII-6. Caudales de bombeo en iteraciones de escenario 4

Pozo/Iteración	1	2	3	4
<b>Bombeo total inicial</b>	105.99	84.24	78.99	76.37
<b>W2140</b>	1.50	0.75	0.38	0.19
<b>W2136</b>	1.50	0.75	0.38	0.19
<b>W1577</b>	3.00	1.50	0.75	0.38
<b>W5163</b>	15.00	7.50	3.75	1.88
<b>W2520</b>	0.50	0.25	0.25	0.25
<b>W1376</b>	22.00	11.00	11.00	11.00
<b>Suma Caudales</b>	43.50	21.75	16.50	13.88
<b>Reducción</b>	0.00	21.75	27.00	29.63

Los flujos promedios semestrales obtenidos en la cuarta iteración, se presentan en el Gráfico VII-8. En esa iteración se obtuvo una reducción admisible del caudal de bombeo inicial impuesto debido a descensos excesivos de niveles.

### VII.3.12.j Resultados de Escenario 5

Este escenario 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 (ver Tabla VII-7), 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 (ver Gráfico VII-9).

Tabla VII-7. Caudales de bombeo en iteraciones de escenario 5

<b>Pozo/Iteración</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Bombeo total inicial</b>	215.02	156.69	128.77	118.01
<b>W2477</b>	4.00	2.00	1.00	1.00
<b>W1994</b>	4.50	2.25	1.13	1.13
<b>W5163</b>	15.00	7.50	3.75	1.88
<b>W2520</b>	0.50	0.25	0.25	0.25
<b>W3654</b>	49.00	24.50	12.25	6.13
<b>W2140</b>	1.50	0.75	0.38	0.19
<b>W2136</b>	1.50	0.75	0.38	0.19
<b>W3422x</b>	3.06	1.53	0.77	0.38
<b>W1948</b>	2.00	1.00	0.50	0.25
<b>W1947</b>	2.00	1.00	0.50	0.25
<b>W1577</b>	3.00	1.50	0.75	0.38
<b>W1620</b>	1.00	0.50	0.25	0.25
<b>W2323</b>	3.00	1.50	1.50	0.75
<b>W2316</b>	1.50	0.75	0.75	0.38
<b>W2321</b>	2.00	1.00	0.50	0.50
<b>W1802</b>	1.10	0.55	0.28	0.28
<b>W1376</b>	22.00	11.00	5.50	5.50
<b>Suma Caudales</b>	116.66	58.33	30.42	19.66
<b>Reducción</b>	0.00	58.33	86.25	97.00

Gráfico VII-5. Flujos principales simulados en escenario 1

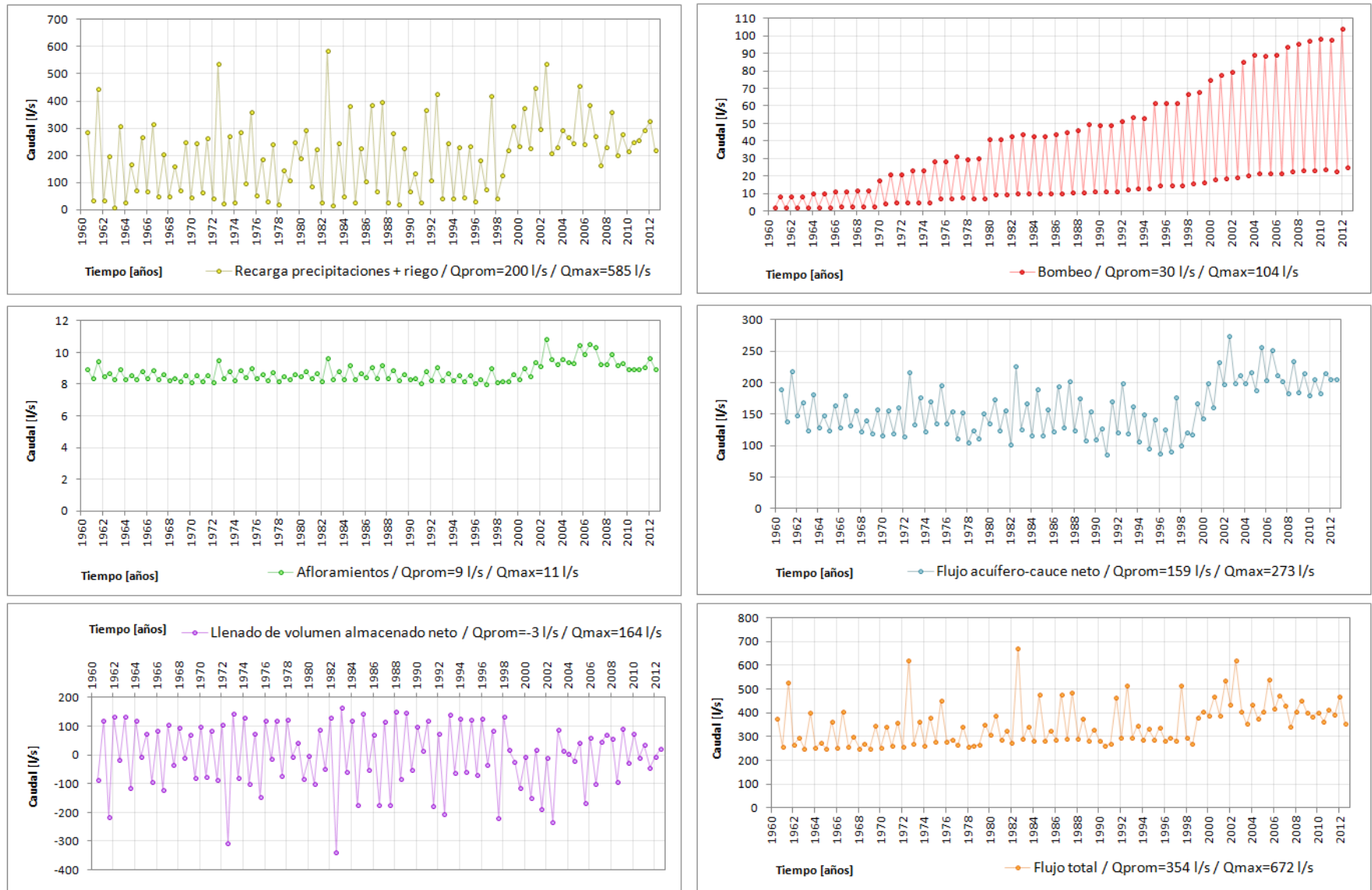


Gráfico VII-6. Flujos principales simulados en escenario 2

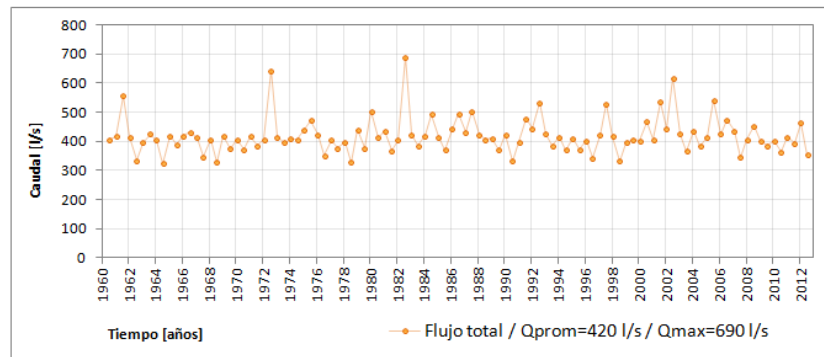
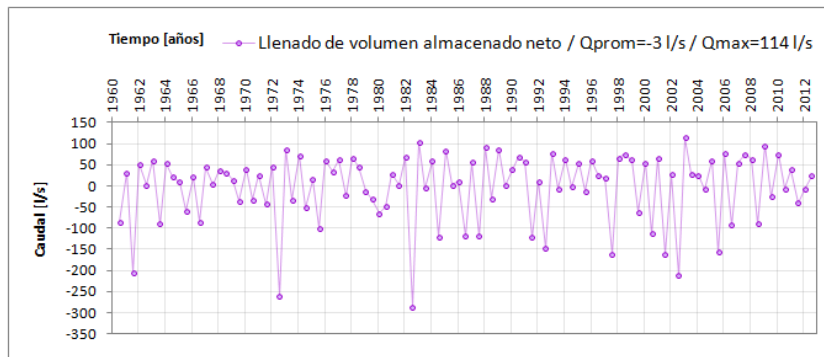
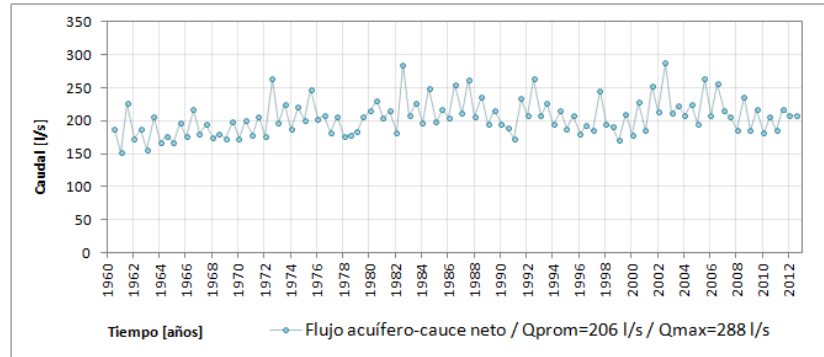
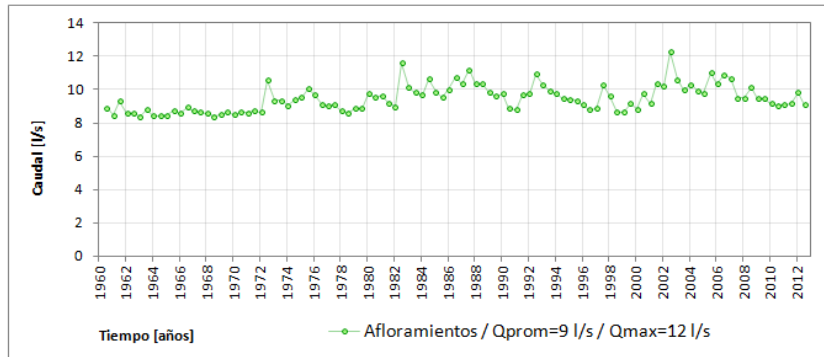
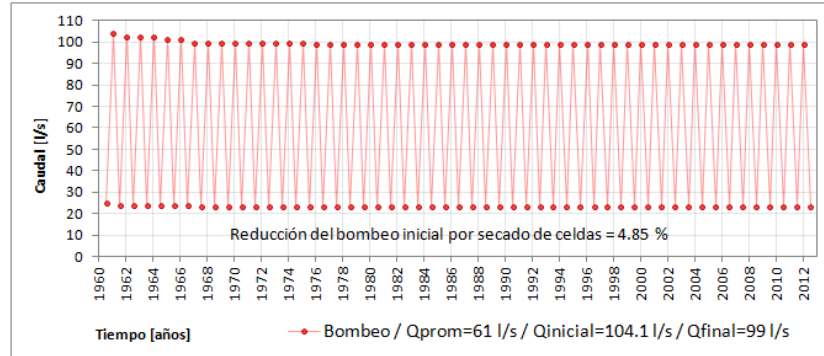
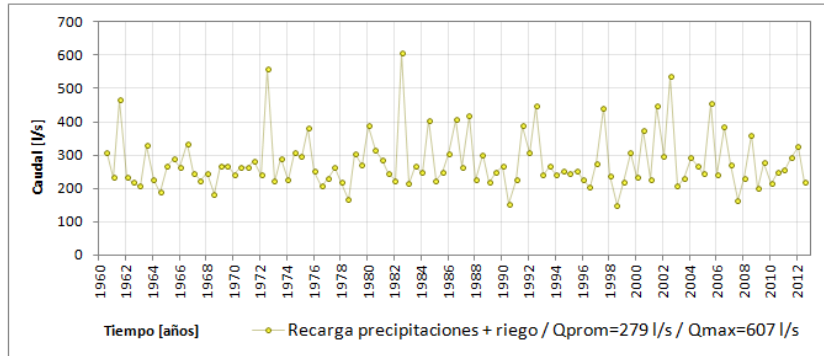


Gráfico VII-7. Flujos principales simulados en escenario 3

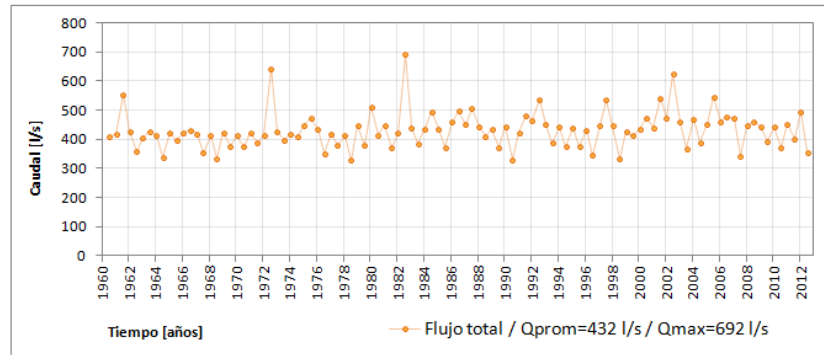
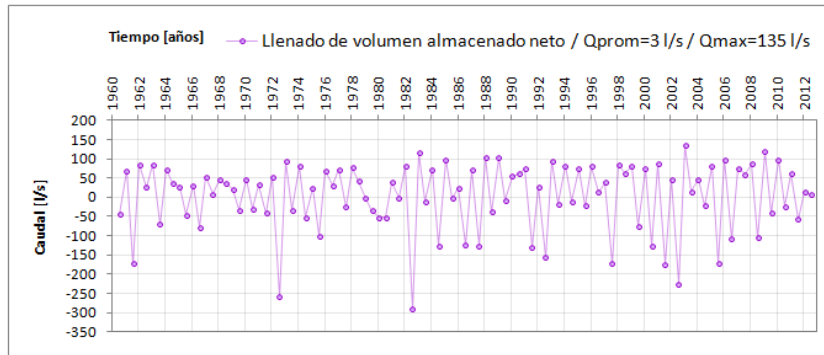
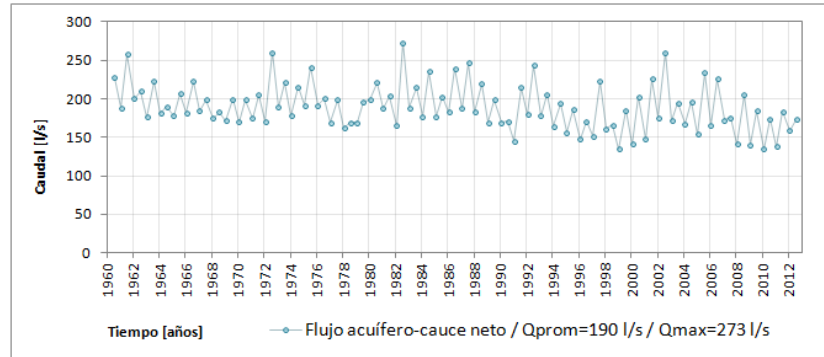
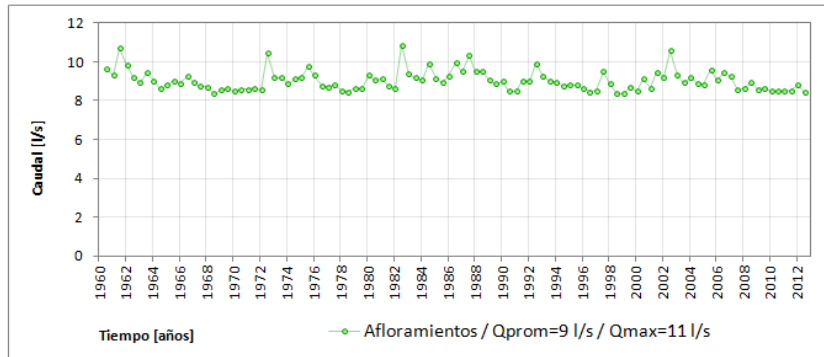
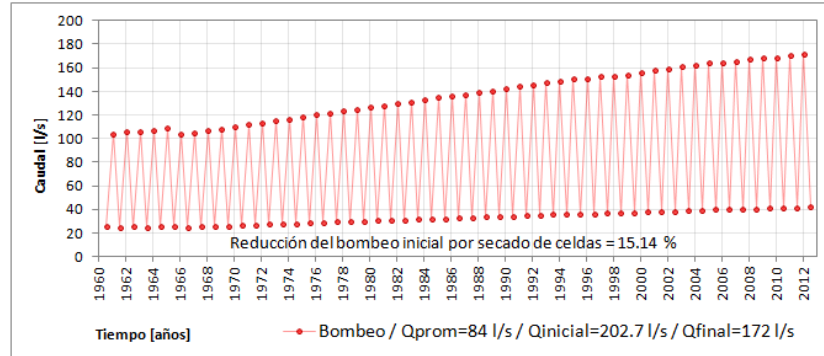
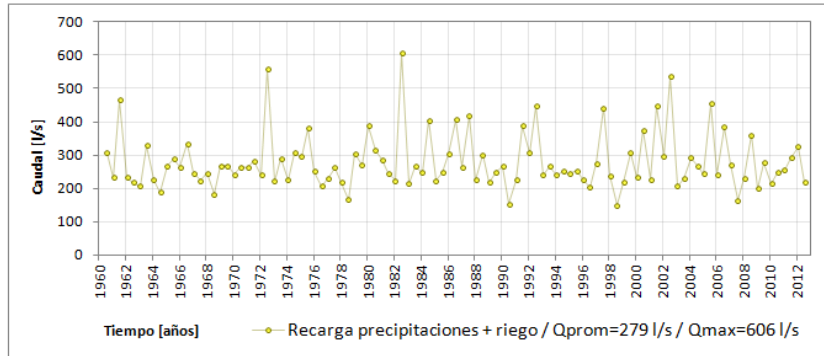


Gráfico VII-8. Flujos principales simulados en escenario 4

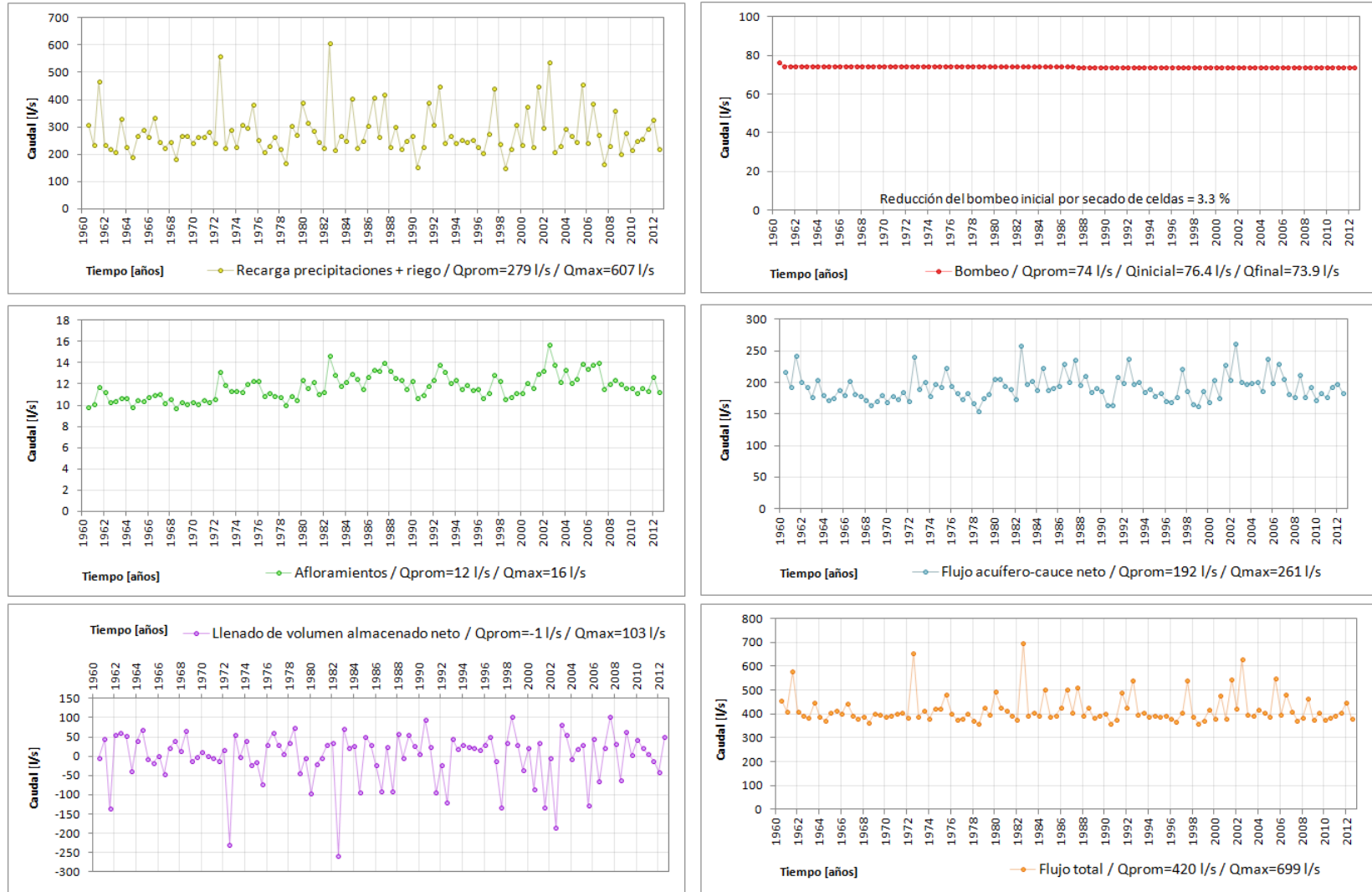
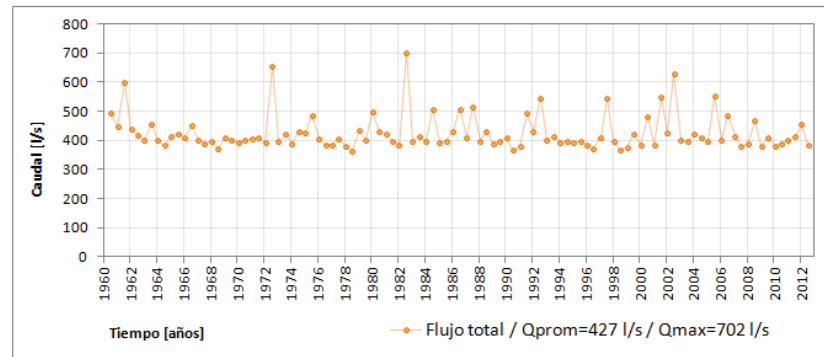
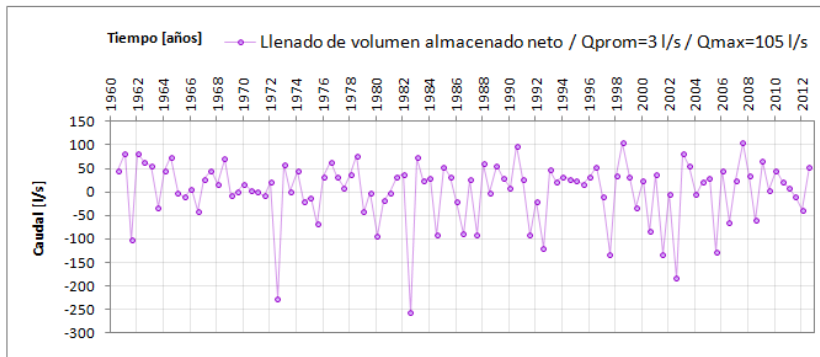
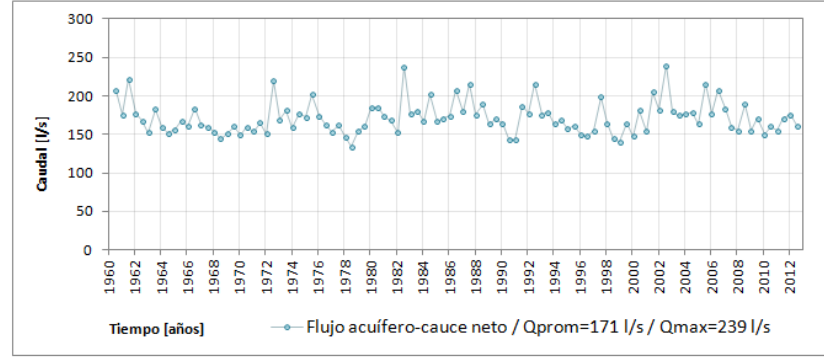
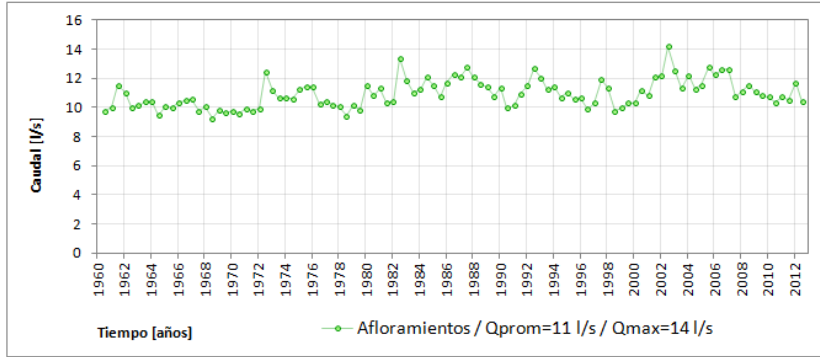
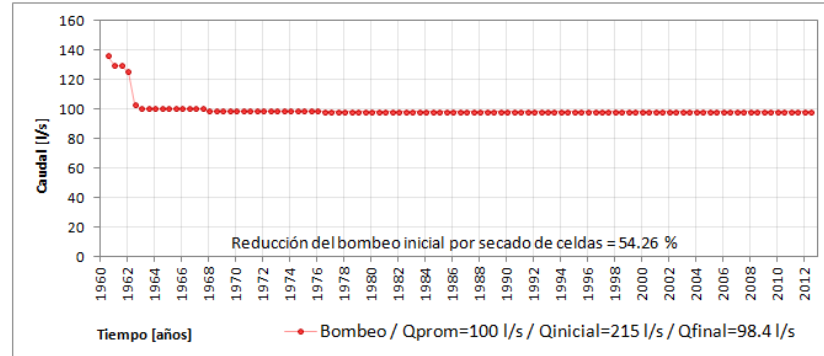
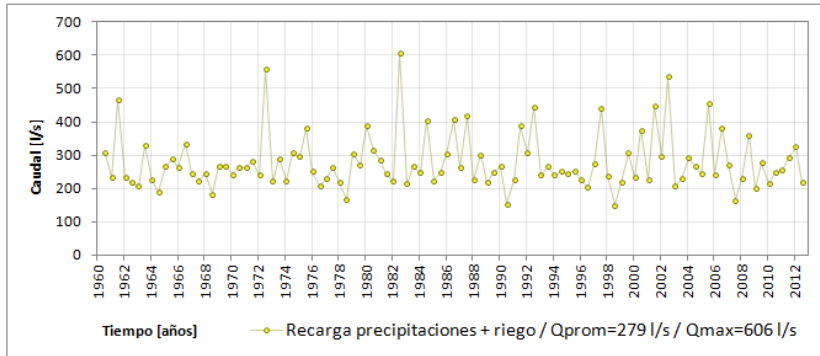


Gráfico VII-9. Flujos principales simulados en escenario 5



### VII.3.12.k Resultados de Escenario 5 en subsectores

Se operó 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-24).

Figura VII-24. Volúmenes de control en subsectores de interés (zone budgets)

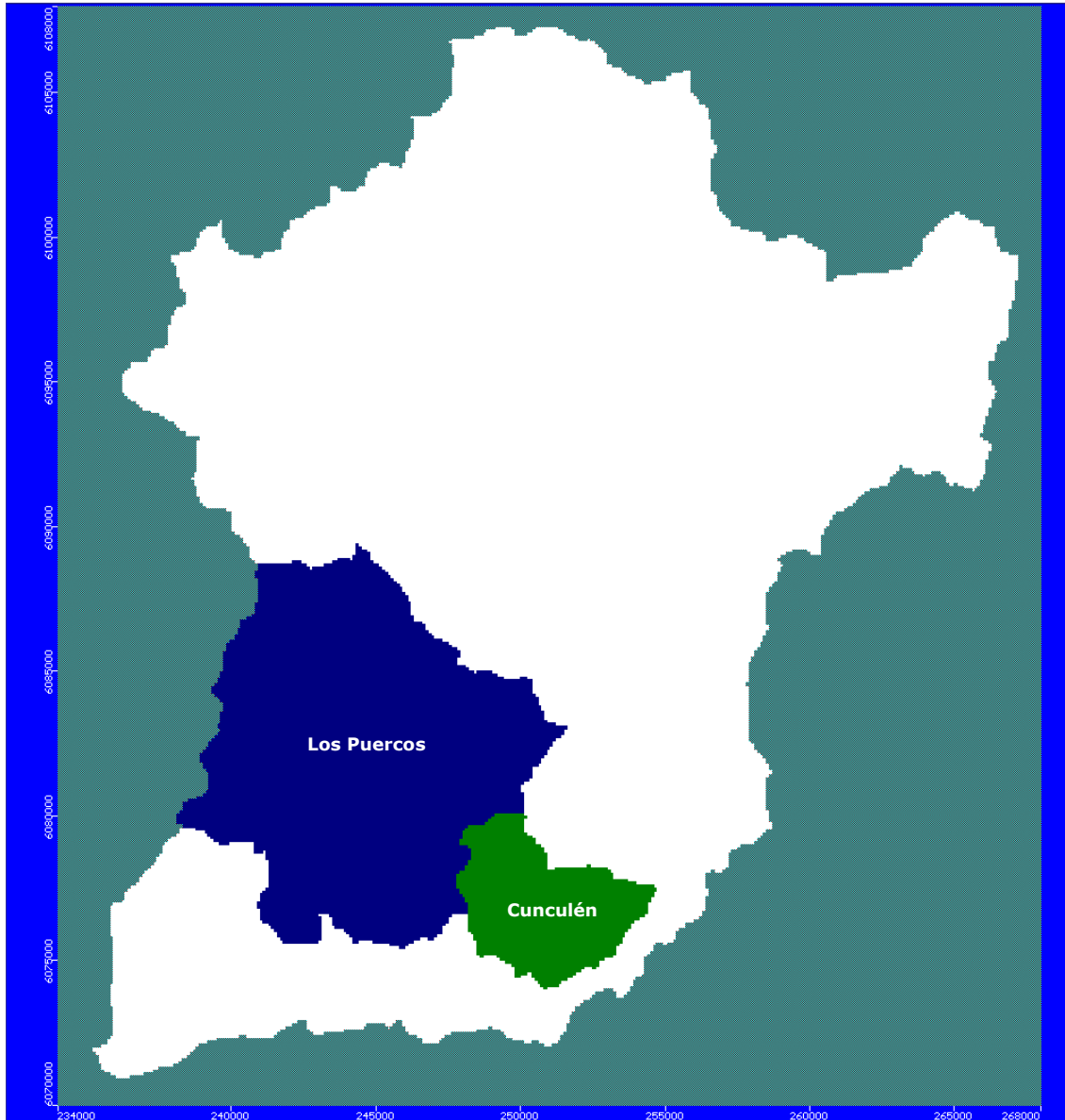
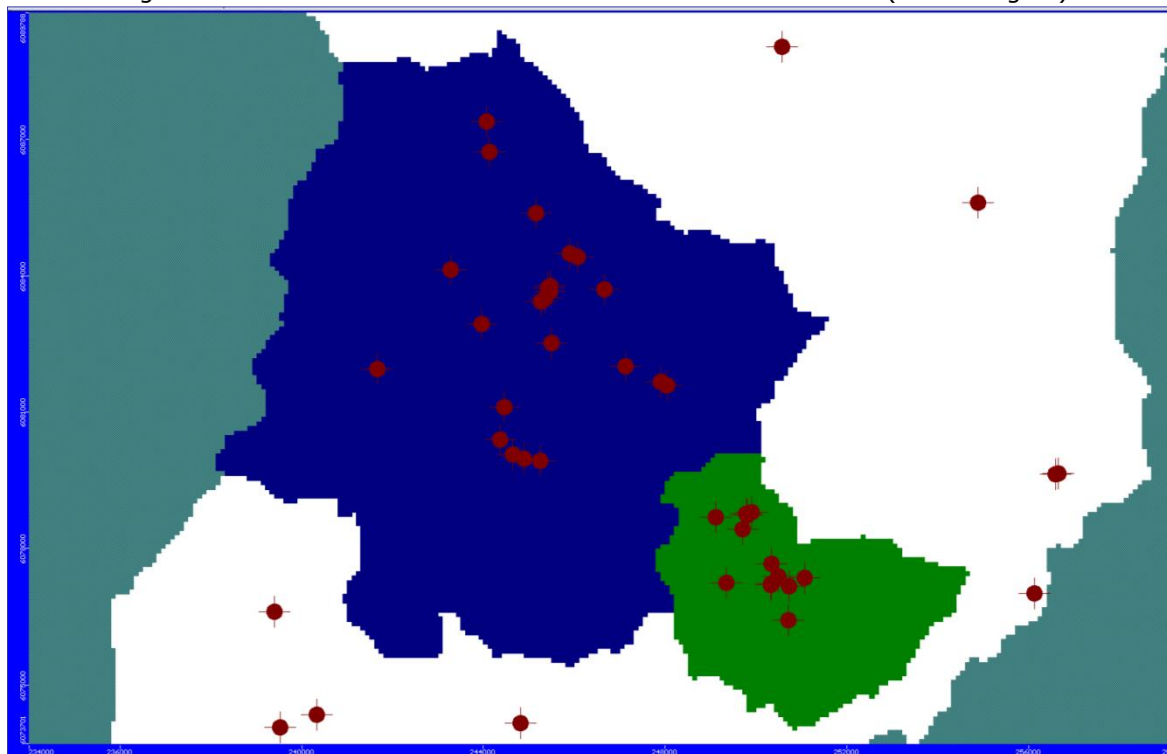




Figura VII-25. Volúmenes de control en subsectores de interés (zone budgets)



Según la simulación efectuada, el sector Los Puercos responde bien a una solicitud de 70 l/s continuos (ver Gráfico VII-10).

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 (ver Gráfico VII-11).

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

Gráfico VII-10. Flujos principales simulados en escenario 5 en subsector Los Puercos

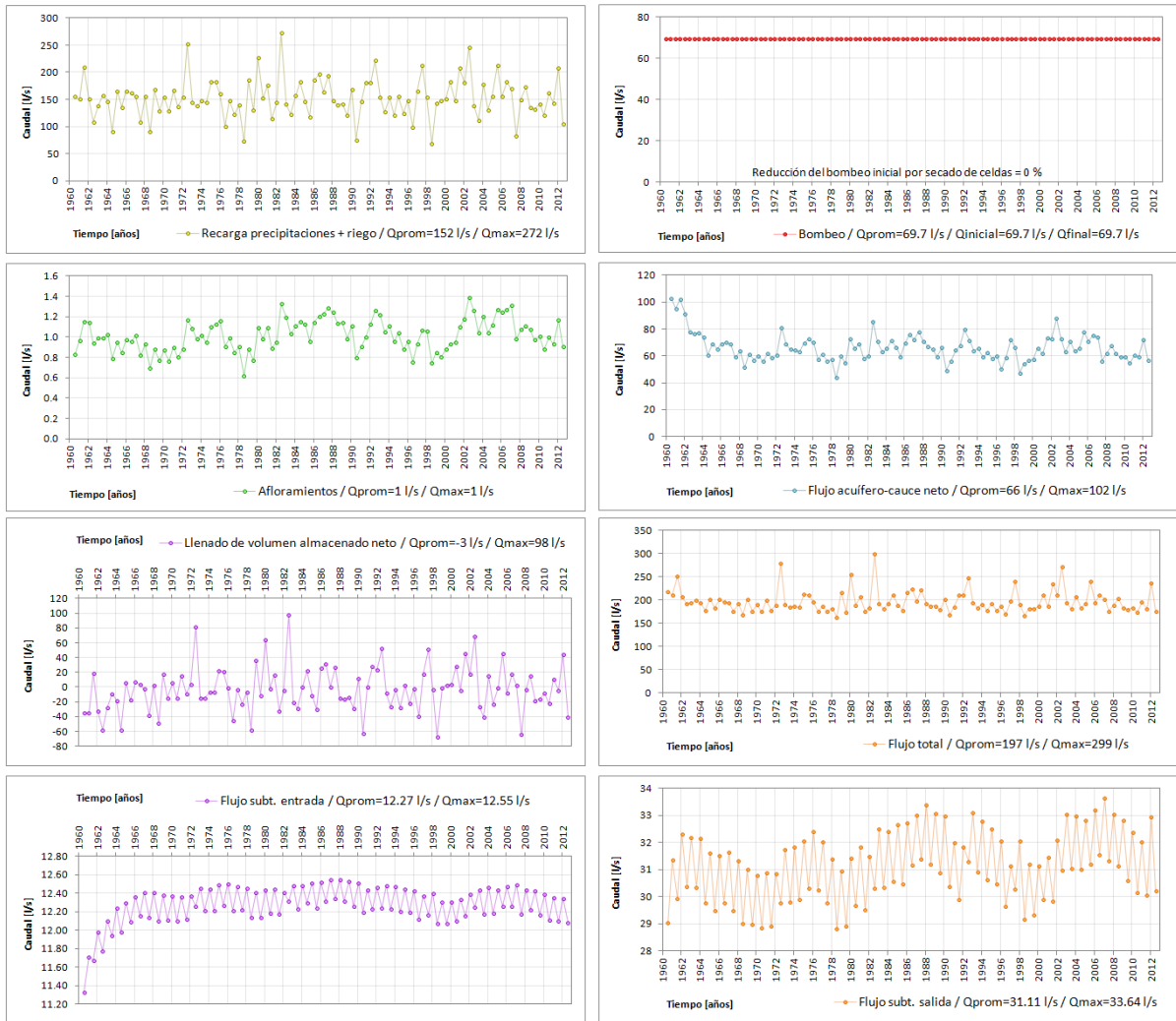
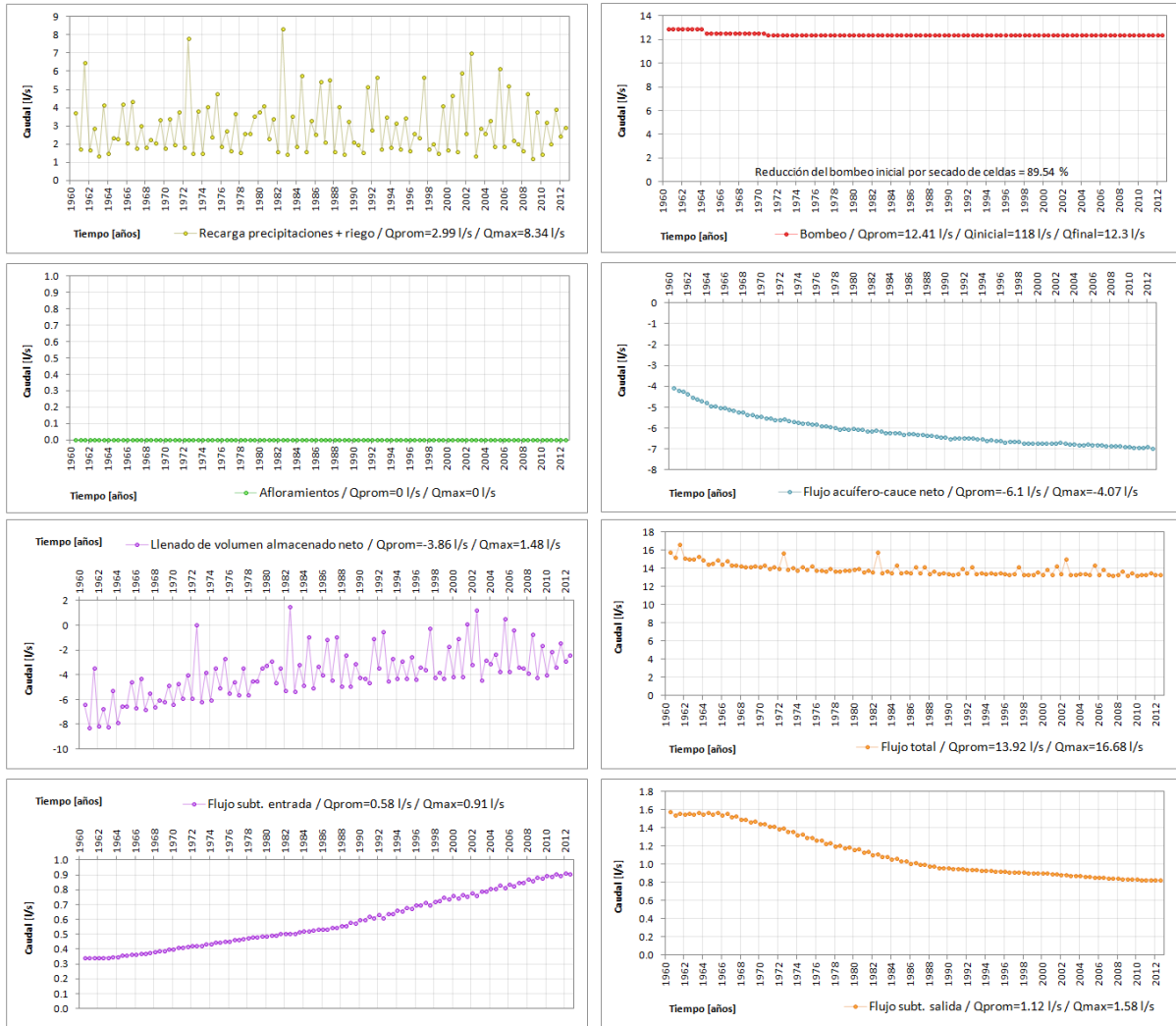


Gráfico VII-11. Flujos principales simulados en escenario 5 en subsector Cunculén



## VIII Conclusiones y recomendaciones

Los principales resultados del estudio se relacionan con el potencial hidrogeológico del área, cuantificado a través de la operación del MFS, 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 Pencahue, 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  $16.1 \text{ m}^3/\text{s}$ . El caudal de riego promedio alcanza a  $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , para el período en el que la cuenca ha sido abastecida por el canal Pencahue (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 resultó de 280 l/s. Las variaciones en el tiempo de la recarga se pueden apreciar, para cada escenario, en los gráficos del punto VII.3.12.

Al operar los escenarios 4 y 5, de derechos otorgados y derechos [otorgados + pendientes], respectivamente, se debió reducir progresivamente los caudales impuestos para evitar descensos excesivos de los niveles. Los valores reducidos de los propiedades físicas de los medios existentes en el área (k y S), imposibilitan extracciones prolongadas y continuas de caudales sobre 10 a 20 l/s (dependiendo del sector). No obstante, es posible extraer desde los pozos con capacidades suficientes, caudales de esas magnitudes de forma intermitente, como ocurre en los pozos que se usan para riego, que bombean de forma intensa sólo 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, respectivamente. Probablemente se podría llegar a un caudal total de 150 l/s si se incorporan captaciones bien distribuidas en la cuenca pero captando caudales pequeños (<2 l/s) y estacionalmente variables (uso riego, variable entre invierno y verano).

Los resultados obtenidos con el modelo son representativos del área estudiada. Particularmente en términos de caudales. En cuanto a los niveles, los modelos permiten generar superficies freáticas aproximadas, puesto que no se cuenta con datos de niveles medidos en el tiempo, como para realizar una adecuada calibración transiente.

A pesar de que no fue 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.

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.

Con relación a las solicitudes del sistema, un factor de incertidumbre es el de las extracciones reales, puesto que muchos de los propietarios encuestados durante el desarrollo del catastro no sabían qué caudales bombean sus captaciones y tampoco llevan registro de la frecuencia de uso. Sería de gran utilidad que cada usuario llevara un control de niveles y de volúmenes bombeados, pero en términos prácticos, ese escenario es difícil de alcanzar y la aproximación más cercana se debe obtener con procedimientos estadísticos.

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.

## **IX Hitos administrativos**

### **IX.1 Reunión de coordinación de etapa 1**

Los días viernes 21 de junio y jueves 8 de agosto de 2013, entre las 12:00 y las 13:00 horas, se efectuaron reuniones de coordinación para discutir el avance del informe de etapa 1 del presente estudio.

### **IX.2 Presentación de etapa 1**

El día jueves 8 de agosto de 2013, entre las 12:00 y las 13:00 horas, se realizó la presentación del avance del informe de etapa 1 del presente estudio.

### **IX.3 Reunión de coordinación de etapa 2**

El día martes 17 de septiembre de 2013, entre las 11:00 y las 12:00 horas, se efectuó la reunión de coordinación para discutir el avance del informe de etapa 2 del presente estudio.

### **IX.4 Presentación de etapa 2**

El día martes 17 de septiembre de 2013, entre las 11:00 y las 12:00 horas, se realizó la presentación del avance del informe de etapa 2 del presente estudio.

### **IX.5 Reunión de coordinación de etapa 3**

El día viernes 25 de octubre de 2013, se efectuó la reunión de coordinación para discutir el avance del informe de etapa 3 del presente estudio.

### **IX.6 Presentación de etapa 3**

El día viernes 25 de octubre de 2013, se realizó la presentación del avance del informe de etapa 3 del presente estudio.

## **X Bibliografía**

1. AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA. Diagnóstico de recursos hídricos y Costero VI a VIII Región. Santiago, Dirección de Riego, 2003.
2. GCF INGENIEROS CONSULTORES LTDA. Estudio Hidrogeológico del secano interior y costero. Regiones VI, VII y VIII. Sector Cauquenes - Belco - Pocillas. Santiago, IICA, 2001.
3. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS; UNIVERSIDAD DE CHILE. Modelación Hidrológica de Cuencas Pluviales, Hoya Hidrográfica del río Maule. Santiago, MOP - DGA, 2005.