



**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

**EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÁNEOS DE LOS SECTORES
HIDROGEOLÓGICOS DE APROVECHAMIENTO
COMÚN OJOS DE SAN PEDRO Y PAMPA PEINETA**

INFORME TÉCNICO

**DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN
DE RECURSOS HÍDRICOS**

S.D.T. N° 351

Santiago, Febrero de 2014.

ÍNDICE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	3
2	OBJETIVOS	3
3	ANTECEDENTES	4
4	CRITERIOS DEL SERVICIO	5
4.1	Situación actual de derechos subterráneos comprometidos en la cuenca del río San Pedro de Inacaliri	5
5	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA Y SECTORES ACUÍFEROS	6
5.1	Localización General	6
5.2	Descripción morfo estructural regional	7
5.3	Descripción morfológica de la cuenca del río San Pedro de Inacaliri	7
5.4	Regimen general de precipitaciones	8
5.5	Caracterización geológica	9
5.6	Discontinuidad hidrogeológica en la cuenca río San Pedro de Inacaliri	9
5.7	Grado de relación entre los acuíferos de la cuenca del río San Pedro de Inacaliri	14
6	ANÁLISIS	16
6.1	Delimitación de la cuenca aportante al sector hidrogeológico San Pedro Inacaliri	16
6.2	Estimación de la recarga por la precipitación media de la cuenca	17
6.2.1	Sector acuífero Ojos de San Pedro	17
6.2.2	Sector acuífero Pampa Peineta	19
6.3	Balance de aguas subterráneas en el área de estudio	21
7	CONCLUSIONES	22

ÍNDICE FIGURAS

1	Ubicación general	6
2	Croquis de tectónica de bloques, Cuenca San Pedro de Inacaliri	7
3	Perfil de gradientes hidráulicas	11
4	Acuíferos en la cuenca	13
5	Perfil TEM en sección de salida desde Pampa Peineta a valle de San Pedro de Inacaliri	14
6	Ubicación de los pozos de muestreo de perfil TEM	15
7	Hitos morfológicos de la cuenca aportante	16
8	Área de influencia de Isoyetas (mm) en la Cuenca aportante Ojos San Pedro	18
9	Área de influencia de Isoyetas (mm) en la Cuenca aportante Pampa Peineta	20

ÍNDICE TABLAS

1	Áreas bajo influencia de Isoyetas (mm) para cuenca aportante Ojos de San Pedro	18
2	de recarga media del sector hidrogeológico y disponibilidad	19
3	Áreas bajo influencia de Isoyetas para cuenca aportante Pampa Peineta	19
4	Valores de recarga media del sector hidrogeológico y disponibilidad	21

ANEXOS

ANEXO 1	Demanda de aguas subterráneas	23
ANEXO 2	Mapa del sector hidrogeológico de aprovechamiento común	24



1 INTRODUCCIÓN.

La sub cuenca del río San Pedro de Inacaliri pertenece al sector alto de la cuenca del río Loa, está compuesta por dos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común, uno de ellos enclavado en la cabecera de la cuenca - en la falda occidental de la Cordillera de los Andes - denominado Pampa Peineta, ubicado inmediatamente bajo de la macro formación altiplano; mientras que el segundo de ellos, denominado Ojos de San Pedro, se ubica en el curso medio del río San Pedro de Inacaliri, lugar donde se presenta la formación geológica Ojos del Inacaliri, la cual se caracteriza por presentar surgencia de aguas subterráneas y alimentar el cauce seco, hasta este punto, del río.

El marco geográfico anteriormente descrito plantea la necesidad de que este Servicio se pronuncie respecto a la disponibilidad del recurso subterráneo, de tal forma de asegurar sustentabilidad en la explotación de los recursos hídricos de la zona a través de la gestión sustentable y propicia de las aguas.

De acuerdo a antecedentes del área, en cuanto a la precipitación, composición geológica e hidrogeológica de la cuenca, se estimara la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común Ojos de San Pedro y Pampa Peineta, con la premisa de asegurar la sustentabilidad de la explotación de dichos recursos y evitar el riesgo de disminución o afectación de dichas fuentes.

Lo anterior en atención a un importante volumen del recurso subterráneo ya comprometido en el sector de Ojos de San Pedro, con derechos constituidos y vigentes, otorgados para su utilización por parte de la industria minera.

Cabe señalar que gran parte de dichos derechos de aprovechamiento formalmente constituidos, no se encuentran en uso, y existen definiciones de orden ambiental (Resolución de Calificación Ambiental (exenta) N° 46, considerando N° 7, del año 2002; en la cual se cita un compromiso ambiental adquirido a través de la Resolución exenta N° 15 de COREMA II Región, del año 1996) que permiten observar y regular la explotación de los recursos de dicho sector.

2 OBJETIVO.

El presente Estudio tiene como objetivo analizar y evaluar el potencial hídrico para los sectores de aprovechamiento común Ojos de San Pedro y Pampa Peineta, estimando la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos.



3 ANTECEDENTES.

Para la elaboración de este informe se consideraron los siguientes antecedentes:

- Informe Técnico DARH N° 153 de agosto de 2003 denominado "*Determinación de los derechos de aprovechamiento de agua subterránea factibles de constituir en los sectores de Calama y Llalqui, cuenca del Río Loa, II Región*". Este estudio señala características del acuífero, tales como, recarga, fuente, delimitación, derechos constituidos y los posibles de constituir como permanentes a la fecha del informe.
- El estudio de la División Ingeniería Hidráulica y Ambiental DICTUC S.A. de septiembre de 2011 denominado "*Estudio para caracterización hidrológica sector norte de Calama*", en este se resume la relación entre las precipitaciones y la escorrentía superficial de la cuenca.
- El "*Ensayo de trazadores: inyección de NaCl, proyecto Pampa Peineta*" del año 2011, elaborado por la Dra. Laura Vitoria, en el cual se caracteriza geoquímicamente las aguas del sector, con el objeto de establecer un contexto hidrológico de comportamiento de las aguas y definir la existencia y velocidad de desplazamiento de flujos subterráneos desde Pampa Peineta hacia sistemas hídricos vecinos.
- El "*Balance Hidrológico Nacional, II Región*", de la Dirección General de Aguas, del año 1986, desde el cual se obtiene la información estadística para el desarrollo del cálculo de precipitación media para la cuenca del río San Pedro de Inacalí que alimenta el acuífero bajo esta.
- "Análisis de disponibilidad de recursos, sector acuífero Pampa Peineta, Región de Antofagasta", de la consultora GeoAguas, del año 2010; el cual entrega antecedentes de la relación entre los acuíferos.
- "Análisis de antecedentes, sector acuífero Pampa Peineta, Región de Antofagasta", de la consultora GeoAguas, del año 2012; el cual aporta descripciones morfo estructurales, fisiográficos y perfiles geológicos e hidrogeológicos del área de estudio.
- La tesis preparada para el Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile de abril del 2011 "*Aplicación de trazadores en la evaluación hidrogeológica en el sistema Pampa Peineta*", estudio desarrollado por Víctor Gálvez O. la cual actualiza los datos generados por GeoAguas Consultores, para el balance hídrico del sector Pampa Peineta, cabecera del sector hidrogeológico en estudio.
- El estudio "*De la Hidrogeología del Alto Loa*", realizado para la Corporación Nacional del Cobre (en adelante CODELCO), División Chuquicamata, elaborado por AGUA Ingenieros Consultores, el año 1987, el cual presenta características geológicas a través de perfiles o cortes que permiten delimitar el sector hidrogeológico Ojos de San Pedro.

El Estudio "*Hoyas Hidrográficas de Chile, Región de Antofagasta*", de la Dirección General de Aguas, del año 1980, elaborado por Hans Niemeyer, el

Dirección General de Aguas - Departamento de Administración de Recursos Hídricos
Morandé 59, Santiago - Teléfono (56-2) 449 3777 - www.dga.cl



cual presenta una reseña de las características geográficas e hídricas de la cuenca que abastece los acuíferos en estudio.

4 CRITERIOS DEL SERVICIO

La Dirección General de Aguas en atención a la administración de los recursos hídricos subterráneos utiliza como criterio para la constitución de derechos de aprovechamiento la recarga media anual para determinar la disponibilidad y por consiguiente los derechos de aprovechamiento definitivos a otorgar.

Una vez otorgado el umbral del valor de la recarga media anual existe la posibilidad de constituir derechos de aprovechamiento provisionales, para esto se utiliza metodológicamente la estructura que presenta un sector hidrogeológico de aprovechamiento común denominado patrón, cuyas características son comparables y en el cual no se han detectado afectación a derechos de terceros ni afectación a la fuente.

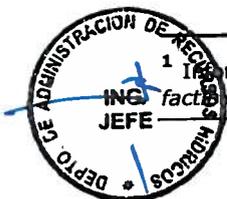
Para los casos en estudio, lo anterior no es posible de aplicar debido a que los sectores de aprovechamiento común que podrían establecerse como sectores "Patrón" - es decir sectores con características asimilables en cuanto a su composición hidrogeológica, régimen hídrico, características morfológicas, ubicación geográfica, interrelación con fuentes superficiales, áreas productivas predominantes, y la relación entre la demanda comprometida y el volumen sustentable - no se encuentran debidamente estudiados como para establecer tal relación.

Para sectores bajo este escenario, el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas, modificado por la Resolución DGA (Exenta) N°2455 de 10 de agosto de 2011, establece que se otorgaran derechos provisionales en un volumen equivalente al volumen sustentable de dicho sector, sujeto al monitoreo de la explotación y seguimiento del comportamiento del acuífero. Este Servicio podrá exigir un Plan de Alerta Temprana (PAT), en aquellos casos donde su evaluación y características particulares justifiquen la conveniencia de establecer un mejor control y seguimiento del estado del acuífero y condición de explotación.

Lo anterior obliga a desarrollar un análisis particular para estos sectores hidrogeológicos, mediante el cual se establezca una aproximación a la recarga de los acuíferos que se entienda como base para determinar la disponibilidad hídrica de los sectores **Pampa Peineta y Ojos de San Pedro** de la cuenca del río San Pedro de Inacaliri, y que permita la resolución de las solicitudes en tramitación.

4.1 Situación actual de derechos subterráneos comprometidos en la cuenca del río San Pedro de Inacaliri

De acuerdo a lo presentado en el Informe Técnico N° 153 de agosto de 2003, "los recursos totales (superficiales y subterráneos) del río San Pedro de Inacaliri se encuentran comprometidos con los derechos ahí constituidos, por lo que no hay caudales de excedencia hacia el río Loa"¹. Para el caso particular de los recursos



¹ Informe Técnico DARH N° 153 "Determinación de los derechos de aprovechamiento de agua subterránea factibles de constituir en los sectores de Calama y Llalqui, cuenca del Río Loa, II Región", 2003.

hídricos subterráneos, estos representan un total de 2.335 l/s otorgados a CODELCO a partir de 1990, en los términos detallados en la Tabla 5 adjunta en anexo 1 del presente informe.

5 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA Y SECTORES ACUÍFEROS

5.1 Localización General

Los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común Ojos San Pedro y Pampa Peineta, se ubican en la cuenca del río San Pedro de Inacaliri, en la Región de Antofagasta, provincia de El Loa, comunas de Calama y Ollagüe, aproximadamente 80 kilómetros al noreste de la ciudad de Calama.

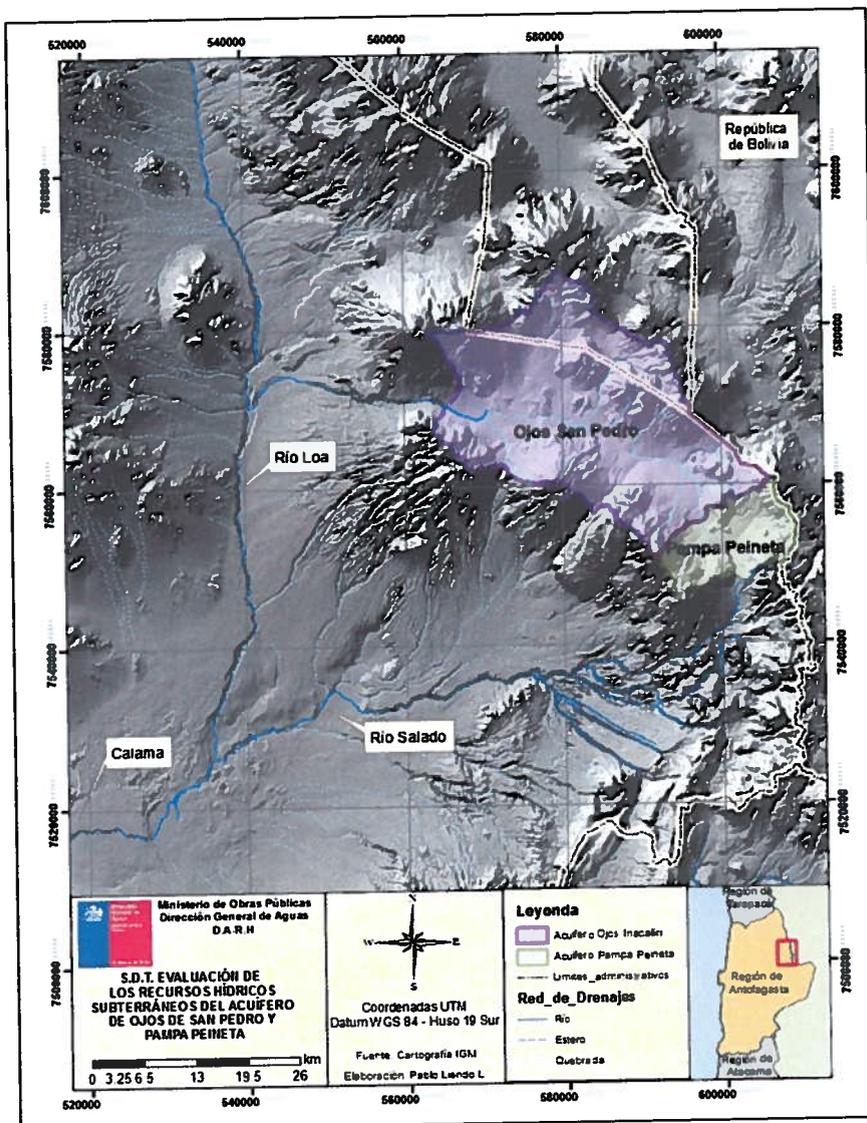


Figura 1. Ubicación general



Como se observa en la Figura 1, existe una relación de cuenca entre los citados sectores, lo cual produce una consecuente relación hidrogeológica. En atención a lo anterior el presente informe caracteriza la geo estructura que permite diferenciar y definir a estos de manera independiente, lo cual sostiene la existencia de los dos sectores, permitiendo la administración y gestión del recurso por separado.

5.2 Descripción morfo estructural regional

La Cordillera de Los Andes de la Región de Antofagasta se caracteriza por presentar un relieve conformado por una serie de terrazas limitadas por cordones montañosos de dirección NS. Estas terrazas corresponden a distintos bloques escalonados, controlados por estructuras originadas por la tectónica compresiva que ha afectado a esta parte del país.

En la zona cordillerana se observan estructuras de graben, caracterizadas por bloques caídos limitados por fallas normales, terrazas de altura, un cordón volcánico altivo y, al oriente, un gran bloque alzado denominado Altiplano.

5.3 Descripción morfológica de la cuenca del río San Pedro de Inacaliri

El marco fisiográfico general descrito es el que domina el relieve del área de estudio, sus estructuras dan lugar a, por lo menos, 4 bloques bien definidos; de oeste a este: depresión del río Loa, valle Ojos de San Pedro-Inacaliri, valles en altura (Pampa Peineta, Pampa Apacheta, Pampa Cachimba, etc.), y una gran planicie en altura, esto se presenta gráficamente como croquis en la Figura 2.

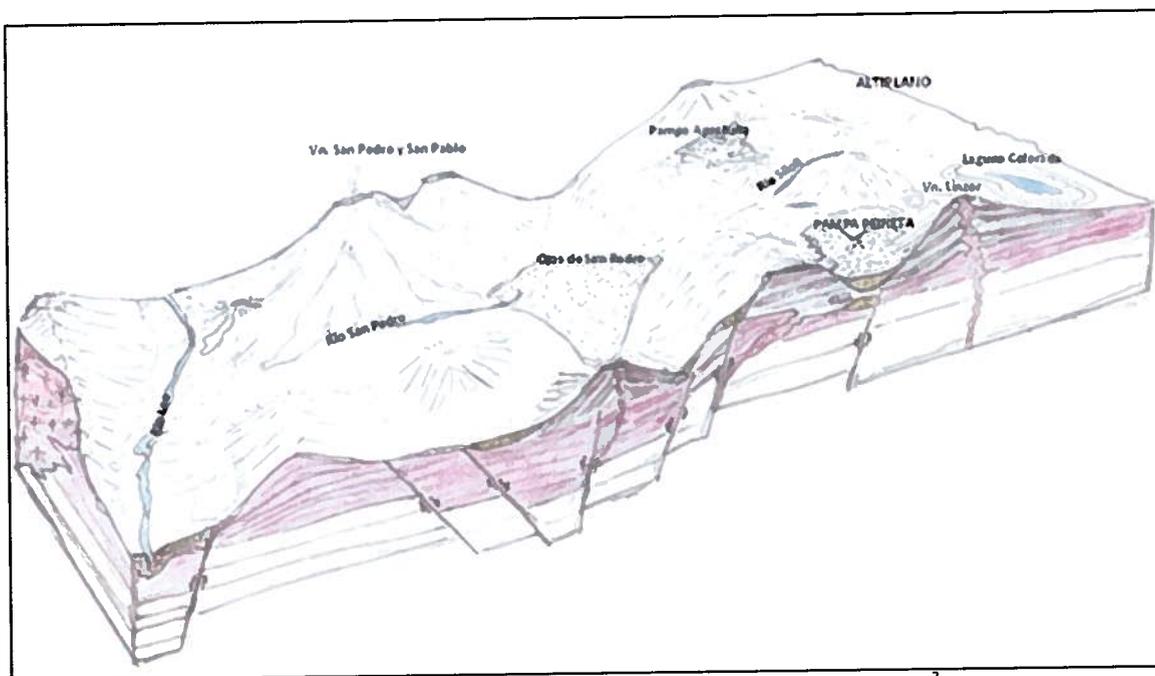


Figura 2. Croquis de tectónica de bloques, Cuenca San Pedro de Inacaliri²



Análisis de antecedentes, sector acuífero Pampa Peineta, Región de Antofagasta, 2012

Dirección General de Aguas - Departamento de Administración de Recursos Hídricos
Morandé 59, Santiago - Teléfono (56-2) 449 3777 - www.dga.cl

La cuenca del río San Pedro de Inacalíri se desarrolla principalmente en dirección Este-Oeste (salvo en Pampa Peineta, sector de la cabecera de la cuenca, donde la orientación es Sureste-Noroeste), con una longitud aproximada de 48 km y un ancho aproximado de 15 km; a su vez se ubica entre los 3.750 y 4.750 m.s.n.m., comprende un área de 897,11 Km², su pendiente media es de 6%.

El río San Pedro de Inacalíri nace en la alta cordillera andina, más precisamente en la Aguada de Inacalíri, ubicada en la falda oriente del Cerro León. En el inicio de su recorrido hacia el norponiente recibe por su ribera derecha afluentes pequeños desde el cordón fronterizo, su afluente principal es el río Siloli que lo tributa desde el oriente, luego aguas abajo a corta distancia se le reúne el río Cajón. A estas aguas conjuntas se une la quebrada de Cabana para formar el río Inacalíri propiamente como tal. Luego lo tributa la aguada Colana, desde su ribera derecha³.

En su curso medio infiltra sus aguas en las llamadas "Vegas de Inacalíri", presentando su cauce seco por más de 15 km valle abajo, hasta llegar a la formación conocida como "Ojos de San Pedro", en esta formación se produce surgencia de aguas subterráneas, lo que permite el abastecimiento del curso del río San Pedro de Inacaliri.

Los Ojos del Inacaliri se ubican en el extremo nororiente de un salar de 5 km² de superficie. Las aguas se esparcen a corta distancia desde su nacimiento formando una laguna de 1 km² de extensión para luego concentrarse y reconstituir el río San Pedro. Desde este punto el río recorre aproximadamente 17 km en dirección poniente, hasta presentar su cauce seco en la falda de los volcanes San Pedro y San Pablo.

Como ya se describió, el sector Pampa Peineta, se ubica en la parte alta y cabecera de la cuenca del mismo río, a una altitud promedio de 4.200 m.s.n.m., este no presenta escurrimientos superficiales permanentes, pero si un escurrimiento subterráneo evidenciado por vertientes, que se alimentan de un acuífero de composición fisurada y porosa, producto del ambiente volcánico en el cual se emplaza.

5.4 Régimen general de precipitaciones

La cuenca recibe una pluviometría anual de entre 75 y 250 mm⁴, incrementando su valor desde los puntos de menor a mayor altitud topográfica. En este contexto la infiltración de dicha precipitación a los acuíferos es la principal fuente de recarga del recurso hídrico para el sector, las cuales emergen a la superficie y desembocan al río San Pedro de Inacalíri. Entre los aportes más significativos al valle se encuentra el área de la cabecera, en la cual se presenta un clima de estepa en altura. A nivel regional este clima abarca la zona sobre los 3.000 m.s.n.m., esta altitud hace que las temperaturas sean muy frías, lo que provoca que muchas de las precipitaciones sean de nieve.



"Cuentas Hidrográficas de Chile, Región de Antofagasta", 1980

"Balance Hidrológico Nacional, II Región, 1986.

Dirección General de Aguas - Departamento de Administración de Recursos Hídricos
Morandé 59, Santiago - Teléfono (56-2) 449 3777 - www.dga.cl

5.5 Caracterización geológica

En general la cuenca de San Pedro de Inacaliri, esta geológicamente constituida por materiales volcánicos (ignimbritas, coladas y tobas) de edad Miocena a Pleistoceno, con rellenos sedimentarios generalmente fluviales y aluviales, de edad Cuaternaria⁵.

En su curso superior, la cuenca del río San Pedro de Inacaliri, presenta relación con la conocida formación Toconce, la cual corresponde a una secuencia constituida por ignimbritas y sedimentos clásticos, disponiéndose concordantemente o discordantemente sobre la ignimbrita Sifón.

En la parte superior de la cuenca se presentan formaciones de toba de cristales, en la parte media conglomerados, areniscas y limolitas, y la parte inferior tobas soldadas de color gris a rosado. Las Ignimbritas corresponden a rocas de origen volcánico que se disponen en forma sub-horizontal, siguiendo la topografía del terreno y se originan por flujos piroclásticos producidos durante algún evento volcánico, las cuales pueden constituir diferentes unidades de enfriamiento, por esta razón se presentan frecuentemente en forma de intercalada entre las unidades antes descritas.

5.6 Discontinuidad hidrogeológica en la cuenca río San Pedro de Inacaliri

En la cuenca de San Pedro de Inacaliri es posible distinguir dos sectores de aprovechamiento común, los cuales presentan condiciones hidrogeológicas diferentes.

La información geológica e hidrogeológica disponible en la zona permite definir una clara falta de continuidad hidrogeológica entre la parte alta y media de la cuenca, observando 2 sectores bien definidos, identificados como Ojos de San Pedro y Pampa Peineta. Estos sectores presentan notorias diferencias topográficas, geológicas e hidrogeológicas, las cuales se describen a continuación:

- a. Aspectos Topográficos. Los sectores de Ojos de San Pedro y Pampa Peineta corresponden a dos valles relativamente planos con una diferencia de cota entre ellos de aproximadamente 400 m., encontrándose el primero a una altura promedio de 3.830 m.s.n.m., mientras que el segundo a una altura promedio de 4.220 m.s.n.m.
- b. Aspectos Geológicos. El sector alto de la cuenca, representado por Pampa Peineta, presenta una importante cobertura aluvial, continua, bajo la cual se disponen estratos de lavas y tobas, con intercalaciones de niveles sedimentarios. Por otro lado, el sector de Ojos de San Pedro, se caracteriza por una delgada y discontinua cobertura aluvial, dispuesta sobre una importante secuencia de lavas y un basamento ignimbrítico.
- c. Aspectos Hidrogeológicos. Los acuíferos explorados en Pampa Peineta y San Pedro-Inacaliri se disponen en distintos materiales. Pampa Peineta presenta un acuífero en medios fisurados y porosos, conformado por lavas, tobas y sedimentos, mientras que en Ojos de San Pedro el acuífero principal, se reconoce en un medio fisurado,



Carta Geológica de Chile, 1:250.000, Hoja de Calama, 1984.

Dirección General de Aguas - Departamento de Administración de Recursos Hídricos
Morandé 59, Santiago - Teléfono (56-2) 449 3777 - www.dga.cl

conformado por lavas andesíticas. Las cotas de niveles estáticos medidos en ambos sectores presentan una diferencia de 375 m., reconociendo el techo del nivel saturado, en Pampa Peineta, a cotas entre 4.125 y 4.175 m.s.n.m., mientras que en Ojos de San Pedro las cotas de los niveles estáticos se encuentran entre 3.750 y 3800 m.s.n.m. Finalmente, las gradiente hidráulicas en estos sectores son distintas, registrando valores de 0,009 en Pampa Peineta y 0,001 en San Pedro-Inacaliri.





Figura 3. Perfil de gradientes hidráulicas⁶



6° ANOS HIDRICOS
 DIRECCION GENERAL DE AGUAS - DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACION DE RECURSOS HIDRICOS
 MORANDE 59, SANTIAGO - TELEFONO (56-2) 449 3777 - WWW.DGA.CI

Al observar en el perfil las gradientes hidráulicas y las cotas de los niveles estáticos, destaca el brusco descenso de la superficie equipotencial entre la parte alta y baja de la cuenca, fenómeno que se encuentra asociado a fallas y/o una zona de menor permeabilidad entre los sectores acuíferos.

Para conocer cuál es la relación hidráulica que existe entre los sectores acuíferos, un antecedente importante es la velocidad del flujo a través de los materiales saturados. La velocidad con la que se mueve el agua subterránea en el acuífero es un importante dato que permite dimensionar los efectos que pudiera ocasionar una perturbación entre algún punto de éste y los sectores cercanos.

A través del estudio "Análisis de antecedentes, sector acuífero Pampa Peineta, Región de Antofagasta", presentado por GeoAguas, se presenta que una forma de estimar esta velocidad es a través de la permeabilidad del medio (K) y la gradiente hidráulica del acuífero (i). En este caso, en el sector de Pampa Peineta se han realizado una serie de pruebas de bombeo las cuales han arrojado como resultado una permeabilidad promedio para el acuífero de 15 m/día, por otro lado los niveles medidos en estos pozos permiten calcular una gradiente hidráulica de 0.009.

Utilizando la solución de Darcy:

$$V = -K \cdot i$$

El valor es negativo, puesto que la dirección del flujo es según la cota piezométrica decreciente

Donde,
i: Gradiente hidráulico,
K: Permeabilidad, y
V: Velocidad de flujo en el acuífero.

Con esto y los valores de Pampa Peineta se obtiene una velocidad de 0.135 m/día.

De acuerdo a esto, una gota de agua en el acuífero se tardaría, aproximadamente, 203 años en recorrer 10 Km, distancia que existe entre Pampa Peineta y la captación más cercana, con derechos otorgados a en el sector de Ojos de San Pedro⁷.

El perfil de gradiente hidráulica (Figura 3), presenta un quiebre del acuífero ubicado entre Pampa Peineta y Ojos de San Pedro; lo anterior se reafirma con lo concluido en la investigación "Ensayo de trazadores: inyección de NaCl, proyecto Pampa Peineta" del año 2011, elaborado por la Dra. Laura Vitoria, en la cual por medio del método de trazadores⁸ se logró determinar el tiempo necesario para que una gota de agua se desplace en el subsuelo desde el sector Pampa Peineta hasta Ojos de San Pedro .

Dicha investigación concluye que dadas las características de los sondajes (profundidad cribas y distancia entre pozos y piezómetros) el método de ensayo de trazadores por dilución puntual es el más adecuado, a su vez los resultados obtenidos son coherentes



⁷ "Análisis de antecedentes, sector acuífero Pampa Peineta, Región de Antofagasta", 2012
⁸ "Ensayo de trazadores: inyección de NaCl, proyecto Pampa Peineta", 2011.

Dirección General de Aguas - Departamento de Administración de Recursos Hídricos
Morandé 59, Santiago - Teléfono (56-2) 449 3777 - www.dga.cl

con los valores de conductividad hidráulica medidos en el acuífero a través de pruebas de bombeo y gradientes hidráulicos existentes en el área.

Finalmente, mediante dicho método, se obtuvo una velocidad estimada promedio de 0,077 m/día, mientras que se obtienen gradientes hidráulicos entre 0,003 y 0,02 (Ley de Darcy). Mediante estos valores se tiene que, con esta velocidad, 10 Km se recorren en 355 años (en rango que oscila entre 250 y 470 años).

En consecuencia, al igual que con el estudio anteriormente señalado, se desestima afectación - en escala humana de tiempo - al acuífero Ojos del San Pedro, por la posible constitución de derechos en Pampa Peineta, lo que reafirma la existencia de dos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común distintos en la cuenca del río San Pedro de Inacaliri.

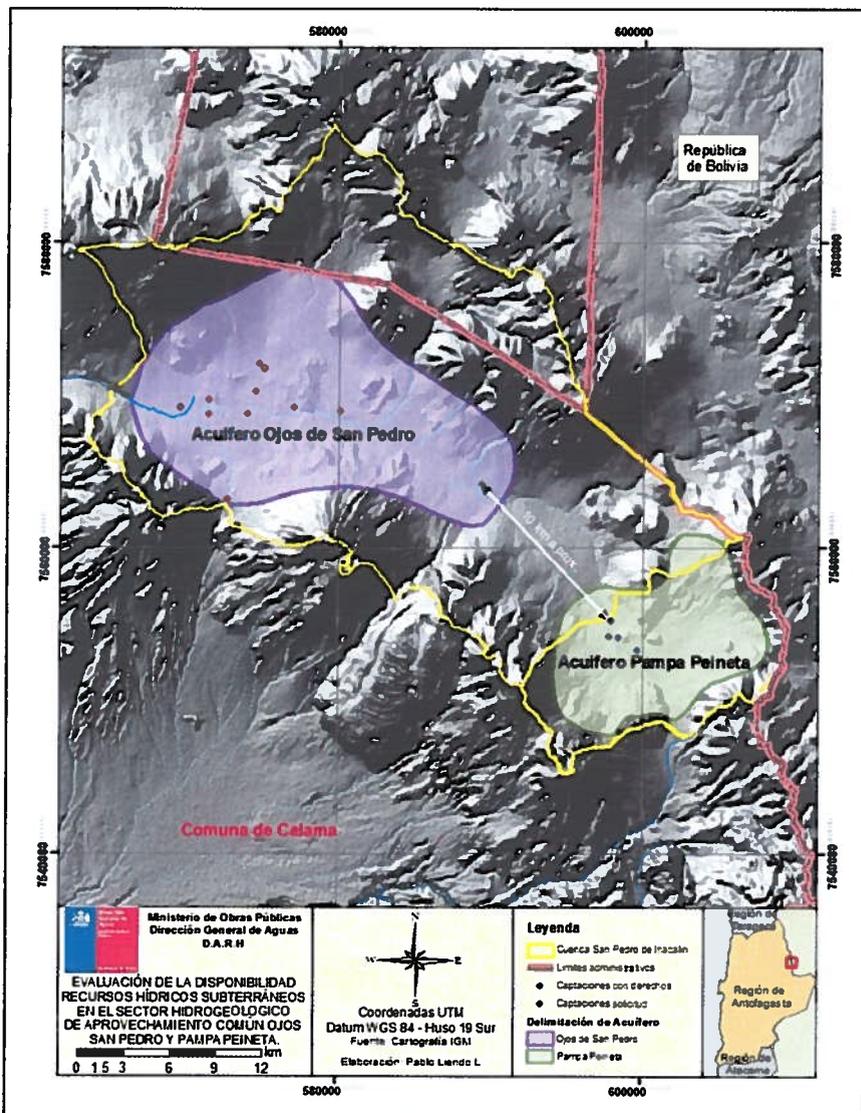


Figura 4. Acuíferos en la cuenca.



5.7 Grado de relación entre los acuíferos de la cuenca del río San Pedro de Inacaliri.

Sin perjuicio de lo anterior, como ya se ha señalado, el sector Pampa Peineta se ubica al Este de la cuenca del río San Pedro de Inacaliri, con altitudes superiores a 4.200 m.s.n.m., por lo tanto recibe importantes aportes de precipitación, que junto con flujos subterráneos laterales, aportan a la recarga general. Lo anterior se confirma con el análisis hidroquímico de las aguas. Las áreas de mayor altitud topográfica (Pampa León, Pampa Perdiz y Pampa Peinetas) "presentan composiciones químicas relativamente homogéneas, como ejemplo se presenta el estroncio, que presenta concentraciones bajas (inferiores a 1 o 2 mg/L) en dichos sectores, así como en Río San Pedro de Inacaliri"⁹.

En Pampa Peineta se presentan aguas, en general, poco mineralizadas con composiciones entre sulfatadas y cloruradas sódicas. Estas aguas y las aguas del área del Siloli se mezclan, y fluyen en dirección ONO, aumentando la mineralización de las aguas hacia el área de San Pedro de Inacaliri

El análisis de las alturas de recarga y de la distribución espacial de las composiciones químicas ha permitido establecer un contexto hidrogeoquímico que explica la presencia de flujos subterráneos entre los distintos sectores y cuencas estudiadas

De acuerdo a estudios realizados en el área y a través del análisis de perfiles TEM, se logra determinar la presencia de una secuencia saturada conformada por lavas fracturadas y niveles sedimentarios, con potenciales hidráulicos que definen flujos desde Pampa Peineta hacia el norte y occidente.

En este acuífero se observa que en ciertas secciones geoelectricas se reconocen una unidad con valores de resistividad entre 30 y 70 ohm-m, concordante con rocas fracturadas y/o sedimentos, saturados con agua salobre¹⁰. El resultado de los perfiles señalados se presenta en la Figura 5.

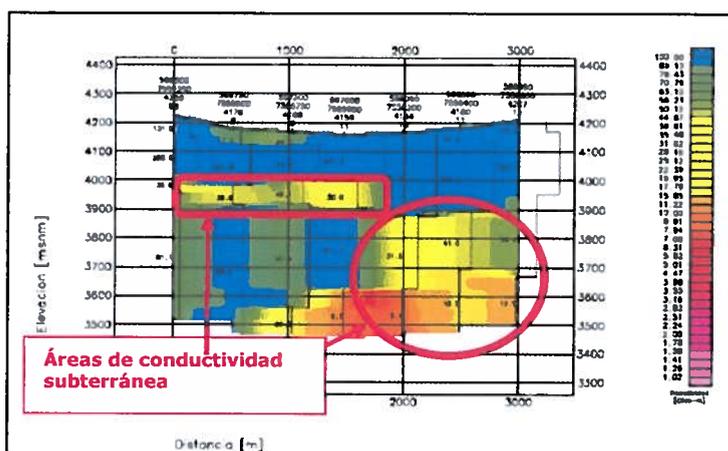


Figura 5. Perfil TEM en sección de salida desde Pampa Peineta a valle de San Pedro de Inacaliri.

10 "Análisis de disponibilidad de recursos, sector acuífero Pampa Peineta", 2010.

10 "Aplicación de trazadores en la evaluación hidrogeológica en el sistema Pampa Peineta", 2011.

Dirección General de Aguas - Departamento de Administración de Recursos Hídricos
Morandé 59, Santiago - Teléfono (56-2) 449 3777 - www.dga.cl

La Figura 6 presenta en planta la ubicación de las captaciones de muestreo que permitieron el desarrollo del perfil TEM, presentado como Figura 5.

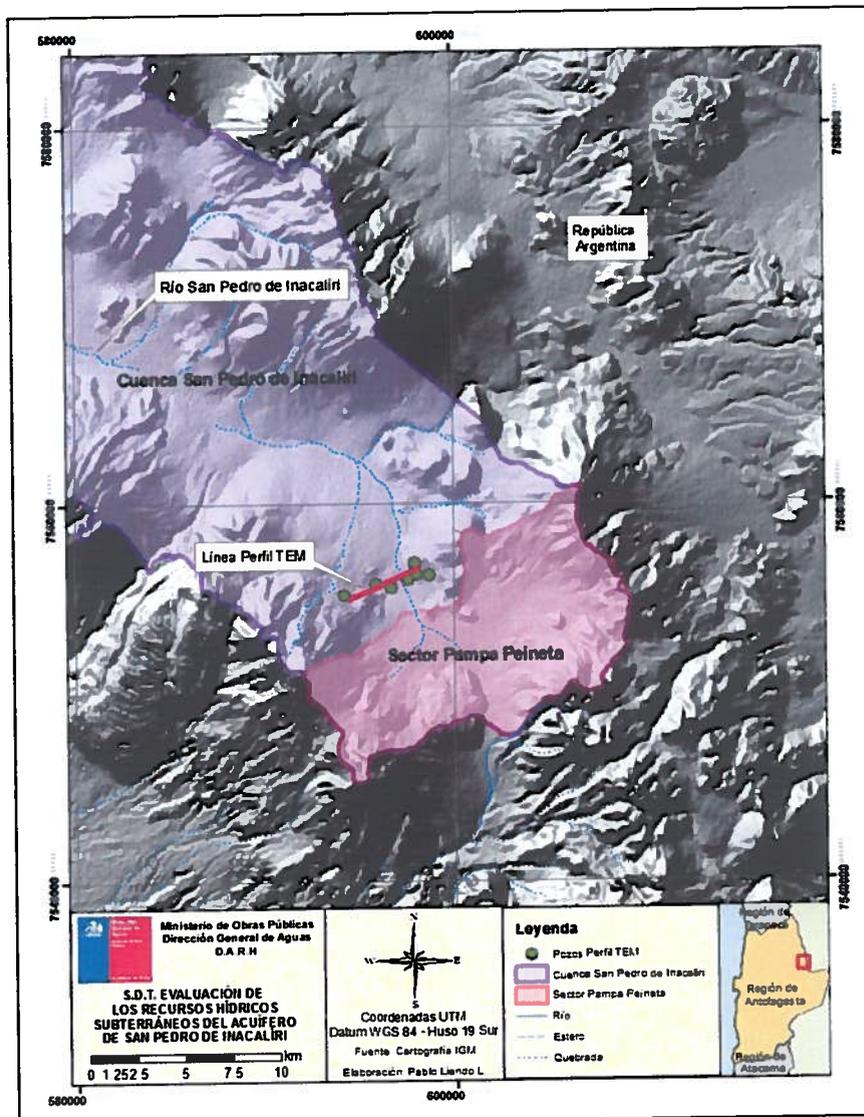


Figura 6. Ubicación de los pozos de muestreo de perfil TEM

De acuerdo a lo anterior, se verifica una distante relación entre ambos sectores acuíferos, sin embargo, cabe establecer medidas concretas que permitan observar la respuesta de la explotación que se pretende desarrollar en el Sector de Pampa Peineta tendiente a evitar la eventual afectación de derechos constituidos a terceros en el sector Ojos de San Pedro, considerando un Plan de Alerta Temprana, ajustado a los criterios del Servicio y el marco regulatorio que establece el Código de Aguas.



6 ANÁLISIS

6.1 Delimitación de la cuenca aportante a los sectores acuíferos

Los sectores acuíferos de Ojos de San Pedro y Pampa Peineta se encuentran insertos en la cuenca del río San Pedro de Inacaliri (en la Figura 6 se presenta la delimitación general de dicha cuenca), esta tiene como principales hitos los cerros Toconce, del León, Paniri, Lagunita, Cupo, Carnaval y Redondo por su costado sur – separándola con la cuenca del río Salado; mientras que por su costado norte se encuentran los volcanes de Linzor y Apagado en el sector de la cabecera, luego los cerros de Inacaliri, Aguilucho, del Azufre y Colorado, cerrando con los volcanes San Pedro y San Pablo, al oeste del sector en estudio. En la cabecera de la cuenca se presenta el cerro Peineta - formación volcánica compuesta por andesitas y escorias – que constituye la línea divisoria de aguas entre las cuencas del río San Pedro de Inacaliri y del río Toconce.

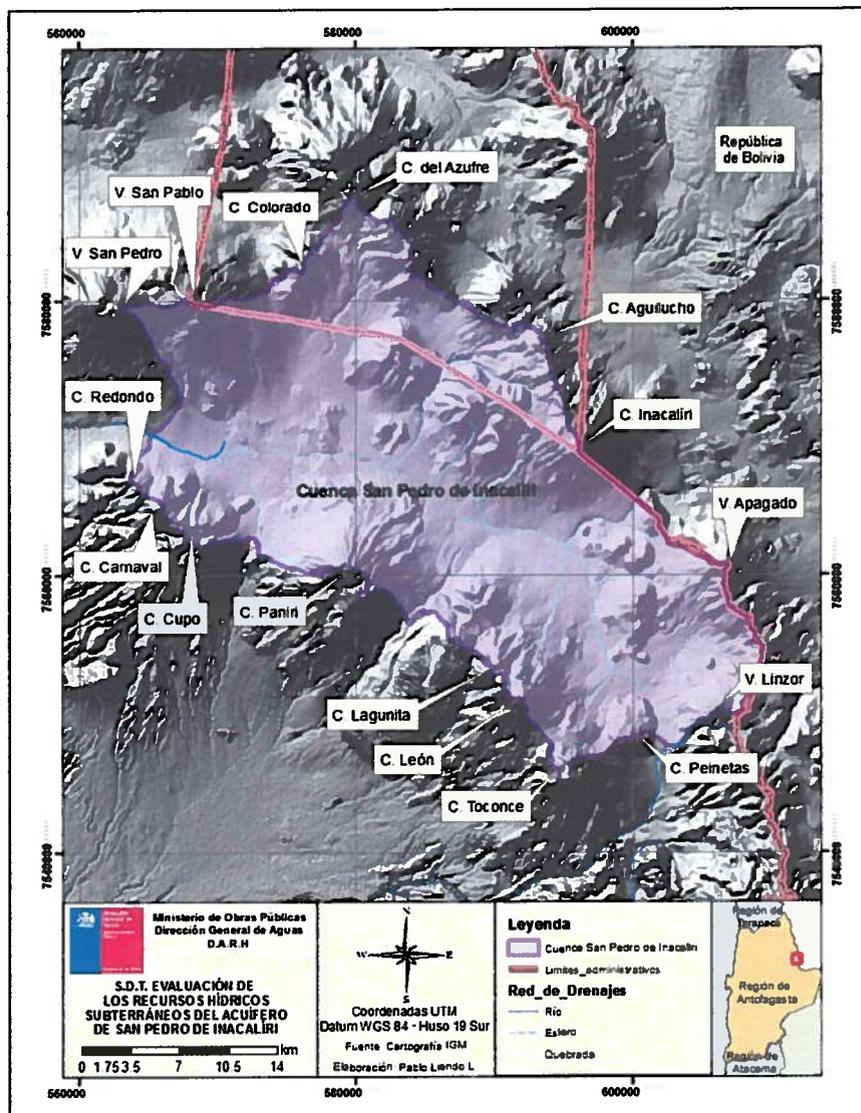


Figura 7. Hitos morfológicos de la cuenca aportante



De acuerdo a los antecedentes consultados, la cuenca aportante se cierra al oeste en un punto del valle del río San Pedro entre el Cerro Redondo por el sur y el volcán San Pablo por el norte; lo anterior se sustenta en lo presentado por Agua Ingenieros Consultores¹¹, los cuales señalan que "existe desde el punto de vista geológico, una barrera hidrogeológica en el sector aguas arriba del pozo CHU-5, la cual está constituida por ignimbritas y rocas antiguas", lo anterior permite delimitar el sector hidrogeológico hacia el oeste. Esta barrera natural "se interpone al escurrimiento de aguas superficiales y subterráneas" lo cual ha provocado la acumulación de material sedimentario en el valle y la formación de una laguna, en la que se acumulan depósitos lagunales-fluviales, los que se encuentran en el sector de "Ojos de Inacaliri".

6.2. Estimación de la recarga por la precipitación media de la cuenca

Una vez determinado lo anterior se hace necesaria una evaluación de la potencial recarga que existe en ambos sectores hidrogeológicos, para ello no se consideró la potencial recarga producto de flujos subterráneos desde sectores vecinos a la cuenca debido a la falta de información validada al respecto, por lo que se remitió exclusivamente a establecer la recarga por precipitación para el desarrollo del presente análisis.

En función de lo anterior se utilizó el método de *Isoyetas*, el cual permite representar las precipitaciones medias, considerando las estaciones pluviométricas (ya que tales isoyetas son construidas sobre la base de los datos entregados por estas estaciones) y los distintos pisos altitudinales presentes en el área de estudio (debido a que la distribución espacial de las isoyetas guarda estrecha relación con las cotas sobre el espacio que describen).

La metodología señalada se representa a través de la siguiente función:

$$P_t = \frac{1}{A_t} (A_0 * P_1 + A_1 * (P_1 + P_2)/2 + A_2 * (P_2 + P_3)/2 + \dots (A_n * P_n))$$

Donde:

Pt: Precipitación media total.

At: Área Total de la cuenca.

Px: Precipitación o Isoyeta.

Ax: Área de cada piso entre isoyeta.

Es así, como a través del programa *Arcgis 10*, se obtuvieron las áreas entre isoyetas y la precipitación media por sub área, para cada uno de los sectores definidos.

6.2.1 Sector acuífero Ojos de San Pedro

El sector hidrogeológico Ojos de San Pedro, presenta una cuenca aportante de 750,47 km², la cual tiene una distribución de precipitaciones heterogénea, característica típica de la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, es decir a mayor altitud, mayor también es la precipitación promedio. La relación se representa en la Tabla 1 y la Figura 8, presentadas a continuación.



"De la Hidrogeología del Alto Loa", 1987.

Dirección General de Aguas - Departamento de Administración de Recursos Hídricos
Morandé 59, Santiago - Teléfono (56-2) 449 3777 - www.dga.cl

Isoyeta Referencia (mm)	Área (km ²)	Precipitación Total (m ³ /año)
75	159,04	11.927.700
125	308,50	38.562.625
175	130,19	22.783.547
200	70,68	14.136.060
225	56,43	12.697.200
250	25,63	6.407.842
Totales	750,47	106.514.975

Tabla 1. Áreas bajo influencia de Isoyetas (mm) para cuenca aportante Ojos de San Pedro

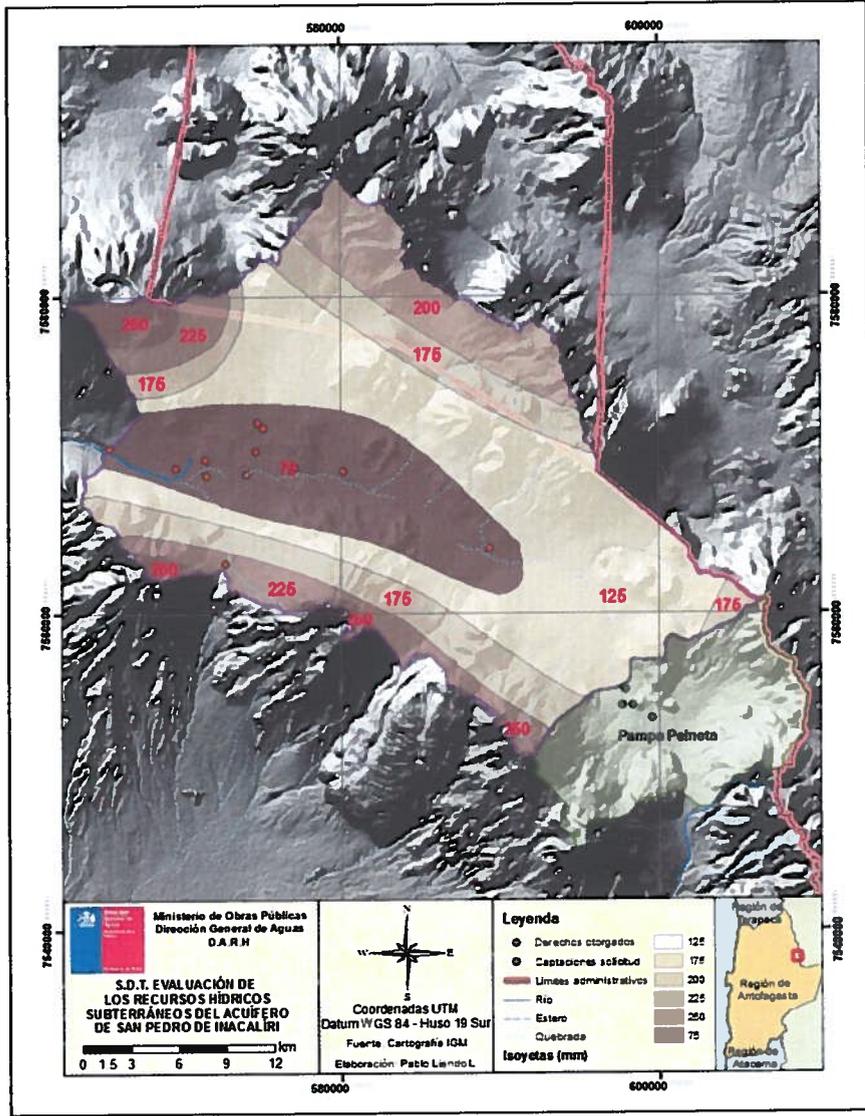


Figura 8. Área de influencia de Isoyetas (mm) en la Cuenca aportante Ojos San Pedro.

Con los valores señalados en la Tabla 1, es posible establecer la relación:

$$Pp \text{ media (mm)} = Pp \text{ media total (mm)} / \text{Área total (km}^2\text{)}$$



Obteniendo como resultado una precipitación media anual de **141,9 mm**. Una vez definido este valor se presenta la tabla 2, la cual presenta de los valores de recarga media del acuífero de acuerdo a los criterios del Servicio.

Precipitación Media Anual (mm)	Volumen Medio Anual (m ³ /año)	Precipitación Media Anual (l/s)	Recarga media anual (l/s) con Coeficiente de Infiltración 10% (*)
141,9	106.514.975	3.377,57	337,76

(*) Criterio conservador ampliamente usado por el Servicio
 Tabla 2. Valores de recarga media del sector hidrogeológico y disponibilidad

De acuerdo a lo anterior el volumen de la recarga, y por tanto volumen sustentable a extraer, en el sector acuífero Ojos de San Pedro es de 337,76 l/s

6.2.2 Sector acuífero Pampa Peineta

El sector hidrogeológico Pampa Peineta, presenta una cuenca aportante de 143,3 km², la cual al presentar una cota promedio alta cuenta con precipitaciones mayores al resto de la cuenca. La relación se representa en la Tabla 3 y la Figura 9, presentadas a continuación.

Isoyeta Referencia (mm)	Área (km ²)	Precipitación Total (m ³ /año)
125	8,2	1.025.000
175	72,2	12.635.000
225	48,7	10.957.500
250	14,2	3.550.000
Totales	143,3	28.167.500

Tabla 3. Áreas bajo influencia de Isoyetas para cuenca aportante Pampa Peineta



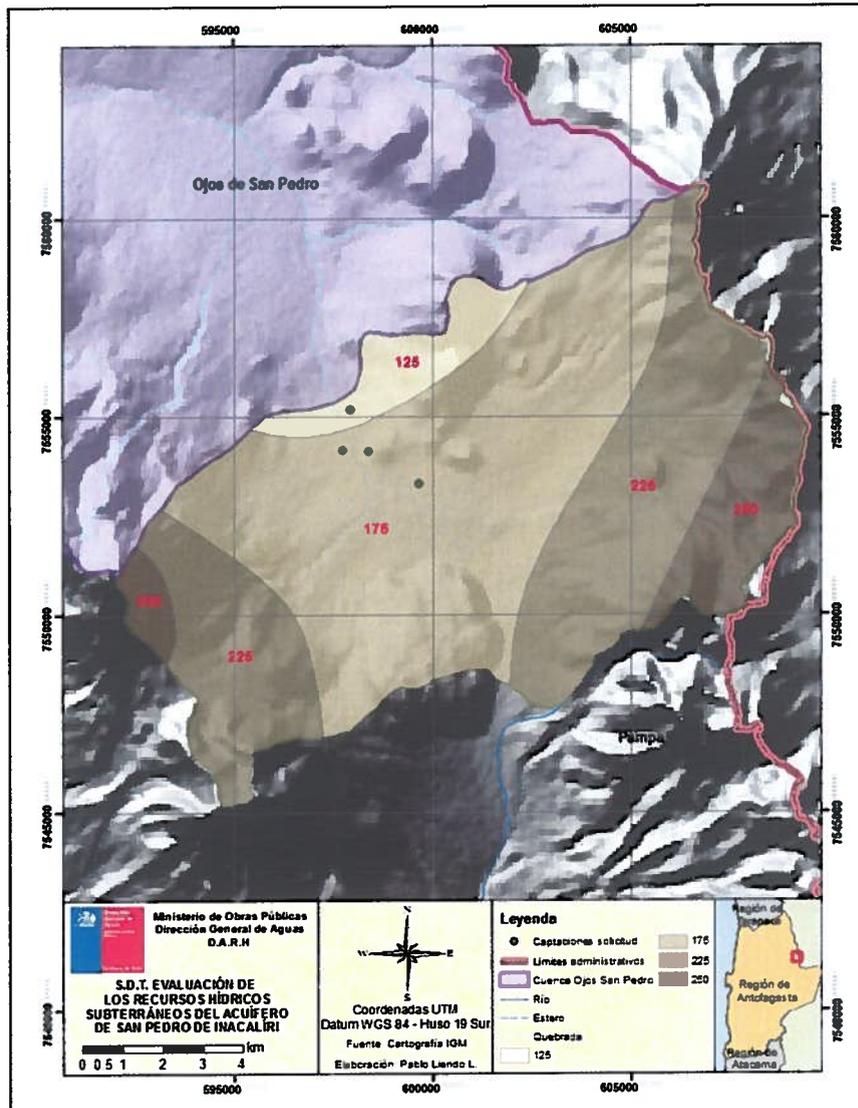


Figura 9. Área de influencia de Isoyetas (mm) en la Cuenca aportante Pampa Peineta.

Con los valores señalados en la Tabla 3, es posible establecer la relación:

$$Pp \text{ media (mm)} = Pp \text{ media total (mm)} / \text{Área total (km}^2\text{)}$$

Obteniendo como resultado una precipitación media anual de **196,6 mm**. Una vez definido este valor se presenta la tabla 2, la cual presenta de los valores de recarga media del acuífero de acuerdo a los criterios del Servicio.



Precipitación Media Anual (mm)	Volumen Medio Anual (m ³ /año)	Precipitación Media Anual (l/s)	Recarga media anual (l/s) con Coeficiente de Infiltración 10% (*)
196,6	28.167.500	893,2	89,3

(*) Criterio conservador ampliamente usado por el Servicio
 Tabla 4. Valores de recarga media del sector hidrogeológico y disponibilidad

De acuerdo a lo anterior el volumen de la recarga, y por tanto volumen sustentable a extraer, en el sector acuífero Pampa Peineta es de 89,3 l/s

6.3 Balance de aguas subterráneas en el área de estudio.

De acuerdo a lo determinado en el punto 6.2, se puede señalar lo siguiente:

- Para el caso del sector hidrogeológico de aprovechamiento común **Ojos de San Pedro**, si se comparan los volúmenes de la Tabla 2 con el total de derechos a la fecha constituidos (reseñados en el Anexo 1), es evidente que este presenta derechos de aprovechamiento otorgados por sobre lo señalado como volumen de la recarga media anual (Relación Recarga media anual (l/s) y Coeficiente de Infiltración 10%), así también como por sobre el caudal considerado por este Servicio para el otorgamiento de derechos provisionales en áreas sin sector patrón, en consecuencia no existe disponibilidad para el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento, aún en carácter de provisionales
- Para el caso del sector hidrogeológico de aprovechamiento común **Pampa Peineta**, al no existir a la fecha derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas constituidos en la zona, se presenta una disponibilidad para el otorgamiento de derechos del orden de magnitud expresado en la Tabla 4. Una vez otorgado el caudal señalado correspondería analizar la pertinencia de declarar el sector hidrogeológico de aprovechamiento común como área de restricción para efectos de nuevas explotaciones, con posibilidad de otorgamiento de derechos provisionales si concurren las condiciones.
- Considerando que el acuífero en cuestión presenta características particulares que no permiten establecer otro sector como patrón o referencia, y de acuerdo a lo establecido en el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas, modificado por la Resolución DGA (Exenta) N°2.455 de 10 de agosto de 2011, se propone lo siguiente:
- La compleja situación de disponibilidad hídrica subterránea que presenta el sector hidrogeológico de aprovechamiento común Ojos de San Pedro hace necesario que, teniendo en consideración la relación hidrogeológica distante que existe con el acuífero de Pampa Peineta, este Servicio requiera - ante la posible constitución de tanto derechos definitivos como provisionales - la implementación de un Plan de Alerta Temprana (PAT), con las obligaciones implícitas que esta herramienta de control propone (realizar monitoreos efectivos y sistemáticos del acuífero bajo análisis).



7 CONCLUSIONES.

- Los sectores hidrogeológico de aprovechamiento común Ojos de San Pedro y Pampa Peineta no presentan acuíferos cercanos estudiados de características semejantes, que sirvan de base para el desarrollo de la metodología denominada de sector "Patrón", metodología que se establece en el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas, modificado por la Resolución DGA (Exenta) N°2455 de 10 de agosto de 2011.
- Analizando nuevos antecedentes referentes a la geología, hidrogeología y geomorfología, la cuenca aportante "río San Pedro de Inacaliri" queda delimitado según se muestra en Mapa N° 1 (en anexos).
- De acuerdo al método de *Isoyetas*, utilizado para estimar los valores de recarga para el sector hidrogeológico de aprovechamiento común **Ojos de San Pedro**, se alcanza una precipitación media anual de 141,9 mm, lo que representa un volumen anual de 106.514.975 m³/año. En consecuencia se alcanza una recarga neta al acuífero por un volumen sustentable de 337,76 l/s.
- Del balance actualizado entre disponibilidad sustentable y los derechos constituidos, representado entre la oferta y demanda, se establece que la segunda supera en poco menos de siete veces el volumen de recursos hídricos subterráneos sustentable obtenido en el presente informe, en el sector hidrogeológico de aprovechamiento común Ojos de San Pedro.
- De acuerdo al método de *Isoyetas*, utilizado para estimar los valores de recarga para el sector hidrogeológico de aprovechamiento común **Pampa Peineta**, se alcanza una precipitación media anual de 196,6 mm, lo que representa un volumen anual de 28.167.500 m³/año. En consecuencia se alcanza una recarga neta al acuífero por un volumen sustentable de 89,3 l/s.
- Al no existir demanda actual de derechos constituidos en el sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pampa Peineta, se propone que la oferta de disponibilidad de agua subterránea - susceptible a constitución de derechos de aprovechamiento - sea en orden a la magnitud señalada en el párrafo anterior; sujetos a la formulación e implementación de un Plan de Alerta Temprana.



Anexos

Anexo 1.

Tabla 5. Demanda de aguas subterráneas en acuífero Ojos de San Pedro.

Expediente	Peticionario	Caudal Máx. Sol (l/s)	UTM Norte	UTM Este	Datum	Res. DGA N°	Fecha Resolución	Volumen Total Acumulado (l/s)
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	233	7568937	580164	PSAD 56	40	1 de diciembre 1990	233
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	58	7564078	589391	PSAD 56	40	1 de diciembre 1990	291
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	7	7570448	565523	PSAD 56	40	1 de diciembre 1990	298
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	50	7563157	572767	PSAD 56	40	1 de diciembre 1990	348
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	90	7569175	569693	PSAD 56	40	1 de diciembre 1990	438
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	220	7569216	577122	PSAD 56	40	1 de diciembre 1990	658
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	220	7571998	574819	PSAD 56	40	1 de diciembre 1990	878
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	200	7571692	575157	PSAD 56	40	1 de diciembre 1990	1078
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	200	7569187	569683	PSAD 56	40	1 de diciembre 1990	1278
ND-0202-215	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	572	Sistema de Drenes			40	1 de diciembre 1990	1850
ND-0202-466	CORPORACION NACIONAL DEL COBRE DE CHILE-DIVISION CHUQUICAMATA	60	7568759	574098	PSAD 56	617	30 de diciembre de 1992	1910
ND-0202-466	CORPORACION NACIONAL DEL COBRE DE CHILE-DIVISION CHUQUICAMATA	135	7571703	575185	PSAD 56	617	30 de diciembre de 1992	2045
ND-0202-466	CORPORACION NACIONAL DEL COBRE DE CHILE-DIVISION CHUQUICAMATA	100	7570239	574665	PSAD 56	617	30 de diciembre de 1992	2145
ND-0202-692	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	150	7569678	571544	PSAD 56	34	13 de enero 1994	2295
ND-0202-723	CODELCO CHILE DIVISION CODELCO NORTE	40	7568679	571553	PSAD 56	50	15 de febrero 1993	2335



Anexo 2.

Figura 6. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común.

