



**DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**  
**Arica y Parinacota, XV Región**

**DIAGNÓSTICO DE DISPONIBILIDAD HÍDRICA**  
**EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA,**  
**REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA**

**S.I.T. N° 365**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR:**  
**MATRAZ CONSULTORES ASOCIADOS S.A.**

**Arica, Agosto 2015**



## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas  
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Director Regional de Aguas  
Ingeniero Civil Agrícola Sr. Héctor Flores Moraga

Inspector Fiscal  
Ingeniero Civil Agrícola Sr. Héctor Flores Moraga

### MATRAZ CONSULTORES

#### Jefe de Proyecto

Mcs. Hidrogeólogo Nicolás Iturra Jáuregui

#### Equipo de Profesionales:

Especialista Hidrogeólogo Enrique Vázquez-Suñé

Hidrogeóloga Sonia Valdivielso Mijangos

Hidrogeóloga Junior Ainhoa Goyeneche Aramburu

Hidrogeólogo Junior Christian Montoro Paredes

Especialista SIG Lorena Navarro López

Apoyo de Terreno Guillermo Serra Creixell

Antropóloga Camila Paz Bustos Zúñiga



## **RESUMEN EJECUTIVO**

Este estudio hidrogeológico de la cuenca del río Lauca nace del interés de la Dirección General de Aguas (DGA) en conocer el funcionamiento del recurso hídrico en este sector y de este modo, establecer planes de gestión apropiados que garanticen su perdurabilidad y máxima compatibilidad con presentes y futuras demandas.

La zona de estudio se ubica en la parte más septentrional del país: limita al norte con Perú, al sur con la región de Tarapacá, al este con Bolivia y al oeste con el Océano Pacífico. La superficie de la cuenca del río Lauca en territorio chileno es de 2.350 km<sup>2</sup> corresponde con el curso alto del río. Los cursos medio e inferior pertenecen al altiplano boliviano y su desembocadura se localiza en el salar de Coipasa. La región se caracteriza por ser una zona de extrema aridez. La distribución temporal de las lluvias responde al régimen de precipitaciones provenientes del invierno altiplánico, por tanto los caudales de los cursos superficiales son mayores entre los meses de diciembre a marzo coincidiendo con el invierno altiplánico.

El objetivo general del Proyecto es el levantamiento de información hidrogeológica, hidroquímica y el desarrollo de un modelo conceptual que permita generar el balance hídrico completo del área en estudio, tanto superficial como subterráneo, de la zona denominada sistema hídrico de la cuenca del río Lauca. Esto con el propósito de aportar mayores antecedentes para dimensionar y gestionar adecuadamente el recurso hídrico.

De esta forma, se realizó el levantamiento de información para desarrollar la caracterización hidrogeológica, hidrológica e hidroquímica de la zona. Con esta información se ha desarrollado un modelo conceptual que ha permitido generar un balance hídrico completo del área de estudio tanto superficial como subterráneo. Así, se ha estimado el recurso hídrico disponible en el área de estudio teniendo en consideración el catastro y los derechos ya concedidos.

A su vez, los alcances originales planteados por DGA se complementaron durante el desarrollo del estudio con una serie de actividades que tuvieron como finalidad obtener un mayor conocimiento del sistema. Entre estas actividades complementarias se incluyen por ejemplo el estudio de la conexión hidrogeológica subterránea con el sector de la laguna Chungará en el extremo norte de la cuenca, y la conexión hidrogeológica subterránea con el sector del Salar de Surire en el extremo sur de la cuenca.

**Este resumen ejecutivo se divide en tres partes: primero se presentan las conclusiones finales que resumen sintéticamente los hitos principales que definen la cuenca y los hallazgos más significativos del proyecto; a continuación se presentan las recomendaciones del proyecto; finalmente se desarrolla un resumen breve del proyecto completo.**

## **CONCLUSIONES FINALES**

El objetivo general del Proyecto es el levantamiento de información hidrogeológica, hidroquímica y el desarrollo de un modelo conceptual que permita generar el balance hídrico completo del área en estudio, tanto superficial como subterráneo de la zona denominada sistema hídrico de la cuenca del río Lauca. Esto, con el propósito de aportar mayores antecedentes para dimensionar y gestionar adecuadamente el recurso hídrico de la zona de estudio.

La región de Arica y Parinacota se caracteriza por ser una zona de extrema aridez. La distribución temporal de las lluvias responde al régimen de precipitaciones provenientes del invierno altiplánico, por tanto los caudales de los cursos superficiales son mayores entre los meses de diciembre a marzo coincidiendo con el invierno altiplánico. Se calculó la precipitación media anual en las cuencas y subcuencas de estudio para el periodo 1984-2013. La cuenca que muestra mayor precipitación es la cuenca del lago Chungará, con valor de 369 mm anuales (3.225 L/s). A continuación se encuentra la cuenca del salar de Surire, con 317 mm (5.770 L/s). Finalmente y con el valor promedio más bajo, la cuenca del río Lauca, con precipitación media anual 293 mm (22.522 L/s). La subcuenca situada en la cabecera del río Lauca corresponde a la subcuenca de Cotacotani, la entrada por precipitación en esta subcuenca asciende a 1.382 L/s. Aguas abajo se encuentra la subcuenca del río Lauca en Estancia el Lago en la que la precipitación media anual calculada es de 2.660 L/s, mientras que en la subcuenca del río Guallatire en Guallatire es de 314 L/s. La precipitación en la subcuenca del río Lauca en Japu es de 18.098 L/s y en la subcuenca del río Lauca en cierre subcuenca es de 69 L/s. Para el cálculo del balance hídrico se consideró la superficie de la cuenca hasta la estación "Río Lauca en Japu", ya que es el punto más cercano al cierre de la cuenca con datos de salida de flujo superficial. Por tanto, se excluyó la superficie ocupada por la subcuenca "Río Lauca en cierre". De este modo, la componente de entrada al sistema hídrico de la cuenca por precipitación es de 22.454 L/s.

La evaporación efectiva que se produce en la cuenca se llama evapotranspiración real. Se obtuvo una evapotranspiración promedio anual en la cuenca del río Lauca de 18.511 L/s para el periodo 1984-2013. La evapotranspiración es la componente de salida del sistema hídrico más importante de la cuenca.

La salida del sistema por flujo superficial corresponde al caudal promedio anual aforado en la salida de la cuenca. El caudal promedio anual es de 400 L/s en la

estación de aforo Río Desaguadero en Cotacotani, 160 L/s en la estación Río Lauca en Estancia el Lago, 764 L/s en la estación Canal Lauca en Sifón nº 1, 358 L/s en la estación Río Guallatire en Guallatire y 2.653 L/s en la estación de aforo Río Lauca en Japu. El río Lauca muestra un régimen pluvial, sin embargo la estación Río Guallatire en Guallatire muestra una singular regulación de su caudal que no responde a las variaciones estacionales del resto de la cuenca. El caudal del río Lauca es el valor que se considera en el balance hídrico como la componente de salida del sistema por flujo superficial: 2.653 L/s.

En la cuenca del río Lauca existen 147 usuarios de agua superficial, que suman un caudal de 2.386,86 L/s en derechos concedidos. Este caudal es utilizado mayoritariamente para riego de bofedales y uso doméstico, por lo tanto en los balances hídricos no se considera como una salida de la cuenca, ya que esta agua vuelven a infiltrarse y a circular en el ciclo hídrico. Por otro lado, los usuarios del canal Lauca-Azapa tienen otorgados 1.470,41 L/s en 2.812,55 acciones en la cuenca, es decir, cada acción equivale a 0,52 L/s. El caudal del canal Lauca-Azapa está regularizado mediante la Resolución DGA N° 320 y 450. Sin embargo, el caudal de salida considerado en el balance corresponde al promedio registrado en la estación Canal Lauca en Sifón N°1 durante el periodo 1984-2013, que equivale a un caudal de 764 L/s.

Por otro lado, se ha llevado a cabo un modelo hidrológico a escala mensual a partir de los promedios de precipitaciones y caudales del periodo 1984-2013 de la cuenca del río Lauca. El análisis de la relación entre la precipitación y el caudal superficial generado en cada subcuenca permitió concluir que las variaciones del caudal del río Lauca tienen una buena correlación con la variación de las precipitaciones, ahí donde la escorrentía no se encuentra regulada. También se determinó que las lluvias tienen un efecto directo sobre los caudales superficiales, en donde los máximos se relacionan entre sí con un desfase de un mes. Todo lo anterior es válido para la cuenca con la única excepción que representa la subcuenca de Guallatire.

Desde el punto de vista geológico, la cuenca hidrográfica del río Lauca se enclava en una cuenca tectónica sedimentaria tipo antepaís en la zona central del orógeno andino. Esta cuenca se encuentra controlada por los sistemas estructurales y movimientos tectónicos que la han afectado. La geología estructural existente define y condiciona la formación y geometría de los cuerpos acuíferos. Así como también la forma en que se disponen los drenajes superficiales activos. Todo lo anterior, modela al sistema de



unidades hidrogeológicas y su relación con el ciclo hidrológico imperante. Asimismo, la litología presente afecta y marca la hidroquímica del agua que transita por los acuíferos.

La composición litológica, su competencia reológica, y su estado estructural, son las variables principales que controlan la permeabilidad de las unidades presentes, facilitando o dificultando el flujo de las aguas subterráneas y la dinámica con los cursos de agua superficial.

En la cuenca de estudio se han identificado 4 unidades hidrogeológicas: La UH1 son acuíferos en depósitos sedimentarios, la unidad UH2 corresponde con los acuíferos en roca muy fracturada, la UH3 es un acuitardo de porosidad primaria y la unidad UH4 es un acuitardo en roca fracturada. La UH5 es una roca casi impermeable. Estas unidades pueden aparecer en distintas zonas de la cuenca. En cada zona en donde aparecen pueden mostrar un comportamiento particular, ya que han sido afectadas por eventos singulares.

En el sector Parinacota-Cotacotani, la unidad acuífera principal es la UH1. A partir de la prospección geofísica realizada se observa una zona no saturada en las partes más altas de hasta 50 m de espesor pero no se detectó el basamento en la zona central de este sector, implicando que el acuífero UH1 presenta al menos un espesor de 300 m. Los depósitos palustres cubiertos por los bofedales de Parinacota (UH3) cubren esta unidad en la parte central del sector. En la parte occidental y sur del sector existe la ignimbrita Lauca (UH4) que semiconfina la parte inferior de UH1 causando así la formación de un acuífero inferior semiconfinado que se extiende también aguas abajo el sector del Lauca Alto. La unidad acuífera UH1 es alimentada principalmente de 3 fuentes de agua: Por un lado, la precipitación que infiltra el suelo hasta el acuífero y, por otro lado la escorrentía superficial y subterránea. La escorrentía superficial procede de vertientes y del río Benedicto. Las vertientes generalmente se originan por acuíferos colgados en unidades acuíferas UH2 cuando el flujo subterráneo intercepta niveles más impermeables en las laderas de las zonas de recarga (Parinacota y Choquelimpie). Por otro lado, se produce escorrentía subterránea desde el lago Chungará con aguas más cargadas químicamente y desde las fracturas de los volcanes que rodean este sector con aguas más frescas. Por lo tanto, el flujo subterráneo en este sector tiene dos componentes: uno desde el sistema lago Chungará-lagunas de Cotacotani-ciénagas de Parinacota y otro desde las cotas más altas hacia los cuerpos de agua superficiales.

En el sector Lauca Alto el principal acuífero está constituido por una unidad acuífera tipo UH1. Esta unidad la constituyen 10 m de espesor de depósito cuaternario asociado al río Lauca, 100 m de espesor de la parte inferior de la Formación Lauca tipo detrítica y al menos 150 m de Formación Lupica, OMI (d). Los depósitos cuaternarios están separados del acuífero inferior semiconfinado por 40-50 m de espesor de ignimbrita Lauca (UH4). La ignimbrita Lauca semiconfina al acuífero inferior, como verifican los pozos surgentes del MOP. La Formación Lupica (d) constituye un acuífero multicapa de 400 a 600 m de areniscas, fangolitas y calizas que se acuñan hacia el sur de este sector, llegando a desaparecer antes del anticlinal del sector Lauca Medio.

A partir de las pruebas de bombeo en este sector y de la información existente de los pozos se puede relacionar mayor transmisividad a los pozos habilitados y ranurados a mayor profundidad. El pozo 8 perforado hasta los 120 m de profundidad presenta una transmisividad de 335 m<sup>2</sup>/día mientras que el pozo 10 tiene 83 m de profundidad y una transmisividad de 70 m<sup>2</sup>/día. Los antecedentes bibliográficos asignan un valor de coeficiente de almacenamiento que varía entre 1 y 3%. Debido a la heterogeneidad de la unidades geológicas y el carácter local que tiene estos análisis, estos parámetros hidráulicos no son extrapolables al resto de la cuenca.

En el sector Lauca Medio de la cuenca existe un anticlinal denominado anticlinal Queñuacollo. La estructura anticlinal y la erosión han producido el afloramiento de los materiales de la Formación Lupica (b) que constituyen una unidad impermeable tipo UH5 y, por lo tanto una importante barrera hidráulica. Esta unidad se sitúa estratigráficamente por debajo de formaciones posteriores que constituyen acuífero como la Formación Lauca. La zona más cercana al eje del anticlinal en el sector sur causa el levantamiento de la unidad UH1 que en el Lauca Alto constituía el acuífero inferior semiconfinado, originando así una zona de transición que da lugar al acuífero libre característico del sector Lauca Bajo.

El sector Lauca Bajo es el más complejo a nivel hidrogeológico. Presenta 5 unidades hidrogeológicas diferentes: el UH1 que en esta zona corresponde a depósitos aluviales cuaternarios que cubren las laderas del volcán Guallatire; el UH2 con depósitos volcánicos fracturados del volcán Guallatire; y el UH3 con depósitos glaciares cuaternarios; en cuarto lugar el acuífero multicapa constituido por una intercalación de 30 m de acuitardo (UH3, materiales de grano fino) con un acuífero UH1 cuyo espesor no se ha definido por no detectarse con la prospección geofísica realizada. Por último, en la salida de la cuenca se ha identificado una unidad acuífera de porosidad dual

(primaria UH1 y secundaria UH2) constituida por 300m de espesor en la Formación Lupica (a).

En la cuenca las aguas subterráneas tienen dos direcciones de flujo desde las cotas más altas de los cerros que bordean la cuenca hacia las cotas más bajas: la componente principal tiene una dirección de flujo subterráneo N-S y la componente secundaria NE-SW y NW-SE. Además, es importante destacar que el río Lauca mayoritariamente a lo largo de su recorrido recibe aportes de agua subterránea desde el acuífero.

Hidroquímicamente se ha observado que en la cuenca del río Lauca las aguas son de composición bicarbonatada. Esto evidencia una escasa evolución química del agua subterránea, mostrando un bajo contenido salino y un predominio mayoritario del ión bicarbonato. Por lo tanto, se puede concluir que las aguas subterráneas del área de estudio son relativamente jóvenes.

Las aguas bicarbonatadas cálcicas se suelen asociar a zonas de recarga in-situ. Las aguas con mayor salinidad y predominio del ión sulfato son aguas subterráneas con mayor evolución que las aguas bicarbonatadas, es decir, con mayor recorrido y/o tiempo de residencia. A medida que las aguas fluyen por los acuíferos o cauces superficiales se van incorporando elementos de los estratos geológicos que atraviesan, esto provoca que la concentración de elementos mayoritarios aumente, y su quimismo evolucione a aguas sulfatadas cálcicas o magnésicas.

El alto contenido de arsénico y boro presente en algunas muestras de la cuenca, se debe principalmente al carácter volcánico de la cuenca del río Lauca. El boro es un elemento conservativo en las aguas que procede de la actividad volcánica efusiva y de los fluidos hidrotermales, por lo que sus altas concentraciones en la cuenca son un reflejo de la actividad volcánica presente. Lo anterior fue confirmado mediante el estudio de las concentraciones de sílice.

Por otro lado, existe una alteración hidrotermal que se ve reflejada en la composición hidroquímica de las muestras tomadas en el río Blanco y en quebrada Jara (mina Choquelimpie), siendo estas aguas sulfatadas ácidas y con elevado contenido en hierro. El río Blanco presenta esta característica de un modo permanente pero la quebrada Jara sólo en épocas de lluvia cuando el potencial de disolución superficial crece.

En la parte alta del río Chusjavidá destaca el afluente de quebrada Caliente, que tiene una vertiente termal en su cabecera, conocida como Terma de Chiriguaya. Las aguas de esta vertiente proceden de una circulación de flujo subterráneo profundo y ascendente a través de fracturas en el sector del anticlinal de Chiriguaya, presentando una temperatura superior a 40° y un alto contenido en elementos mayores, sílice, arsénico, boro y litio. El efecto de esta manifestación hidrotermal es local ya que no se observan anomalías en la hidroquímica generalizada del resto de la subcuenca.

El río Lauca no sufre mucha variación en su composición hidroquímica exceptuando el gran cambio después de la confluencia de la quebrada Chuba, en donde sufre un aumento en la concentración de cloruros. Este fenómeno puede asociarse a una influencia hidrotermal que existe en la quebrada Chuba, ya que su contenido en arsénico, boro, cloro, litio, potasio y sodio es de los más altos de la cuenca de estudio. El río Paquisá también aporta aguas con un alto contenido en cloruros, debido a que se origina en una laguna en la que las aguas se enriquecen en elementos conservativos.

Isotópicamente la cuenca del río Lauca se caracteriza por mostrar aguas muy evaporadas en la zona norte de la cuenca relacionado con el sistema lagunar. Hacia el sur, la marca isotópica se muestra menos evaporada. Este contraste se acentúa debido a que el canal Lauca se lleva todas las aguas que daban nacimiento al río, y por tanto el río que se vuelve a desarrollar aguas abajo del canal no refleja el aporte desde las lagunas (y su evaporación), sino más bien los aportes desde el acuífero, vertientes y tributarios. Los análisis isotópicos muestran un fraccionamiento diferente entre las aguas superficiales y subterráneas. Las aguas superficiales han sufrido un enriquecimiento isotópico por evaporación mientras que las aguas subterráneas presentan una ligera marca de interacción agua-roca, posiblemente por una influencia geotermal.

Complementariamente, se analizó la conexión hidráulica entre la cuenca del lago Chungará con la cuenca del río Lauca, y entre la cuenca del salar de Surire y la cuenca del río Lauca. A partir de este análisis se pudo concluir que existe un gradiente hidráulico que permite que el agua circule desde la cuenca del lago Chungará hacia el Lauca, pero no entre la cuenca del salar de Surire y el Lauca.

La conexión hidráulica entre la cuenca del lago Chungará con la cuenca del río Lauca por el sector de las lagunas de Cotacotani ha sido apoyada por varios autores. Primero, RISACHER (Risacher, 1999) realizó un balance hídrico del lago Chungará mediante cloruros y obtuvo una infiltración desde el lago Chungará de 32 l/s (5% de

los aportes). Posteriormente, HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) mediante un balance de masas con  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  definió que un 58% del volumen de agua que alimenta las lagunas de Cotacotani proviene del lago Chungará. Por último, el perfil TEM llevado a cabo en la prospección geofísica muestra una conexión entre cuencas a través de un acuífero superior formado por depósitos de brechas. Por debajo de este y separado por un acuitardo, se observa un acuífero confinado el cual podría estar conectado con el acuífero superior a través de una falla fácilmente visible en el perfil TEM. Por lo tanto, con los datos disponible se confirma que existe la conexión hidráulica entre ambas cuencas.

La posible conexión hidráulica entre la cuenca del salar de Surire y la cuenca del río Lauca por el sector de la laguna Paquiza se investigó mediante la prospección geofísica. Al interpretar el perfil se observó que coincidiendo con la parte más alta del portezuelo, hay una formación volcánica impermeable (UH5) que divide subterráneamente las dos cuencas. De esta forma concluimos que no existiría conexión entre ambas cuencas.

Finalmente, se ha realizado un balance hídrico de la cuenca considerando que el sistema se encuentra en equilibrio y las entradas son iguales a las salidas. Por un lado, las variables de entrada al sistema son: la precipitación (22.454 L/s), el caudal subterráneo desde el lago Chungará (250 L/s) y el caudal subterráneo desde el volcán Guallatire (303 L/s). Por otro lado, las variables de salida del sistema son: la evapotranspiración (18.511 L/s), las extracciones del canal Lauca (764 L/s), el caudal superficial (2.653 L/s) y el caudal subterráneo (1.078 L/s). De este modo se ha evaluado la temporalidad y la disponibilidad del agua superficial y subterránea dentro de cuenca, siendo de 3.731 L/s.



## **RECOMENDACIONES**

Mejorar el conocimiento en áreas prioritarias:

- *Prospección geofísica (TEM ) profunda de 400 m de investigación.* Durante la campaña de prospección del año 2015 fue posible conseguir información sobre los niveles freáticos y sobre la geometría de subsuperficie, incluidas algunas posiciones del basamento donde este es más superficial. La campaña 2015 estaba diseñada originalmente para detectar la presencia del nivel freático, no obstante durante el desarrollo de la misma y su análisis en paralelo fue posible distinguir una primera imagen de la estructura de capas subsuperficiales así como algunas zonas más profundas. Por esta razón, durante el desarrollo de la campaña 2015 fueron agregados puntos de medición TEM adicionales con un tendido de loop mayor, destinados a medir con mayor precisión la zona profunda de la cuenca. Para esto fue necesario proyectar loops más amplios, los que fueron entremezclados con el diseño de loops originales. Por lo anterior, se puede concluir que las capas que conforman los rellenos sedimentarios y volcánicos de la cuenca del río Lauca son identificables con la técnica TEM, y por lo tanto se recomienda canalizar los potenciales esfuerzos de investigación geofísica futura mediante esta técnica que resulta relativamente económica para los beneficios en la calidad de información que entrega.
- *Construcción de un pozo de bombeo y prueba de bombeo asociada.* En la cuenca del río Lauca sólo se han llevado a cabo pruebas de bombeo en el sector Lauca Alto, de dichas pruebas se definieron los parámetros hidráulicos del acuífero confinado de la Formación Lauca detrítico. Estos parámetros hidráulicos no son extrapolables al resto de la cuenca, por lo que se recomienda realizar al menos una prueba de bombeo en sector del Lauca Bajo, y así determinar las propiedades de los acuíferos UH1 y UH2.

Metodología: Es deseable que la longitud del pozo llegue hasta la base del acuífero ya que así se podría testear toda la potencia disponible. No obstante, condiciones presupuestarias restrictivas podrían valerse de un pozo de 50-70 m de profundidad para conocer el tramo más superficial de estos acuíferos de la zona sur.

La prueba de bombeo debería considerar una prueba de gasto variable con escalones de igual duración para estimar la eficiencia de la captación. A continuación, se debería realizar una prueba de gasto constante. El caudal de

este último ensayo deberá ser estimado a partir de los resultados de la prueba de gasto variable. Al tratarse de un acuífero libre, se recomienda que la duración de la pruebas de bombeo sea al menos de 3 días. Una vez efectuado la prueba de gasto constante, se realizará un ensayo de recuperación hasta alcanzar la estabilización del nivel de agua, que puede ser diferente al nivel estático previo al ensayo, a fin de corroborar los parámetros elásticos obtenidos y la tendencia natural del nivel de agua. Es importante que el agua bombeada se evacúe de forma que no regrese al acuífero e interfiera con la prueba.

- Construcción de 10 piezómetros (cortos) de exploración y programa de monitoreo. La construcción de una serie de piezómetros tiene dos alcances: por un lado, crear una red de monitoreo de niveles freáticos del sector Lauca Sur y conformar una red de monitoreo para la toma de muestras de agua representativa del acuífero para el análisis hidroquímico e isotópico. Por otro lado, esta red también permitiría observar las variaciones naturales del nivel freático, y descensos del nivel durante potenciales ensayos de bombeo para el cálculo de sus parámetros hidráulicos.

Metodología: Los piezómetros registran los niveles de agua mediante un pozómetro o *diver*; los parámetros fisicoquímicos se obtienen con sondas multiparamétricas de terreno; se toman muestras de agua subterránea con un *bailer* para análisis químicos e isotópicos.

Mínimos necesarios: Los piezómetros se proyectan de 50-70 m de profundidad en función de la posición dentro de la cuenca. Se propone perforar estos pozos con máquinas perforadoras compactas (sencillas) del tipo *Lone Star*. El piezómetro debería tener un diámetro de entre 4 a 6 pulgadas, idealmente habilitados como mínimo en 4 pulgadas con rejilla de PVC tipo ambiental (ranurada a lo largo de toda la perforación) y se envolvería en un geotextil o una capa de gravilla para evitar la colmatación del piezómetro por materiales finos, **Figura 1**. La profundidad del piezómetro variaría según la profundidad estimada en cada sector de la cuenca y de la cercanía al río Lauca, esto debería ser evaluado caso a caso. La distribución de los piezómetros en el sector Lauca Sur se deberá definir a partir de los objetivos del potencial estudio de factibilidad y resultados esperados para la posterior prueba de bombeo múltiple (a diferentes distancias del pozo de bombeo se puede observar el descenso y evolución del cono de depresión que origina la prueba).



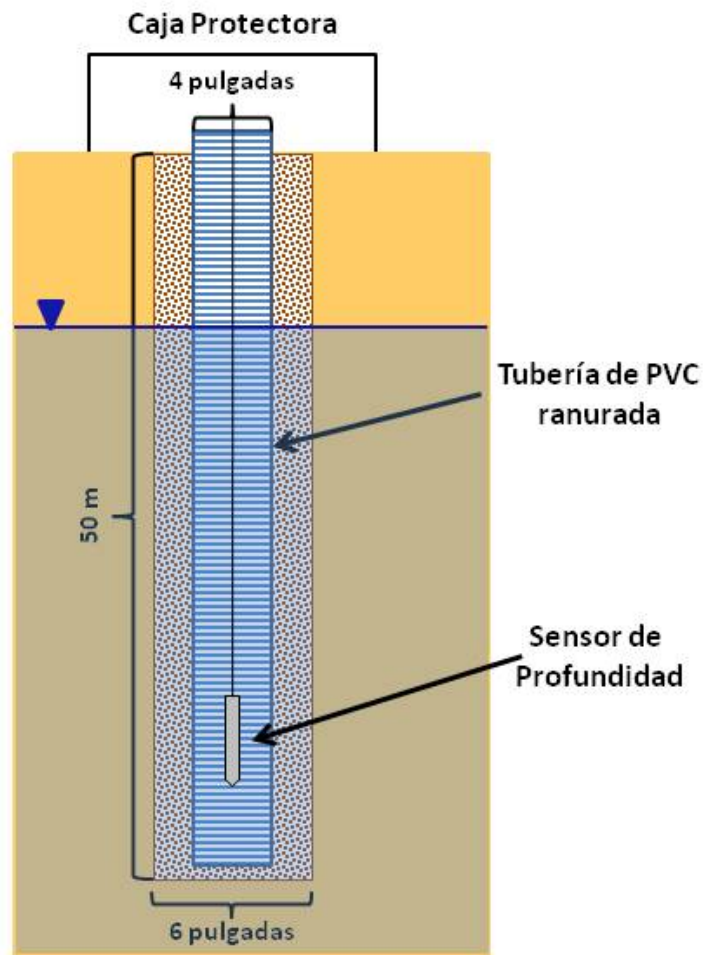


Figura 1. Esquema de piezómetro. Fuente: elaboración propia.

- Construcción de 1 pozo de exploración de testigo continuo de 300-500 m de profundidad. Esta actividad es necesaria para la definición precisa de la geología y calibración de las campañas geofísicas previas. Asimismo, permitiría calibrar el modelo hidrogeológico de la zona sur, así como sus propiedades físico-mecánicas. Para ello se propone la perforación mediante testigo continuo extraído por rotación con corona de diamantina. **Figura 2.**



Figura 1. Ejemplo de testigo continuo. Fuente: elaboración propia.

Mejoramiento y reparación de red de monitoreo:

- Instalación de lisímetros. La instalación de lisímetros es para cuantificar la evapotranspiración real que se produce en el suelo. Los lisímetros son tanques o bloques instrumentados de suelo alterado o inalterado, con o sin vegetación, donde el flujo que circula a través de él puede ser medido. El bloque de suelo es aislado hidrológicamente del suelo que lo rodea y es considerado como una muestra representativa del sistema macro porque tiene la misma vegetación y está sujeta al mismo clima. Estos tanques poseen una apertura hacia la superficie del terreno, permitiendo un flujo desde el exterior (infiltración) y desde su interior (evaporación). Es un método directo, ya que mide directamente los consumos por evaporación. **Figura 3**
- Metodología de medición: determinar a intervalos conocidos de tiempo la cantidad de agua que ha sido evaporada desde la columna de suelo. De esta forma se obtiene una variable en el tiempo la que puede ser integrada para obtener razones diarias o temporales de evaporación.

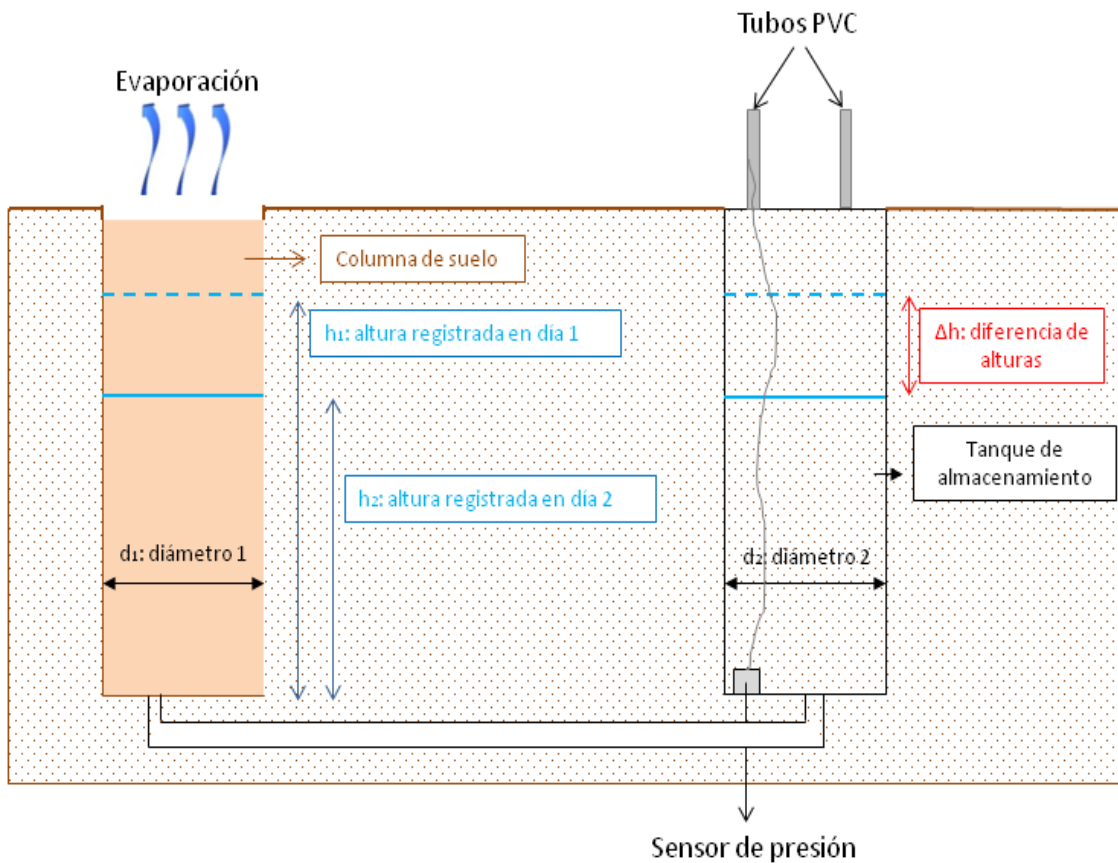


Figura 2. Esquema lisímetro. Fuente: elaboración propia.

- Rehabilitación de la estación de aforo abandonada e instalación de un equipo de monitoreo. Es aconsejable rehabilitar la estación de aforos cuyas coordenadas son 464.602 y 7.978.461 del sistema UTM 1984, de este modo se podrá registrar la variación de caudal entre la estación de aforos "Río Lauca en Estancia el Lago" y "Río Lauca en Japu" (**Figura 4**).
- Restauración estación de aforo de la DGA "Río Lauca en Japu". La estación de aforo "Río Lauca en Japu" se encuentra parcialmente destruida debido a una gran crecida del río Lauca en el año 2011. Es necesario restaurar la estación para tener un registro del caudal de agua superficial que sale de la cuenca en el paso fronterizo a Bolivia (**Figura 5**).

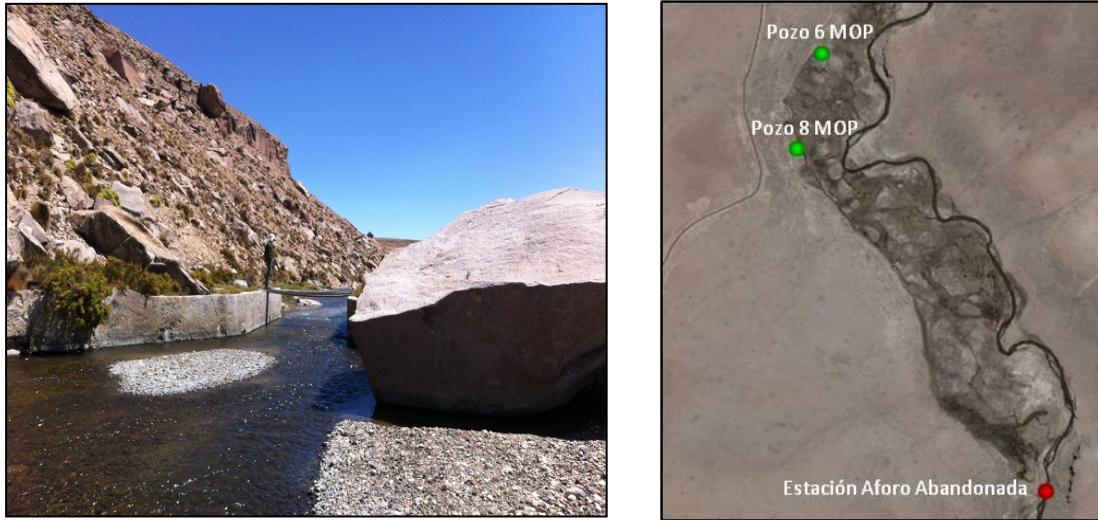


Figura 3. Fotografía y ubicación de la estación de aforo abandonada. Fuente: elaboración propia.



Figura 4. Estación "Río Lauca en Japu" parcialmente destruida. Fuente: elaboración propia.

## **RESUMEN DEL SISTEMA HÍDRICO**

El funcionamiento del sistema hídrico superficial de la cuenca del río Lauca nace en la laguna Cotacotani, cuyas aguas se canalizan por el río Desaguadero hasta los bofedales de Parinacota (**Figura 6**). En estos bofedales o ciénagas nace el río Lauca.

El lago Chungará está alimentado por el río Chungará y se separa de las lagunas Cotacotani por una colada volcánica de 4 km de ancho. Las lagunas Cotacotani tiene una superficie aproximada de 6 km<sup>2</sup>, existen numerosos islotes en su interior y su profundidad media es de hasta 10 m. La cota de su espejo de agua es de alrededor de 18 m más baja que la del lago Chungará, lo que explica en parte su existencia, puesto que es posible una conexión subterránea gracias a este gradiente hidráulico. Superficialmente, las lagunas Cotacotani reciben principalmente aportes desde el río Benedicto Morales al norte y la vertiente El Encuentro al este. El sistema de lagunas de Cotacotani aporta aguas superficiales al sistema Lauca a través del río Desaguadero. Este río se caracteriza por tener una gran pendiente y un corto recorrido hasta la ciénaga de Parinacota.

- La depresión de la ciénaga de Parinacota, de 28 km<sup>2</sup> de superficie, se extiende al poniente de la laguna Cotacotani a una altura media de 4.350 msnm y se encuentra cubierta en buena parte de bofedales. Por el noroeste queda confinada por cordones volcánicos a través de los cuales el río Lauca la desagua abriéndose camino en un verdadero cañón.
- El río Lauca, desde la salida de la ciénaga, se dirige al oeste y poco después se encuentra con la cordillera Central o Chapiquiña que le imprime un cambio de rumbo hacia el sur - suroeste.
- La orientación de la traza del río se mantiene relativamente homogénea hacia el sur hasta la confluencia con la quebrada que aloja el caserío de Misitune. En esta zona el drenaje del río Lauca cambia su orientación (más bien adquiere la orientación de la importante quebrada tributaria de Vizcachani) hacia un curso sureste. Esta orientación sureste es la que recorre más kilómetros dentro de la cuenca, y se mantiene hasta poco después de la confluencia con el río Guallatire.
- La confluencia del Guallatire aporta un caudal significativo al caudal del río Lauca. Aguas debajo de esta confluencia el río Lauca vuelve a cambiar la orientación de su curso que se transforma a oeste-este hasta ingresar en Bolivia y desembocar al salar de Coipasa.

- A lo largo del tramo chileno el río Lauca recibe aportes de varios ríos tributarios. Estos son por su ribera de poniente la quebrada Ancochalloane, el río Vizcachane y Quiburcanca, y por la su lado oriente son los ríos Chusjavidá y Guallatire, ambos alimentados desde cumbres con glaciares.



## PROYECTOS DE GESTIÓN HÍDRICA (1960 -2012)

La Región depende altamente de sus recursos hídricos subterráneos ya que su clima tiene una marcada influencia del anticiclón del océano Pacífico, que redundando en el déficit hídrico característico de la zona norte del país. La disponibilidad de agua actual por habitante es inferior a 1.000 m<sup>3</sup>/hab/año, umbral considerado internacionalmente como altamente restrictivo para el desarrollo económico, y que de no mediar mejoras sustantivas se acentuaría y comprometería las demandas proyectadas y el crecimiento de la región. Por esta razón, durante los últimos 50 años en la región se han desarrollado proyectos orientados a mejorar la gestión hídrica y optimizar el uso de los recursos. En la **Figura 6** se muestra la línea de tiempo de las diferentes acciones antrópicas que se han ido realizando en la zona de estudio para abordar la escasez y gestión hídrica en la región.

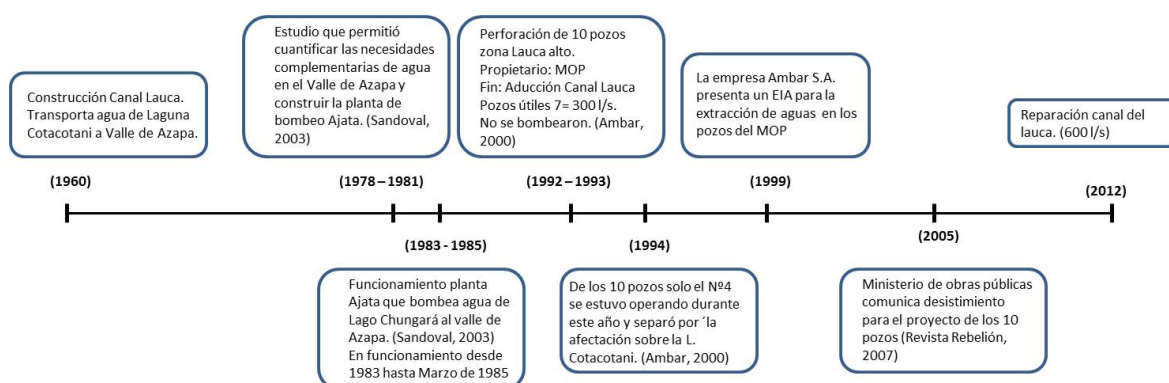


Figura 6. Línea cronológica de la situación de las obras realizadas en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

## CONTEXTO MEDIOAMBIENTAL - ÁREAS PROTEGIDAS

A lo largo del tiempo en la zona de estudio se han ido declarando áreas protegidas como: el Parque Nacional Lauca, la Reserva Nacional Las Vicuñas, el Monumento Natural Salar de Surire, el Sitio Ramsar Salar de Surire, acuíferos protegidos, zonas o centros de interés turístico y Área de Desarrollo Indígena (ADI) (**Figura 7**).



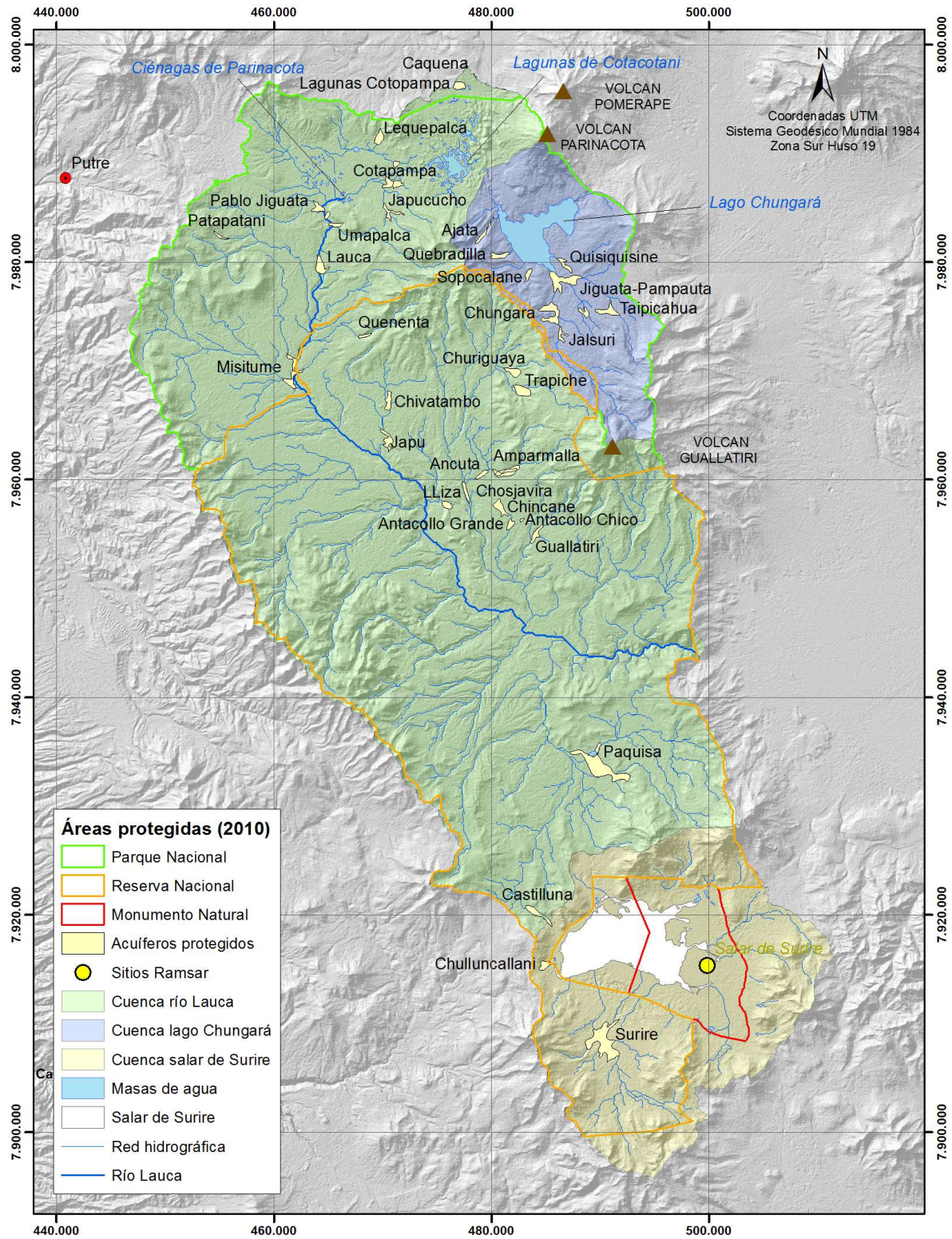


Figura 7. Áreas protegidas de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

### **CONTEXTO MEDIOAMBIENTAL - ACUÍFEROS PROTEGIDOS**

En el año 1992 la Dirección General de Aguas (DGA) modificó los artículos 58 y 63 del Código de Aguas con el fin de prohibir la exploración y explotación de aguas subterráneas en los acuíferos alimentadores de las vegas y bofedales de las Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. Lo anterior debido a que los acuíferos son el sustento de las actividades agroganaderas y de sobrevivencia de las comunidades andinas. Estos cambios en la legislación permitieron establecer medidas de protección de estos ecosistemas únicos y del uso ancestral que las comunidades habían hecho de ellos.

Posteriormente, la DGA realiza estudios para identificar y ubicar áreas de vegas y bofedales y delimitar sus acuíferos alimentadores. En 1996 se propugna que en dichas áreas no es posible autorizar exploraciones de aguas subterráneas ni constituir derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas si no se cuenta previamente con una evaluación ambiental favorable a través la Resolución DGA N° 909.

### **CONTEXTO SOCIOCULTURAL- ÁREAS DE DESARROLLO INDÍGENA (ADIs)**

Las Áreas de Desarrollo Indígena (ADIs) surgen a partir de la aplicación del Art. 26° de la Ley N° 19.253 aprobada en Octubre de 1995. De acuerdo a esta normativa, son definidas como espacios territoriales determinados en los cuales los órganos de la Administración del Estado y deben focalizar su acción para el mejoramiento de la calidad de vida de las personas de origen indígena que habitan en dichos territorios. Los objetivos específicos de estas medidas legales son respetar, proteger y promover el desarrollo de los indígenas, sus culturas, familias y comunidades, además de proteger las tierras indígenas, velar por la adecuada explotación de estas tierras, y velar por el equilibrio ecológico de estas tierras.

Posteriormente, el 15 de septiembre de 2009 el Congreso Nacional aprobó el Convenio N° 169, en el cuál se señala que se deberá consultar a los pueblos originarios, mediante procedimientos apropiados y en particular a través de sus instituciones representativas, cada vez que se prevean medidas legislativas o administrativas susceptibles de afectarles directamente.

### **CONTEXTO SOCIOCULTURAL- DIFUSIÓN**

Se realizaron cuatro talleres de difusión del proyecto para el público general y las comunidades: dos en la ciudad de Arica, y dos en Putre. Estas instancias tuvieron por

objeto dar a conocer a las comunidades e instituciones relacionadas los alcances y resultados del estudio.

La convocatoria se realizó en coordinación con la DGA y la encargada de Participación Ciudadana y Consulta Indígena de la Secretaría Regional Ministerial del MOP. Así, se convocó tanto en Arica como Putre a todos los dirigentes comunitarios, autoridades municipales y del gobierno local.

En total, tanto al inicio como al término del proyecto convocadas con invitaciones directas más de 50 personas entre las que se cuentan autoridades públicas y comunidades. Finalmente el número de asistentes a las dos reuniones de inicio alcanzó a 39 asistentes, y a las reuniones de término de proyecto el asistió un total de 52 personas.

### **RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES TÉCNICOS**

La etapa de recopilación de antecedentes permitió la creación de una base de datos unificada de todos los trabajos relacionados con los recursos hídricos de la zona de estudio publicados hasta la fecha. La revisión de antecedentes abordó en detalle 52 estudios, informes, tesis, expedientes, congresos, entre otros que son de dominio público. La siguiente información se dispuso bajo la estructura que define un modelo hidrogeológico conceptual integrado, según las siguientes disciplinas:

- Hidrología
- Geología
- Hidrogeología
- Hidroquímica e isótopos
- Balance Hídrico

En relación al Balance Hídrico de la cuenca, a la fecha no existen estudios que hayan abordado el balance de la cuenca del río Lauca en su conjunto. Los estudios pre-existentes, se hacen cargo de los cálculos sobre sub-sistemas al interior de la cuenca. El tratamiento de estas celdas al interior del sistema mayor permite conseguir un primer diagnóstico sobre el amplio rango de variación e incertidumbre que posee el sistema regional de acuerdo a los autores. A continuación se muestra un resumen de estos balances en los sub-sistemas, **Tabla 1**.

Subcuenca	Componente		Tipo	Niemeyer 1964 Caudal (L/s)	Klohn 1972 Caudal (L/s)	Grilli 1989 Caudal (L/s)	Risacher 1999 Caudal (L/s)
Chungará	Entradas	Precipitación					241
		Aportes Subterráneos	Subterránea				669 <sup>1</sup>
		Río Chungará	Superficial	300-450	300-500		
		Estero Sopocolane	Superficial	30-160	30-160		
		Vertiente Mal Paso	Superficial	15	15		
		Ajata	Superficial	20	20		
	Salidas		Subterránea				32
		Evaporación		1200 mm/año			878
Cotacotani	Entradas	Precipitación					72
		Lago Chungará	Subterránea		90-110		3771
		Benedicto Morales	Superficial	90-110			
		Estero El Encuentro	Superficial	20	20		
	Salidas	Río Desaguadero	Superficial	260			245
		Evaporación		1000 mm/año			204
Ciénaga de Parinacota	Entradas	Río Desaguadero	Superficial	260			
		Ojos de Agua	Superficial	150	150		
		Chacurpujo	Superficial	40	40		
		Copapujo	Superficial	80-100	80-100		
		Chubire	Superficial	65	65		
		Tudune, Pocroco, Apocucho, Untupujo y Chungarilla	Superficial- termal	40	40		
	Salidas	Río Lauca	Superficial	300	300-1000		
		Canal del Lauca	Superficial			790	

Sub-cuenca	Componente		Tipo	Niem. 1964 Caudal (L/s)	Klohn 1972 Caudal (L/s)	Grilli 1989 Caudal (L/s)	Ayala <sup>2</sup> 1994 Caudal (L/s)	DGA 2010 Caudal (L/s)	Aquat. <sup>3</sup> 2011 Caudal (L/s)
Río Lauca	Entradas	Ciénaga Parinacota	Sup	300	300-1000	91	54		146/526
		Río Guallatire	Sup	1000	1000	1090			369/109
		Quiburcana	Sup						
		Paquisa			115				
		Acuífero Superior	Subt					963	
		Acuífero Inferior	Subt						
	Salidas	Río Lauca hacia Bolivia	Sup			3210	701	2929	2690/1519
		Acuífero Superior	Subt						604
		Acuífero Inferior	Subt						

- 1: Risacher estima el volumen de todas las entradas, tanto superficiales como subterráneas.
- 2: Ayala calcula este caudal hasta la confluencia del río Lauca y Vizcachane, en el sector de los pozos 9 y 5 del MOP. Sólo considera parte de la cuenca.
- 3: Aquaterra contiene dos medidas de caudal. La primera es la medida en las estaciones de aforo, y la segunda la calculada según la relación precipitación y escorrentía.
- 4: Los 60 L/s son las extracciones concedidas a la minería de 4 pozos.

Tabla 1. Resumen comparativo de los caudales estimados del balance hídrico por diferentes autores. Fuente: elaboración propia.

## CAMPAÑAS DE TERRENO

Se realizaron campañas de terreno para medición de aforos, muestreo hidroquímico e isotópico, prospecciones gravimétricas y transientes electromagnéticas de acuerdo al calendario de la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**

- Los cuatro terrenos para medición de aforos se programaron con una temporalidad que refleja cambios estacionales en los caudales de los ríos, evitando la época de máximas lluvias del altiplano que alteraría los resultados de medición.
- Las dos campañas de tomas de muestras para química se realizaron con 5 meses de diferencia para captar la estacionalidad en la química de las agua entre la época seca y la húmeda.

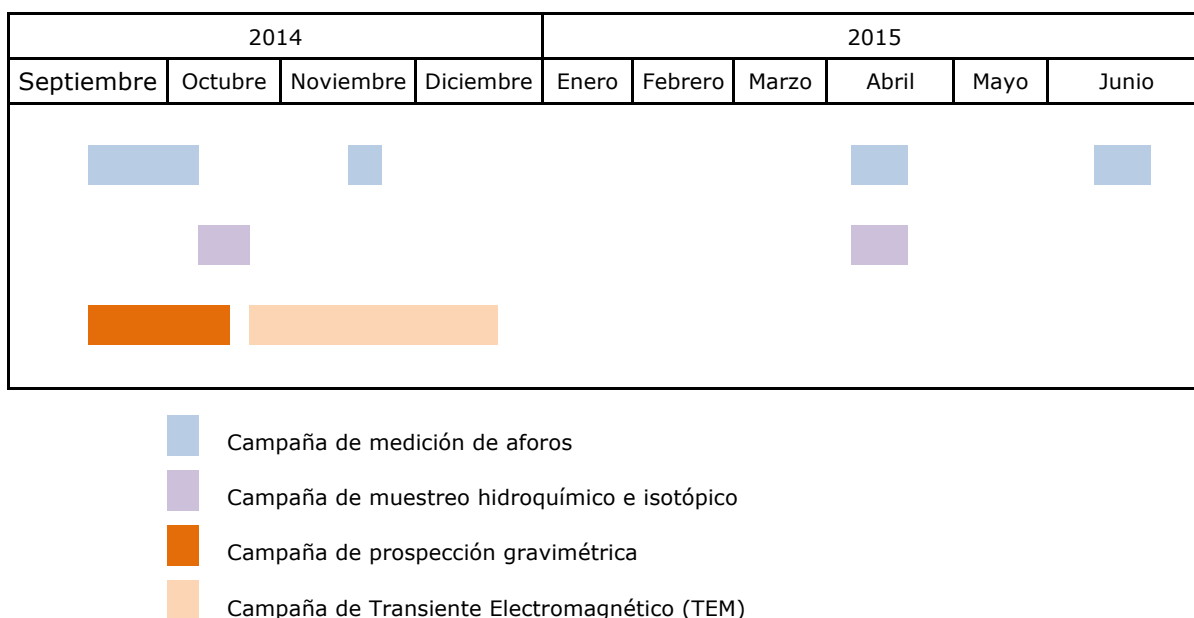


Figura 8. Línea de tiempo de los terrenos realizados. Fuente: elaboración propia.

## CATASTRO DE USUARIOS – AGUAS SUBTERRÁNEAS

Se ha desarrollado un catastro de usuarios de agua subterránea de la cuenca del río Lauca. En el **Anexo D.1** se presentan las fichas de los 4 pozos propiedad de la Sociedad Conceptual Minera Villacollo que figuran en el CPA con derechos concedidos. También se presentan los 7 pozos pertenecientes al Ministerio de Obras Públicas (MOP)

con derechos en estado pendiente en Región. Los pozos de la minera tienen el derecho de aprovechamiento concedido aunque en estado de no-explotación.

### **CATASTRO DE USUARIOS – AGUAS SUPERFICIALES**

Existen un total de 147 usuarios en la cuenca del río Lauca con derechos otorgados por la DGA, los cuales suman un caudal de 2.386.86 L/s. En la **Figura 10** se muestra la distribución de los usuarios en la cuenca. El río Guallatire es el que mayor caudal tiene concedido, 831 L/s distribuidos para 9 usuarios. En segundo lugar se encuentra el río Desaguadero, que tiene un caudal otorgado de 507 L/s, repartidos para 47 usuarios. A continuación se encuentra la quebrada Uncalire, con 189 L/s para 7 usuarios. En las Lagunas de Cotacotani se encuentran 8 usuarios con un caudal total otorgado de 168 L/s. El resto de la cuenca del río Lauca, de mayor a menor caudal otorgado son: río Blanco (114 L/s y 3 usuarios), quebrada Culca (110 L/s y 3 usuarios), río Paquiza (110 L/s y 7 usuarios), río Chusjavidá (86 L/s y 4 usuarios), quebrada Caliente (85 L/s y 3 usuarios), quebrada Velaque (41 L/s y 12 usuarios), quebrada Chureaque (41 L/s y 2 usuarios), sector central (26 L/s y 24 usuarios), quebrada Challoaní (21 L/s y 5 usuarios), quebrada sin nombre 2 (19 L/s y 1 usuarios), río Vizcachane (8 L/s y 3 usuarios), quebrada Conderol (8 L/s y 2 usuarios), quebrada Vichuta (6 L/s y 4 usuarios) y quebrada Chuba (1 L/s y 1 usuario)

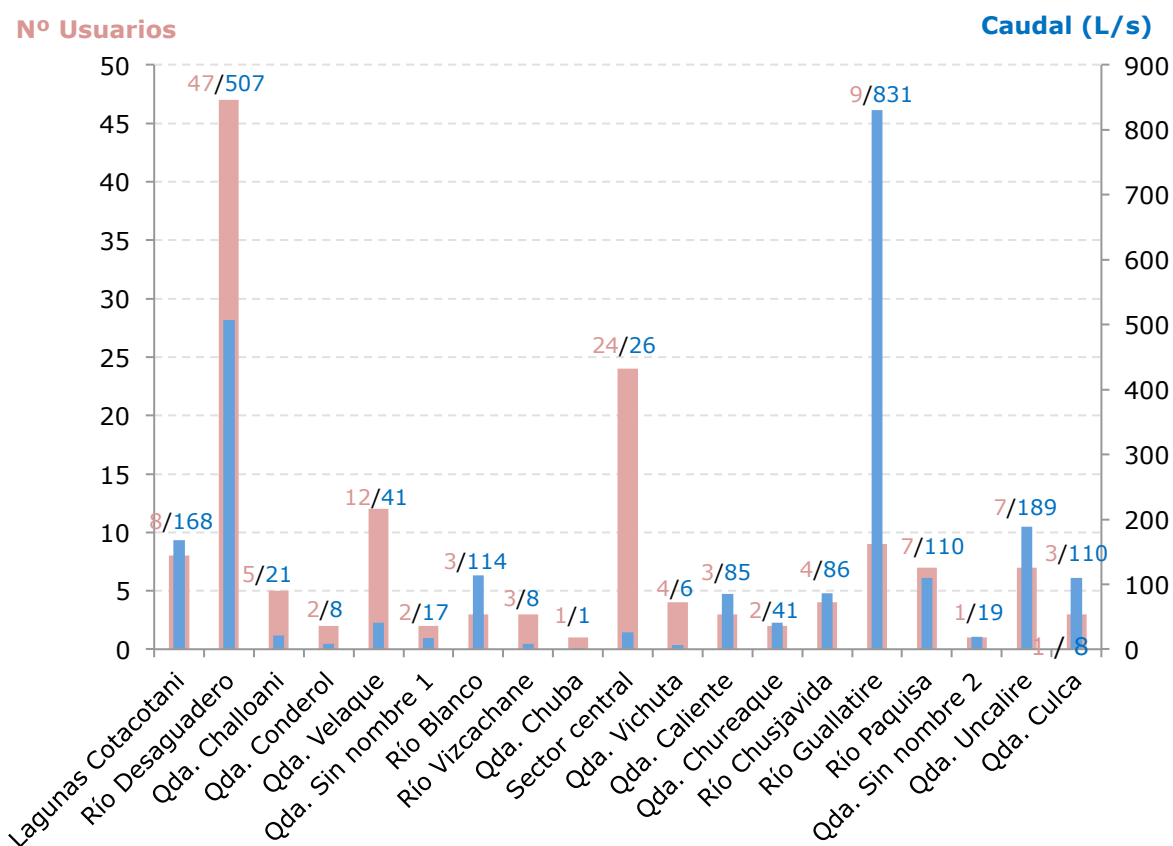


Figura 10. Número de usuarios con derechos concedidos por la DGA en la cuenca del río Lauca.  
Fuente: elaboración propia

### CATASTRO DE USUARIOS – CANAL LAUCA

Los usuarios del canal Lauca-Azapa están regulados mediante la Resolución DGA N° 320 (11 de agosto de 1989) y la Resolución DGA N° 450 (2 de agosto de 2001), siendo esta última la más actual. El total de acciones concedidas en el río Lauca para usuarios del canal Azapa es de 2.812,55 acciones. Mediante la conversión de 0,52 L/s/acción se obtuvo un caudal otorgado de 1,470 L/s para el canal Azapa.

### CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

En relación con las precipitaciones de la cuenca, el mapa de isoyetas (**Figura 11**) indica la presencia de dos direcciones principales que dominan la distribución espacial de la precipitación:



- Dirección este-oeste: la precipitación aumenta hacia el este, hacia las zonas de mayor altitud.
- Dirección norte-sur: la precipitación es mayor en el norte que en el sur.

Se calculó una precipitación media anual en 22.522 L/s como entrada principal a la cuenca del río Lauca. A su vez, se analizó la precipitación por subcuencas para determinar el comportamiento de cada una: Cotacotani, Río Lauca en Estancia el Lago, Guallatire en Guallatire, Río Lauca en Japu y Río Lauca en cierre, **Tabla 2**.

Subcuenca	Aporte Precipitaciones (L/s)
Cotacotani	1.382
Estancia El Lago	2.660
Guallatire	314
Río Lauca en Japu	18.098
Río Lauca en cierre	69
<b>Total</b>	<b>22.522</b>

Lago Chungará	3.225
Slar de Surire	5.770

Tabla 2. Resumen de los aportes por precipitaciones en la cuenca por áreas. Fuente: elaboración propia.

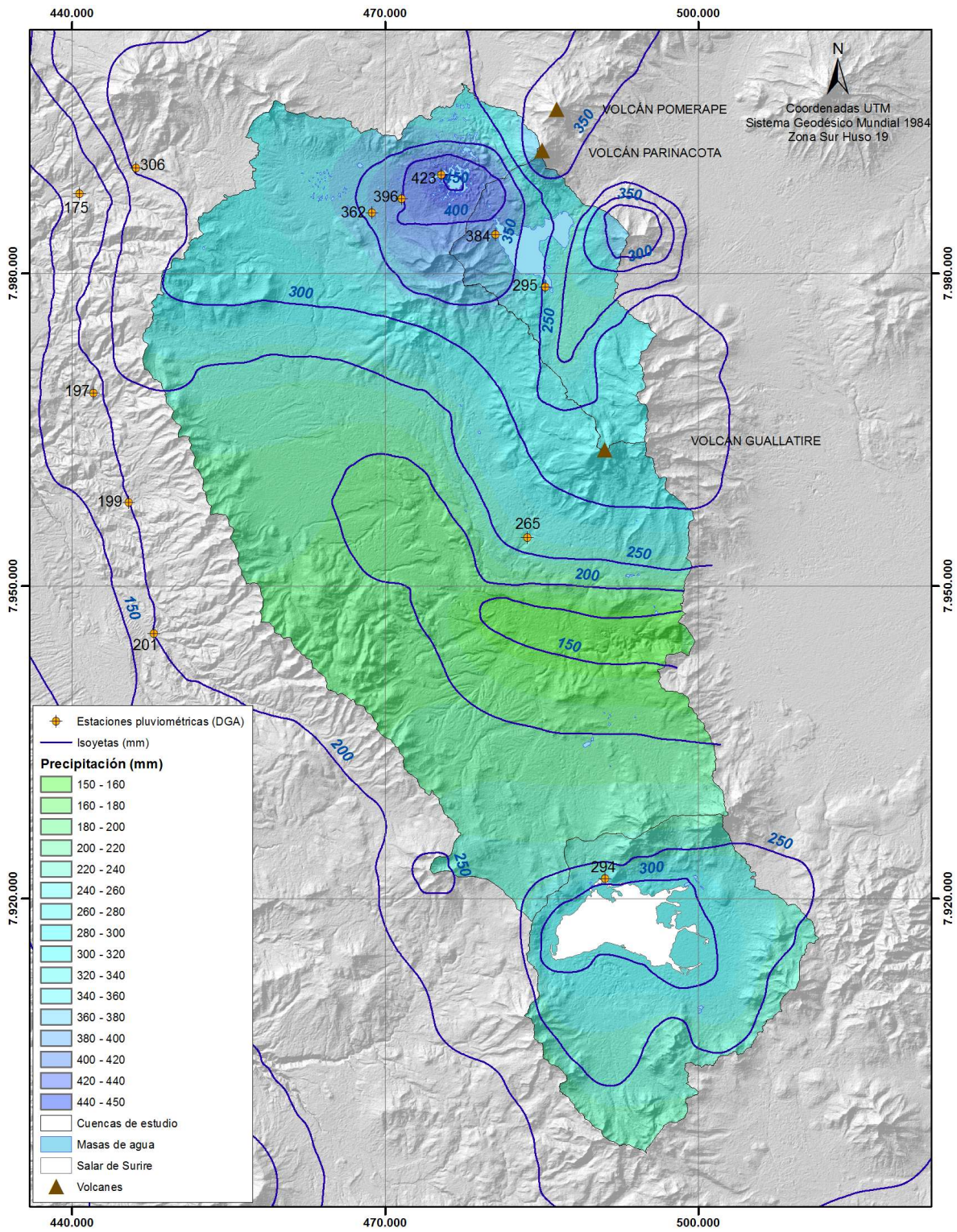


Figura 11. Precipitaciones promedio anual y Modelo Digital de Precipitaciones de la cuenca del río Lauca, lago Chungará y salar de Surire (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

Se calcularon los valores mensuales de precipitación para un año promedio, año húmedo y año seco (**Figura** ). Estos valores mensuales se emplearon en el modelo hidrológico y en el balance hídrico. Los valores promedio anuales obtenidos son los siguientes:

- Año hidrológico promedio: se obtuvo una precipitación media anual de 22,5 m<sup>3</sup>/s. Su cálculo se obtuvo a partir de las precipitaciones promedio mensuales de la serie temporal 1984-2013.
- Año hidrológico seco: se calculó una precipitación promedio anual de 8,7 m<sup>3</sup>/s. Se calculó a partir de la precipitación que es superada por el 90% de los años de registro.
- Año hidrológico húmedo: se determinó una precipitación promedio anual de 38,7 m<sup>3</sup>/s. Se calculó mediante la precipitación que es superada por el 10% de los años de registro.

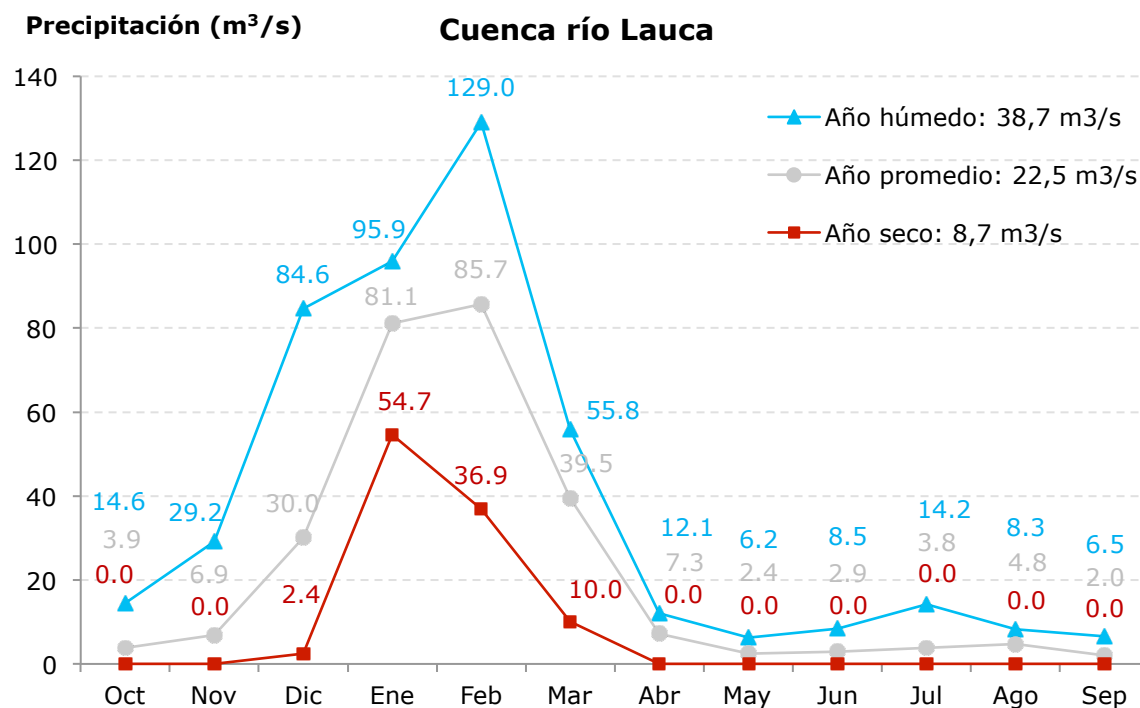


Figura 12. Precipitación en la cuenca del río Lauca para un año hidrológico normal o promedio, año muy seco y año muy húmedo (periodo (1984-2013). Fuente: elaboración propia.

En relación con la evapotranspiración, se realizó un balance hídrico a nivel mensual. Esta distribución mensual se fundamenta en el modelo del comportamiento de las

precipitaciones, de forma que la recarga se produce principalmente durante la época de lluvias (diciembre-marzo). Por tanto, durante estos meses la evapotranspiración es menor a la precipitación, y se produce una recarga efectiva del sistema. El resto del año las lluvias son menos importantes, y la poca precipitación que se produce en la cuenca es evaporada a la atmósfera.

Se calculó la evapotranspiración real en la cuenca del río Lauca para los diferentes escenarios de precipitación correspondientes a un año promedio, un año seco y un año húmedo. Para un año promedio se obtuvo una ETR anual de 18,6 m<sup>3</sup>/s, para un húmedo 32,6 m<sup>3</sup>/s y para un año seco 6,9 m<sup>3</sup>/s (**Figura 13**).

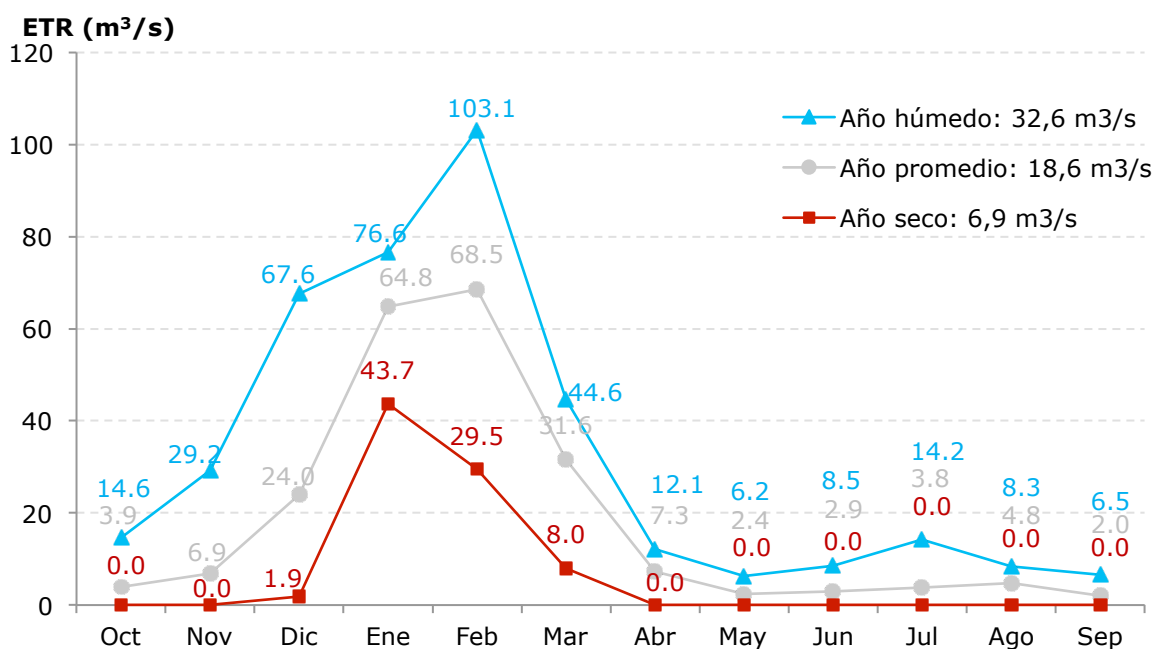


Figura 13. Evapotranspiración real para un año normal o promedio, un año húmedo y un año seco en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia,

Del mismo modo que se realizó con las precipitaciones y la evapotranspiración, se calcularon los caudales superficiales para un año promedio o normal, un año húmedo y un año seco en la estación de Río Lauca en Japu (**Figura 14**). El objetivo es homogeneizar todos los datos para emplearlos posteriormente en el modelo hidrológico.

El año normal o promedio corresponde al caudal promedio anual registrado en la estación de Río Lauca en Japu, el cual es de 2,7 m<sup>3</sup>/s. El año húmedo se calculó como

el caudal con una probabilidad de excedencia del 10% y se obtuvo un valor de 4,2 m<sup>3</sup>/s. El año seco se obtuvo mediante la probabilidad de excedencia del 90% y muestra un valor de 1,5 m<sup>3</sup>/s.

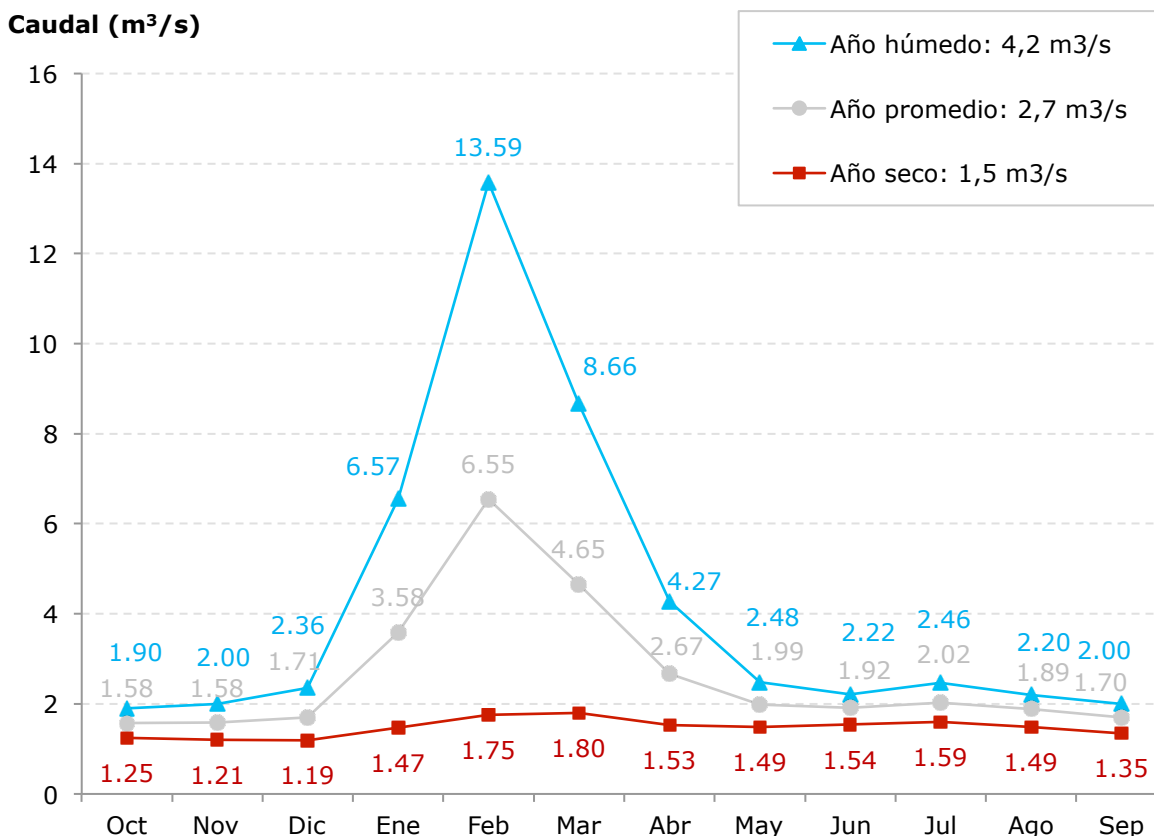


Figura 14. Caudal para un año normal o promedio, un año húmedo y un año seco en la estación río Lauca en Japu (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

La cuenca funciona como un colector de agua convirtiendo las entradas de agua en escorrentía superficial y subterránea. Conociendo las características de la cuenca (precipitación, flujo subterráneo de entrada y de salida, evapotranspiración, extracciones, flujo superficial de salida), se puede obtener la disponibilidad hídrica, formada por el flujo superficial y por el flujo subterráneo de salida equivalentes a la *recarga renovable promedio anual*.

En la **Tabla 3** se muestra el resumen con el caudal promedio anual de las variables que caracterizan el sistema de la cuenca del río Lauca. Se obtuvo un caudal superficial de 2.653 L/s y un caudal subterráneo de 1.078 L/s. Por tanto, la disponibilidad hídrica promedio anual total en la cuenca del río Lauca sería de 3.731 L/s.

	<b>Variables</b>	<b>Caudal promedio anual (L/s)</b>
Entradas	Precipitación	22.454
	Caudal subterráneo desde el lago Chungará	250
	Caudal subterráneo desde el volcán Guallatire	303
Salidas	Evapotranspiración	18.511
	Extracciones del canal Lauca	764
	<b>Caudal superficial</b>	<b>2.653</b>
	<b>Caudal subterráneo</b>	<b>1.078</b>
<b>Disponibilidad hídrica (caudal superficial + subterráneo)</b>		<b>3.731</b>

Tabla 3. Disponibilidad hídrica de la cuenca del río Lauca (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

## MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO

En relación a la dinámica interna de las variables hidrogeológicas del sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Lauca, a continuación se representa su modelación conceptual mediante perfiles transversal al río y un perfil longitudinal a lo largo del río Lauca para cada uno de los cinco sectores hidrogeológicos en los que se ha dividido la cuenca (**Figura 15**):

- Sector Parinacota-Cotacotani: incluye las lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota, hasta la estación de aforo de la DGA Río Lauca en Estancia el Lago.
- Sector Lauca Alto: comprende desde la estación de aforo de la DGA Río Lauca en Estancia El Lago hasta la confluencia de quebrada Jara con el río Lauca.
- Sector Lauca Medio: abarca desde la confluencia de quebrada Jara hasta la confluencia de quebrada Chuba.
- Sector Lauca Bajo: engloba desde la confluencia de la quebrada Chuba con el río Lauca hasta la frontera con Bolivia.
- Río Lauca: es el río Lauca desde su nacimiento en la bocatoma del canal Lauca hasta la salida por Japu hacia Bolivia.

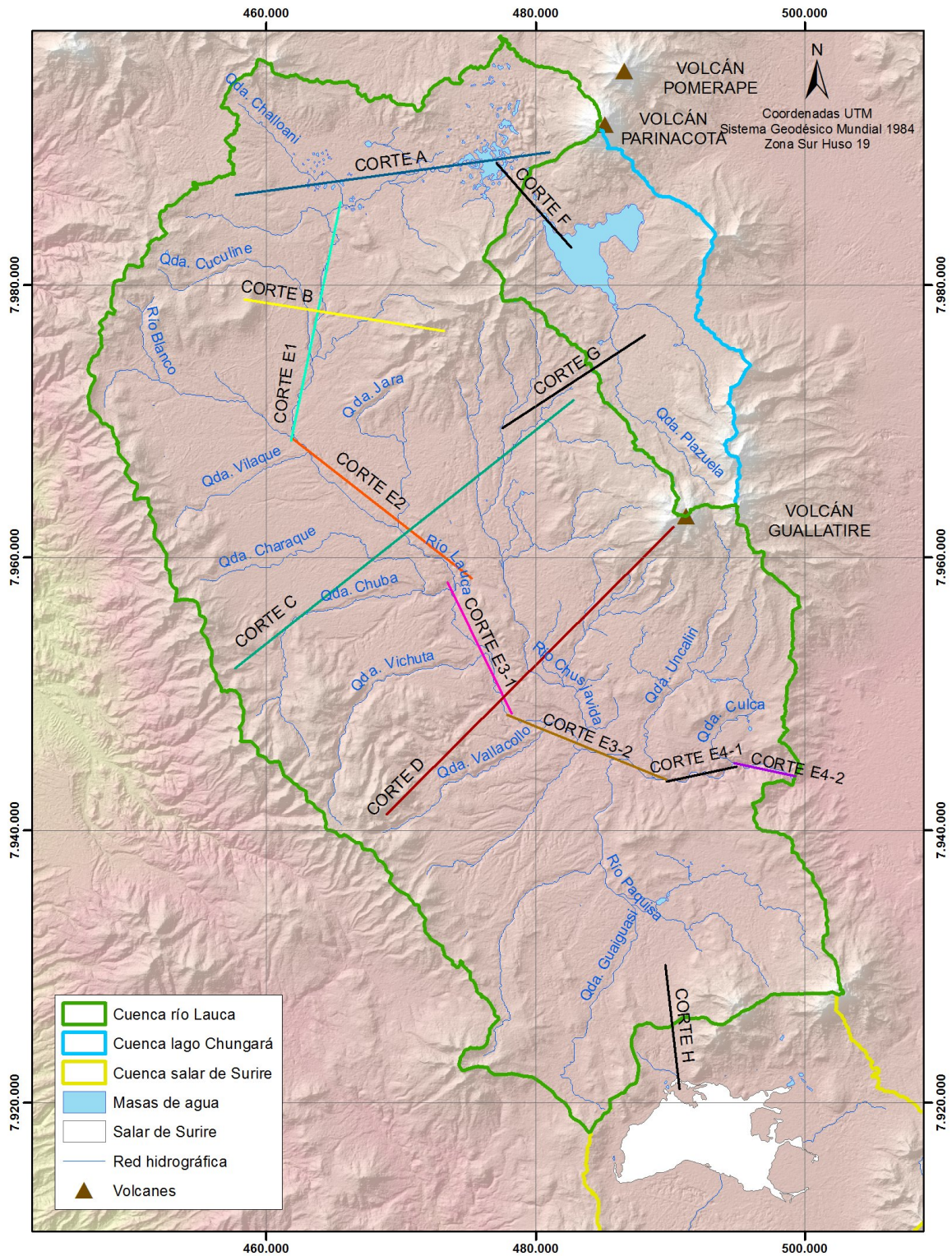


Figura 15. Mapa de la ubicación de los perfiles hidrogeológicos del modelo conceptual. Fuente: elaboración propia.



## **SECTOR PARINACOTA-COTACOTANI**

La principal componente de entrada al sistema del sector Parinacota-Cotacotani es la precipitación. En la subcuenca del río Desaguadero en Cotacotani la entrada media anual calculada por precipitación en la subcuenca asciende a 1.363 L/s, y en la subcuenca del Río Lauca en Estancia el Lago es de 2.240 L/s. Por lo tanto, la entrada total por precipitación en este sector es de 3.400 L/s. Recibe también un aporte subterráneo desde el lago Chungará que se ha estimado de 250 L/s, no obstante este último valor requiere ser revisado en mayor profundidad en futuros trabajos.

Las componentes de salida serían la evapotranspiración desde los bofedales, la evaporación desde los cuerpos de agua que componen este sistema lagunar, la evaporación desde el suelo húmedo y las salidas superficiales incluyendo el canal Lauca. La estación de aforo en el río Desaguadero registra un caudal promedio anual de 400 L/s, el canal Lauca en la bocatoma desvía un caudal promedio de 750 L/s, secando casi en su totalidad el río Lauca, y la estación Río Lauca en Estancia el Lago (después de la bocatoma del canal) registra un caudal promedio de 160 L/s. Por lo tanto, desde la bocatoma del canal Lauca hasta la estación Río Lauca en Estancia el Lago el río recibiría un aporte de agua subterránea desde el acuífero superior.

En este sector, la unidad acuífera principal es la UH1, constituida por los depósitos de avalancha, la Formación Lauca de facies de detríticas y por la Formación Lupica miembro OMI (d). A partir de la prospección geofísica realizada se observa una zona no saturada en las partes más altas de hasta 50 m de espesor. Por otro lado, en esta geofísica no se detectó el basamento en la zona central de este sector, implicando que el acuífero UH1 presenta al menos un espesor de 300 m. Los depósitos palustres cubiertos por los bofedales de Parinacota (UH3) cubren esta unidad en la parte central del sector. En la parte occidental y sur del sector existe la ignimbrita Lauca (UH4) que semiconfina la parte inferior de la Formación Lauca y la Formación Lupica (d) causando así la formación de un acuífero inferior semiconfinado que se extiende también aguas abajo el sector del Lauca Alto.

La unidad acuífera UH1 es alimentada principalmente de 3 fuentes de agua. Por un lado, la precipitación que infiltra el suelo hasta el acuífero y, por otro lado la escorrentía superficial y subterránea. La escorrentía superficial procede de vertientes y del río Benedicto. Las vertientes generalmente se originan por acuíferos colgados en unidades acuíferas UH2 cuando el flujo subterráneo intercepta niveles más impermeables en las laderas de las zonas de recarga (Parinacota y Choquelimpie). Por

otro lado, se produce escorrentía subterránea desde el lago Chungará con aguas más cargadas químicamente y desde las fracturas de los volcanes que rodean este sector con aguas más frescas. Por lo tanto, el flujo subterráneo en este sector tiene dos componentes, uno desde el sistema lago Chungará > lagunas de Cotacotani > Ciénagas de Parinacota, y otro desde las cotas más altas hacia los cuerpos de agua superficiales (**Figura 16**).

Desde el punto de vista hidroquímico se identifica una evolución y mezcla entre diversas vertientes, lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota. Las aguas del río Benedicto Morales son bicarbonatadas, sin dominio de ningún catión, mientras que el resto de vertientes son bicarbonatadas magnésicas. Por otro lado, las aguas de las lagunas de Cotacotani y del río Desaguadero son similares, sulfatadas-bicarbonatadas magnésicas con concentración relativamente alta de elementos mayores, pH alcalino y conductividad entre 700-500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Después de atravesar las ciénagas de Parinacota, en la bocatoma, las aguas son bicarbonatadas sódico-cálcicas debido al aporte de agua fresca y bicarbonatada de las vertientes. Las aguas superficiales se caracterizan por tener valores de pH y conductividad eléctrica más altos que las aguas de las vertientes.

En la bocatoma del canal Lauca se desvía prácticamente la totalidad del caudal río Lauca para el abastecimiento del valle Azapa. A partir de este punto el río Lauca se alimenta únicamente de las aguas bicarbonatadas del acuífero superior de la Formación Lauca.

Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota

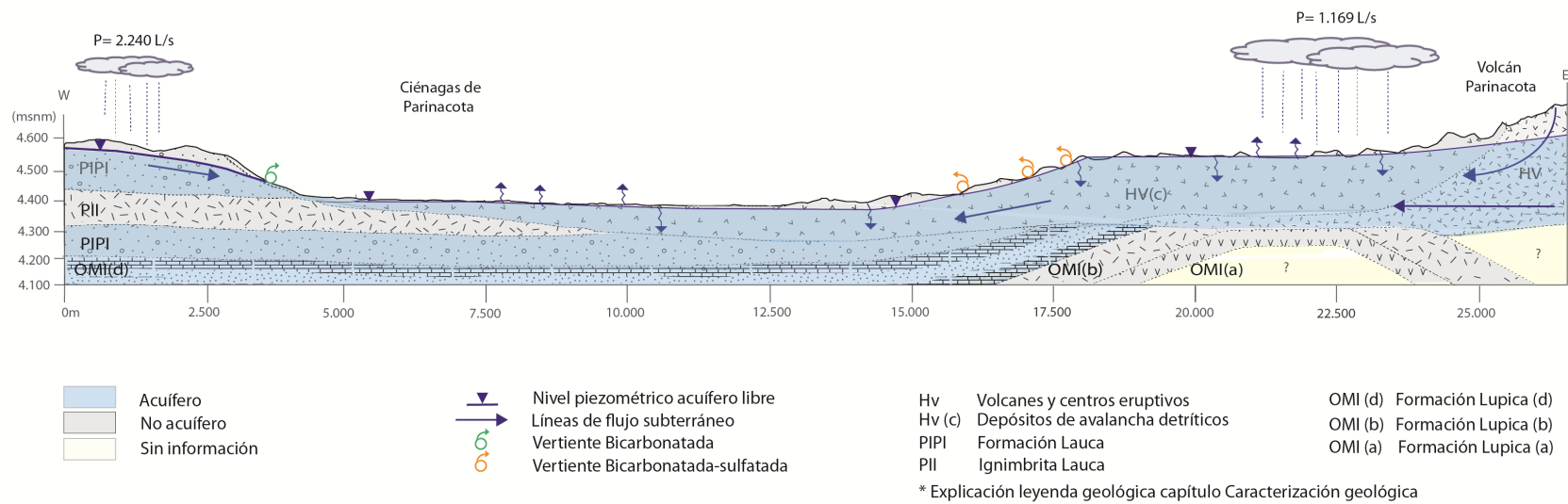


Figura 16. Perfil hidrogeológico A del sector ciénagas de Parinacota - lagunas de Cotacotani. Fuente: elaboración propia.

## SECTOR LAUCA ALTO

El complejo volcánico Choquelimpie-Ajoya representa la principal zona de recarga del sector y constituye un acuífero volcánico fracturado (UH2). Este complejo volcánico se caracteriza por tener acuíferos colgados que originan numerosas vertientes de agua fresca (bicarbonatada y muy diluida). Además alimenta subterráneamente al acuífero UH1 que está semiconfinado por el acuitardo UH4 en el centro de la cuenca.

El principal acuífero en el sector Lauca Alto está constituido por una unidad acuífera tipo UH1. Esta unidad la constituyen 10 m de espesor de depósito cuaternario asociado al río Lauca, 100 m de espesor de la parte inferior de la Formación Lauca tipo detrítica y al menos 150 m de Formación Lupica, OMI (d). Los depósitos cuaternarios están separados del acuífero inferior semiconfinado por 40-50 m de espesor de ignimbrita Lauca (UH4). La ignimbrita Lauca semiconfina al acuífero inferior, como verifican los pozos surgentes del MOP. La Formación Lupica (d) constituye un acuífero multicapa de 400 a 600 m de areniscas, fangolitas y calizas que se acuñan hacia el sur de este sector, llegando a desaparecer antes del anticlinal del sector Lauca Medio, **Figura**.

En este sector el Ministerio de Obras Públicas ejecutó en sus pozos una serie de pruebas de bombeo de gasto constante y de recuperación. Estos pozos fueron habilitados y ranurados en el tramo de la ignimbrita (UH4), y en el depósito aluvial de la Formación Lauca (UH1), por lo tanto los valores de transmisividad no están asociados exclusivamente al acuífero.

A partir de las pruebas de bombeo y de la información existente de los pozos se puede relacionar mayor transmisividad a los pozos habilitados y ranurados a mayor profundidad. El pozo 8 perforado hasta los 120 m de profundidad presenta una transmisividad de 335 m<sup>2</sup>/día mientras que el pozo 10 tiene 83 m de profundidad y 70 m<sup>2</sup>/día. Esto implicaría que los pozos con mayor profundidad bombean mayor espesor de acuífero semiconfinado (UH1), y por lo tanto de mayor transmisividad que la ignimbrita (UH4).

Las aguas subterráneas tienen dos direcciones de flujo, la componente principal tiene una dirección de flujo N-S y la componente secundaria NE-SW y NW-SE, desde las cotas más altas de los cerros que bordean este sector, especialmente el Complejo Volcánico Choquelimpie-Ajoya.

Desde el punto de vista relación río-acuífero, en este sector el río Lauca recibe agua del acuífero inferior semiconfinado a través de fracturas existentes en la ignimbrita que

permiten un flujo vertical ascendente que terminan en el río Lauca a través de un acuífero superior libre cuaternario. En Misitune existe una falla normal que hunde del bloque sur y provoca un cambio en la relación río-acuífero que causa una pérdida de caudal en el río Lauca de entre 40 y 200 L/s. Este fenómeno se interpreta como local y aguas abajo el río Lauca vuelve a ganar caudal por aportes del acuífero inferior semiconfinado.

En este sector, las aguas del río Lauca son sulfatadas, mientras que la muestra del pozo 6 del MOP y de la vertiente cercana a éste son aguas de tipo  $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^{2+}$  y se caracterizan por ser muy diluidas con concentraciones inferiores a 1 meq/L. A pesar de existir pocos metros entre vertiente-pozo y el río Lauca, estos tienen diferente quimismo que se interpreta como un sistema que opera con zonas de recarga distintas. De esta forma, el agua del río Lauca sería agua representativa del acuífero superior libre cuaternario y de zonas de escorrentía superficial más altas, mientras que las aguas del pozo y de la vertiente corresponden directamente al acuífero inferior semiconfinado.

Los análisis isotópicos apoyan esta hipótesis, mostrando un fraccionamiento diferente entre las aguas superficiales y subterráneas. Las aguas superficiales han sufrido un enriquecimiento isotópico por evaporación mientras que las aguas subterráneas presentan una ligera marca de interacción agua-roca, posiblemente por una influencia geotermal. La concentración de sílice analizada de cada sistema también se alinea con lo anterior.

La alteración hidrotermal que se ve reflejada en la composición hidroquímica de las muestras tomadas en el río Blanco y en quebrada Jara (mina Choquelimpie) es significativa, por ser aguas sulfatadas ácidas y con elevado contenido en hierro. Por un lado, el río Blanco se caracteriza por tener aguas ácidas sulfatadas, con alto contenido en hierro y sílice sin variaciones en el periodo muestreado. Por otro lado, la quebrada Jara pasó de tener aguas bicarbonatadas sódicas y pH neutro ligeramente alcalino en época seca (septiembre 2014) a aguas sulfatadas cálcicas y pH ácido en época lluviosa (abril 2015). Esto comprueba que los cerros Chantacolla y Choquelimpie han sufrido un grado de erosión muy elevado en época de lluvias que provoca que los minerales sulfurados estén expuestos al oxígeno del aire y sean oxidados, resultando sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$ , hierro ferroso y acidez como productos.

Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota

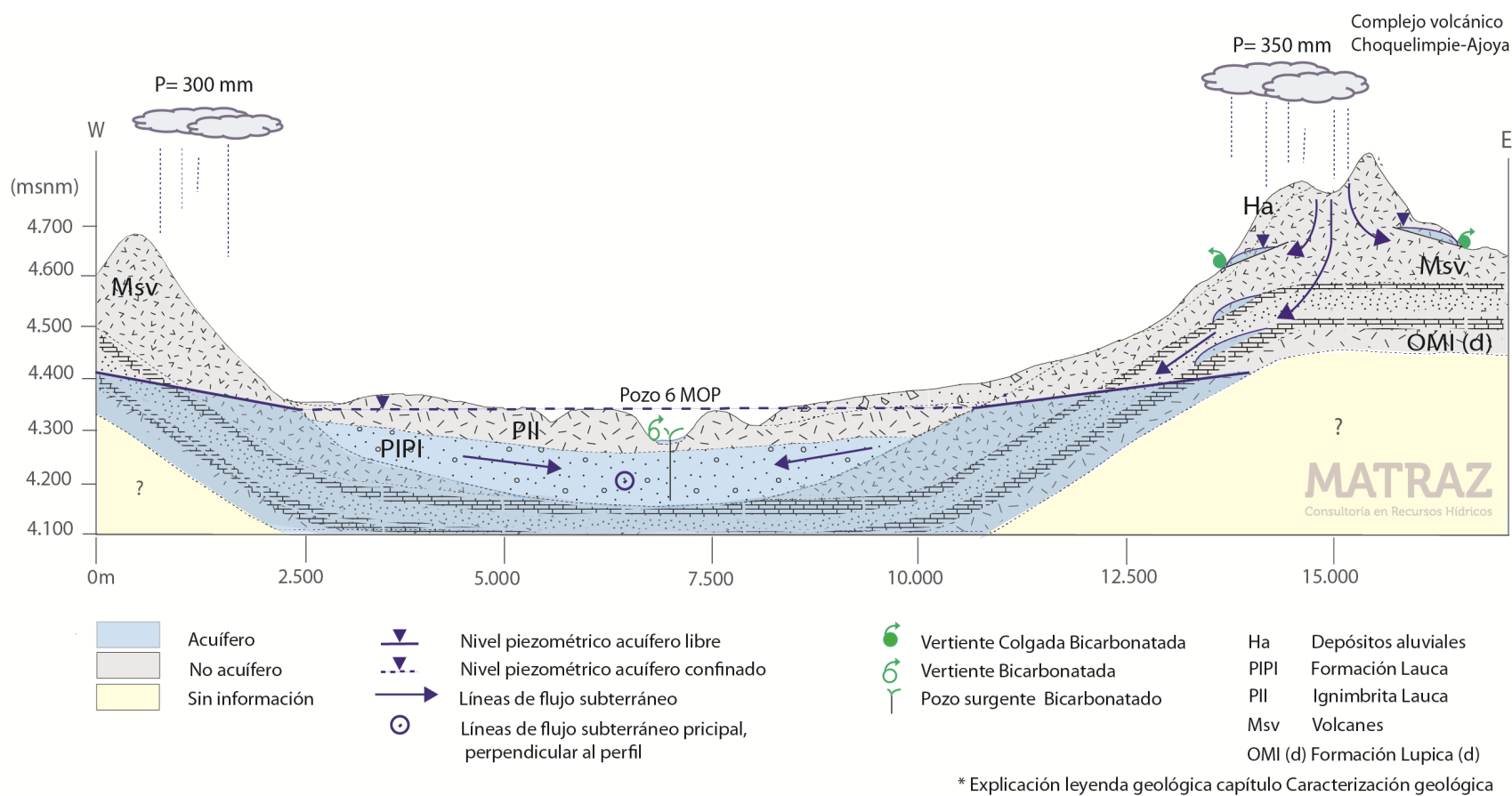


Figura 17. Perfil hidrogeológico B del sector Lauca Alto. Fuente: elaboración propia.

## **SECTOR LAUCA MEDIO**

Las precipitaciones infiltran en las cotas altas del sector y recargan al acuífero que se encuentra en la zona más deprimida. En el centro de la cuenca existe un anticlinal denominado anticlinal Queñuacollo. La estructura anticlinal y la erosión han producido el afloramiento de los materiales de la Formación Lupica (b) que constituyen una unidad impermeable tipo UH5 y, por lo tanto, una importante barrera hidráulica. Esta unidad se sitúa estratigráficamente por debajo de formaciones posteriores que constituyen acuífero como la Formación Lauca. La zona más cercana al eje del anticlinal causa en el sector sur el levantamiento de la unidad UH1 que en el Lauca Alto constituía el acuífero inferior semiconfinado, originando así una zona de transición que da lugar al acuífero libre característico del sector Lauca Bajo (**Figura 18**).

En este sector, el río Lauca sufre un leve incremento de caudal a medida que se aproxima a la barrera hidráulica que constituye el anticlinal: por las fracturas existentes en la ignimbrita, el adelgazamiento de la unidad semiconfinante, la erosión del río y la geometría profunda de la estructura del anticlinal que fuerza direcciones de flujo ascendentes. El río Lauca al cruzar el anticlinal no presenta interacción río-acuífero por fluir sobre una unidad impermeable tipo UH5. Aguas abajo del anticlinal, recibe un aporte de caudal proveniente en menor medida del acuífero libre UH1 y en mayor medida de escorrentía superficial, principalmente asociada a quebrada Chuba.

El río Lauca no sufre mucha variación en su composición hidroquímica exceptuando el gran cambio después de la confluencia de la quebrada Chuba, sufriendo un aumento en la concentración de cloruros. Este fenómeno puede asociarse a una influencia hidrotermal que existe en la quebrada Chuba, ya que su contenido en arsénico, boro, cloro, litio, potasio y sodio es de los más altos de la cuenca de estudio.

Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota

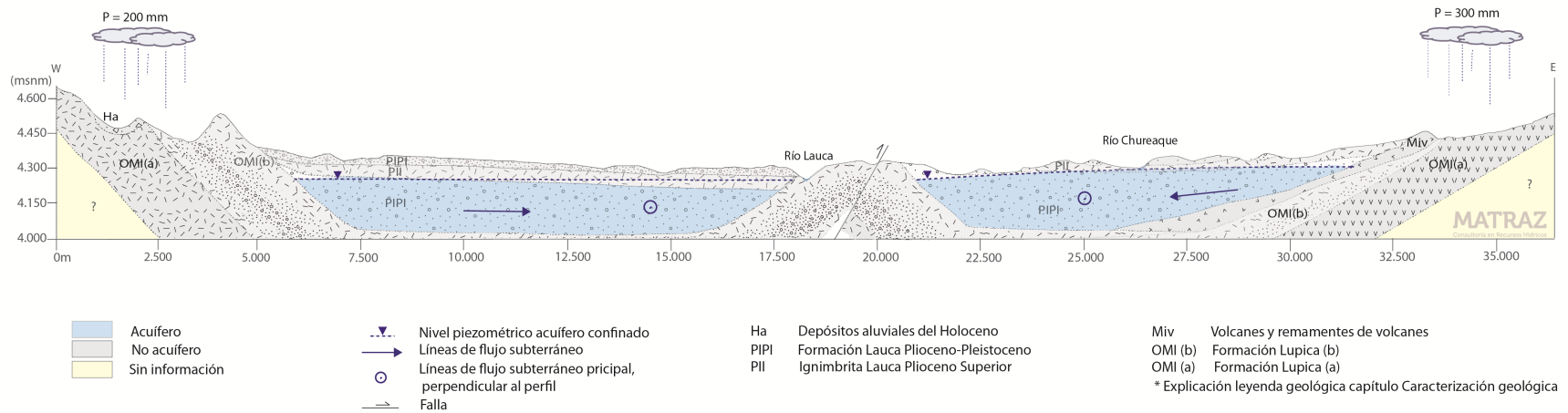


Figura 18. Perfil hidrogeológico C del sector del Lauca Medio. Fuente: elaboración propia.



## **SECTOR LAUCA BAJO**

La subcuenca del río Lauca en Japu corresponde a las zonas media y baja del río Lauca, en la que se produce la mayor entrada por precipitación en la cuenca del río Lauca, siendo 15.364 L/s, mientras que en la subcuenca del río Lauca en cierre es de 60 L/s. Las componente de salida salida por flujo superficial se calculó a partir de los datos registrados en la estación de aforo "Río Lauca en Japu" durante el periodo 1984-2013, obteniéndose un caudal promedio anual de 2.653 L/s. Por otro lado, el flujo subterráneo de salida en el cierre de la cuenca corresponde al caudal promedio anual de 1.078 L/s.

El río Chusjavidá nace a partir de una serie de quebradas de agua fresca que afloran en los acuíferos colgados del Complejo Volcánico de Choquelimpie-Ajoya. En la parte alta del río Chusjavidá destaca el afluente de quebrada Caliente, que tiene una vertiente termal en su cabecera, conocida como Terma de Chiriguaya. Las aguas de esta vertiente proceden de una circulación de flujo subterráneo profundo y ascendente a través de fracturas en el sector del anticlinal de Chiriguaya, presentando una temperatura superior a 40° y un alto contenido en elementos mayores, sílice, arsénico, boro y litio. El efecto de esta manifestación hidrotermal es local ya que no se observan anomalías en la hidroquímica del resto de la subcuenca.

En el sur de la cuenca se encuentra el río Paquiza\_ que nace en la laguna de Paquiza. Este río se caracteriza por tener aguas sulfatadas, con alto contenido en elementos mayores y evaporadas, lo cual demuestra el alto grado de evaporación desde lámina libre en la laguna Paquiza.

A partir del análisis detallado de los datos hidrológicos, se develó una zona con un comportamiento singular al interior del Sector Lauca Bajo. Por esta razón, se realizó una delimitación individual para la subcuenca hidrológica del río Guallatire en Guallatire, la cual presenta un marcado desbalance hídrico entre el caudal precipitado y el caudal aforado en la salida. El caudal superficial medio anual del río Guallatire es de 358 L/s y la precipitación media anual es de 310 L/s. Esto implicaría que superficialmente sale de la subcuenca más agua de la que entra en forma de precipitación. Además, la estación de la DGA Río Guallatire en Guallatire muestra una singular regulación de su caudal que no responde a las variaciones estacionales del resto de la cuenca, manteniéndose prácticamente constantes los caudales durante todo el año. Los elevados y relativamente constantes caudales del río Guallatire sugieren su dependencia directa de un sistema hídrico subterráneo mayor. Se cree que este

sistema acuífero estaría en conexión a través de fracturas con otras zonas de infiltración externas a la propia subcuenca y probablemente pertenecientes al complejo volcánico de los Nevados de Quimsachata.

A nivel de unidades hidrogeológicas, este sector es el más complejo de la cuenca por los pocos datos directos disponibles, la heterogeneidad presente y la profundidad de los depósitos. Los acuíferos del sector se distribuyen en las siguientes unidades hidrogeológicas (**Figura 19**):

- Un acuífero UH1. Este acuífero corresponde a los depósitos aluviales cuaternarios que cubren las laderas del volcán Guallatire.
- Un acuífero volcánico muy fracturado UH2. El volcán Guallatire a través de un sistema de fracturas conectadas constituye una zona de recarga importante en el sector sur de cuenca. En menor magnitud de caudal, también se encuentra el complejo volcánico de Choquelimpie-Ajoya.
- Un acuitardo UH3 asociado a los depósitos glaciares cuaternarios. En el contacto de esta unidad con el material volcánico del cerro Cortacollo nacen las quebradas Uncaliri y Culca.
- Un acuífero multicapa en la parte central del sector. La Formación Lauca se compone de 30 m de materiales de grano fino que constituyen la unidad hidrogeológica más superficial tipo acuitardo (UH3) en contacto directo con el río Lauca. Esta unidad se sitúa por encima de un acuífero más profundo tipo UH1 de 40 m de espesor. Sobre ésta subyace 230 m de Formación Lupica (d) que también representan una unidad tipo UH1. El basamento en este sector no fue identificado en la geofísica.
- Aguas abajo, el acuífero multicapa se acuña hacia una unidad acuífera de porosidad dual (primaria UH1 y secundaria UH2) constituida por 300m de espesor en la Formación Lupica (a). En la sección de salida, el basamento se encuentra a una profundidad de 300 m o mayor.

La relación río-acuífero hasta la confluencia Lauca-Guallatire se caracteriza por la ausencia de aportes significativos de aguas subterráneas a causa del acuitardo (UH3) en contacto directo con el río Lauca. Esta situación sólo fue modificada en la campaña de terreno que registró la época del año más lluviosa, a causa de la activación de quebradas que se encontraron secas el resto del año.

Sin embargo, desde la confluencia Lauca-Guallatire hasta la salida, la relación río-acuífero se caracteriza por la escorrentía superficial que recibe el río Lauca desde

tributarios como el río Guallatire, río Paquiza, quebrada Uncaliri y quebrada Culca entre las principales. Este aporte de escorrentía superficial que alimenta al río Lauca muestra un incremento durante los meses del invierno altiplánico. En el último tramo del río Lauca próximo a la salida a Bolivia, aunque el caudal del río sigue principalmente dominado por la escorrentía superficial, la influencia del acuífero de porosidad dual característico de este sector es mayor en comparación con el tramo anterior.

Desde el punto de vista hidroquímico, aguas abajo de la confluencia del río Guallatire las aguas del río Lauca son sulfatadas sódicas producto del gran aporte de caudal que entrega el Guallatire con esta huella química característica. Este quimismo no cambia sustancialmente hasta su paso a Bolivia y se caracterizan por tener una relativa alta concentración de elementos mayoritarios, principalmente destaca el incremento de  $\text{Cl}^-$  sufrido durante los últimos kilómetros de recorrido antes de su salida de la cuenca.

Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota

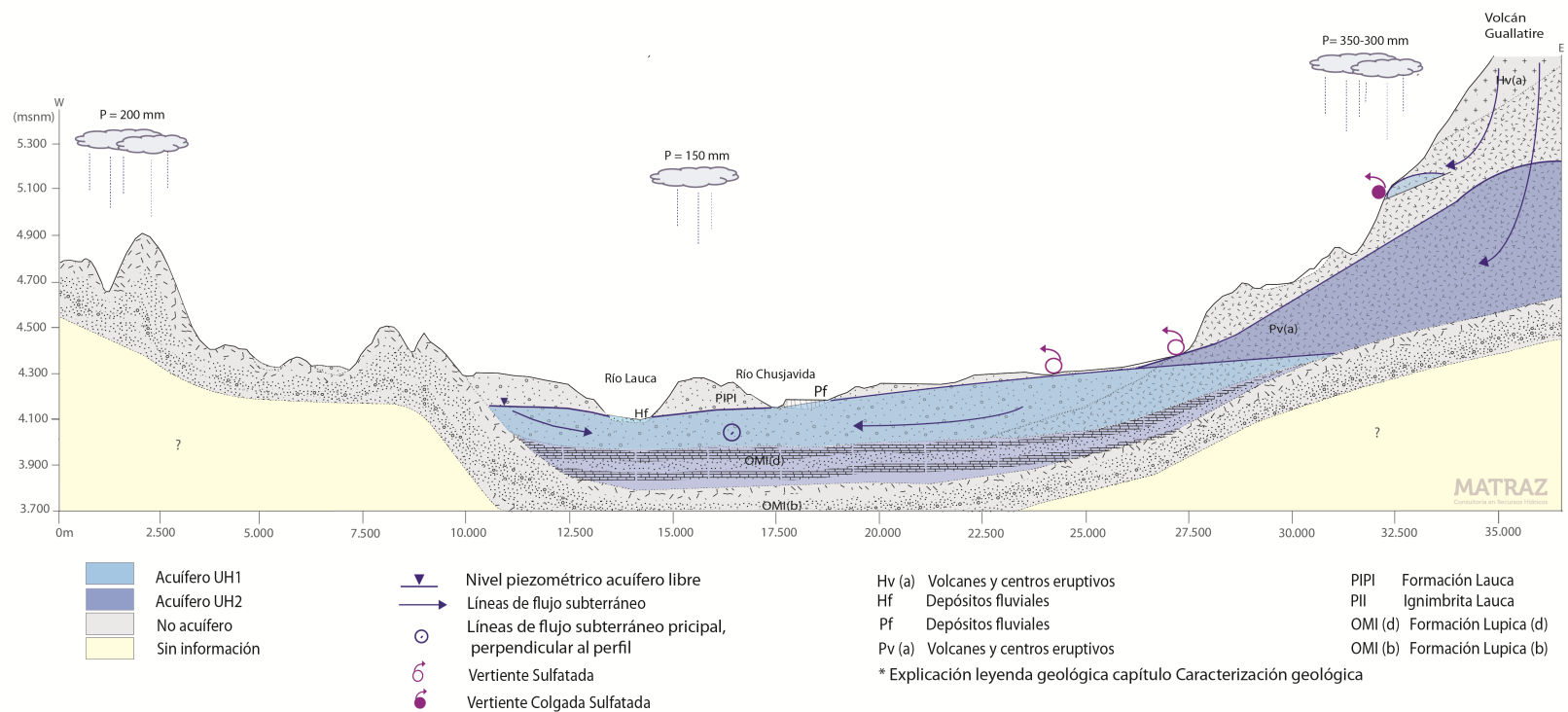


Figura 19. Perfil hidrogeológico D del sector Lauca Bajo. Fuente: elaboración propia.

## CONEXIÓN ENTRE CUENCAS

La conexión entre cuencas en el norte de Chile ha sido objeto de estudio en varias zonas del país con el objetivo de entender desajustes en los balances hídricos. Por esta razón, es que se ha incorporado como un elemento sustantivo del trabajo con las cuencas vecinas más cercanas y probables de establecer conexión con la cuenca del río Lauca.

Se analiza el potencial de conexión entre cuencas al observar indicios geomorfológicos que mostraban esta posibilidad para dos casos: límite de la cuenca del río Lauca por el NE con la cuenca del lago Chungará, y límite por el sur con la cuenca del salar de Surire. En algunos puntos, el límite topográfico entre cuencas no es tan marcado y las separan suaves portezuelos producto de la acumulación de sedimentos recientes. A continuación en la **Figura** se muestran los puntos donde se analizaron las posibles conexiones Chungará–Lauca, y Surire–Lauca. Entenderemos por *conexión hidráulica* entre cuencas como la continuidad hidráulica de agua subterránea entre dos cuencas y que entre éstas existe un gradiente hidráulico que hace que el agua circule de una a otra.

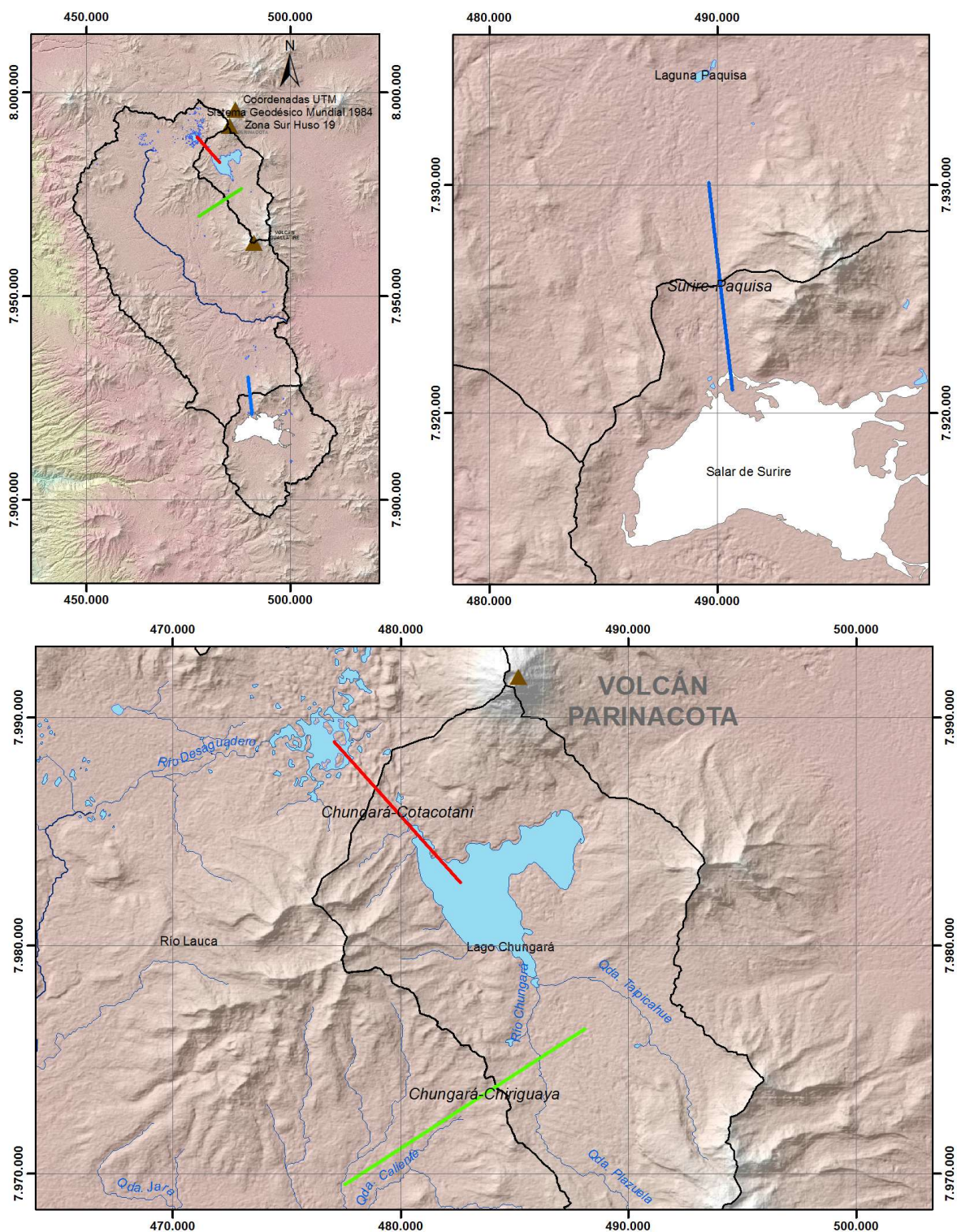


Figura 20. Ubicación sectores con potencial conexión entre cuencas. Fuente: elaboración propia.

## CUENCA DEL LAGO CHUNGARÁ

En la cuenca del lago Chungará se analizó la posible conexión en dos áreas: Un primer punto en el sector norte entre las lagunas de Cotacotani y el lago que da nombre a la cuenca, y un segundo punto en el sector oeste pasando por las termas de Chiriguaya.

### **SECTOR CHUNGARÁ – COTACOTANI**

La posible conexión entre las lagunas de Chungará y Cotacotani es la única que ha sido estudiada con antelación en la zona. HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) realizaron análisis con el fin de comprobar la posible conexión. Geomorfológicamente, ambas masas de agua están separadas aproximadamente 4,5 km por una divisoria de aguas que se eleva escasos 50 m por encima del lago Chungará. La superficie del lago Chungará se encuentra a 4561 m.s.n.m. y la superficie de la laguna de Cotacotani a 4543 m.s.n.m. generando un gradiente que, existiendo conexión hidráulica tendría un valor de 4‰, siendo un valor razonable en una zona de alta montaña. En superficie, las dos masas de agua están separadas por una serie de depósitos de brechas (unidad UH1, Acuífero detrítico) originados por el colapso del volcán Parinacota que conforman el lugar donde se asientan las lagunas de Cotacotani. El lago Chungará se encuentra en el contacto entre esta formación y la formación Pv (c) identificada como UH1 (Acuífero detrítico). Además en el sector sur del lago también se observa que afloran depósitos glaciales (Qg) y la unidad OMI (b) de la formación Lupica.

RISACHER (Risacher, 1999) realizó un balance hídrico del lago Chungará mediante cloruros. En este estudio a partir de la evaporación potencial, las precipitaciones, superficie del lago, [cl] de los aportes, [cl] en el lago, obtuvo una infiltración desde el lago Chungará de 32 l/s (5% de los aportes). También realizó el mismo cálculo para las lagunas de Cotacotani, en este caso argumentó que las pérdidas por infiltración no debían ser muy importantes.

HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) realizó un estudio isotópico en el que defiende una conexión entre cuencas. Según el balance de masas con  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  un 58% del volumen de agua que alimenta las lagunas de Cotacotani proviene del lago Chungará.

En la **Figura** se presenta la composición isotópica de las muestras presentadas por HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) y las tomadas por Matraz durante el proyecto. Se diferencian 3 grupos señalados con un círculo; en naranja las muestras de vertiente tanto de la cuenca del lago Chungará como de las lagunas de Cotacotani. En azul las muestras tomadas en las lagunas de Cotacotani y en verde en el lago Chungará.

A rasgos generales, las muestras de vertientes (naranja) se sitúan sobre la RML mientras que las muestras de las lagunas de Cotacotani y del lago Chungará están desplazadas respecto a la RML. Es posible trazar una recta que pase por los tres grupos de muestras. Esta recta tiene una pendiente de 5, equivalente a la de evaporación desde lámina libre. Sobre esta recta las muestras del lago Chungará estarían más evaporadas que las muestras de las lagunas de Cotacotani siendo una distribución lógica ya que la primera es una cuenca endorreica (mayor evaporación) y las lagunas de Cotacotani fluyen hacia el río Desaguadero (mayor renovación, menor evaporación).

No obstante, los cálculos presentados por HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) se basan en la hipótesis que la evaporación en las lagunas de Cotacotani es despreciable, lo cual inicialmente no parece razonable ya que existe bastante evidencia para confirmar lo contrario. Con esto, se argumenta que las lagunas de Cotacotani serían el resultado de la mezcla entre los aportes del lago Chungará y las vertientes que provienen del volcán estimando que el 58% de los aportes que alimentan las lagunas de Cotacotani provienen del lago Chungará y el resto de vertientes. A partir de la proporción de mezcla calculada realizó un balance en la laguna y estimó que el caudal aportante por el lago era de 250 L/s.

Si bien el análisis resulta adecuado, posee algunas inconsistencias en sus hipótesis que le restan validez al cálculo de los 250 L/s, no obstante es un valor razonable para las condiciones entre ambas cuencas.

Para profundizar en el conocimiento de subsuperficie, en la zona de conexión entre ambas cuencas se realizó un perfil TEM que se presenta en la **Figura 22** donde se distinguieron dos unidades acuíferas separadas por un nivel confinante.

El acuífero superior formado por depósitos de brechas del holoceno, se define como un acuífero detrítico de tipo UH1 de espesor reducido. Esta unidad se comportaría como unidad conectora entre las dos lagunas.

El acuífero inferior estaría formado por depósitos de avalancha de detritos Pv (c). Se trataría de un acuífero detrítico de tipo UH1, con porosidad primaria y un espesor aproximado de 125 m. Está separado del acuífero superior por un acuitardo (UH3) formado por depósitos glaciales que actúan como nivel confinante.



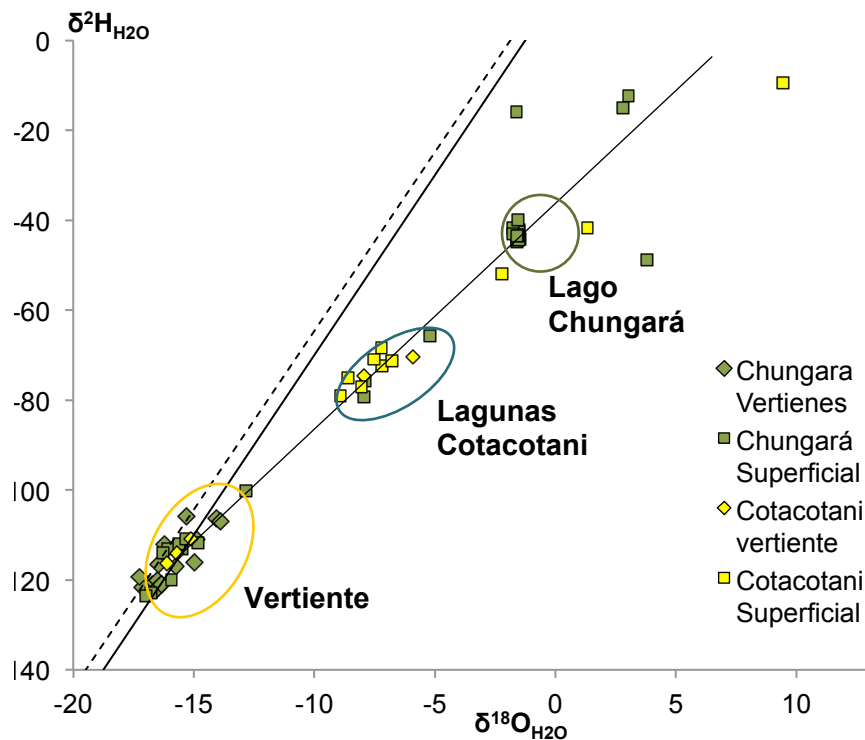


Figura 21. Distribución de las muestras isotópicas en la zona del lago Chungará y lagunas de Cotacotani. Las muestras fueron tomadas por HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) y Matraz. Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos mostrados por la geofísica, tanto el acuífero superior como el inferior recibirían agua desde el lago Chungará y esta se transmitiría en sentido este-oeste. En el acuífero superior, dada la diferencia de cota entre las dos masas de aguas, el nivel freático tendría una gradiente de aproximadamente 4‰ con un flujo que iría desde el lago Chungará hacia las lagunas de Cotacotani. El acuífero inferior tendría como referente piezométrico el nivel del lago Chungará.

Bajo las lagunas de Cotacotani, una falla atraviesa esta unidad confinante conectando ambos acuíferos. Se desconoce cuál es la relación de alturas piezométricas entre ambos acuíferos en este punto, por tanto, no es posible estimar en qué sentido se produciría el flujo vertical entre las unidades acuíferas.

Por último, el perfil TEM muestra una conexión entre cuencas a través de un acuífero superior formado por depósitos de brechas. Por debajo de este y separado por un acuitardo, se observa un acuífero confinado el cual podría estar conectado con el acuífero superior a través de una falla fácilmente visible en el perfil TEM.

Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota

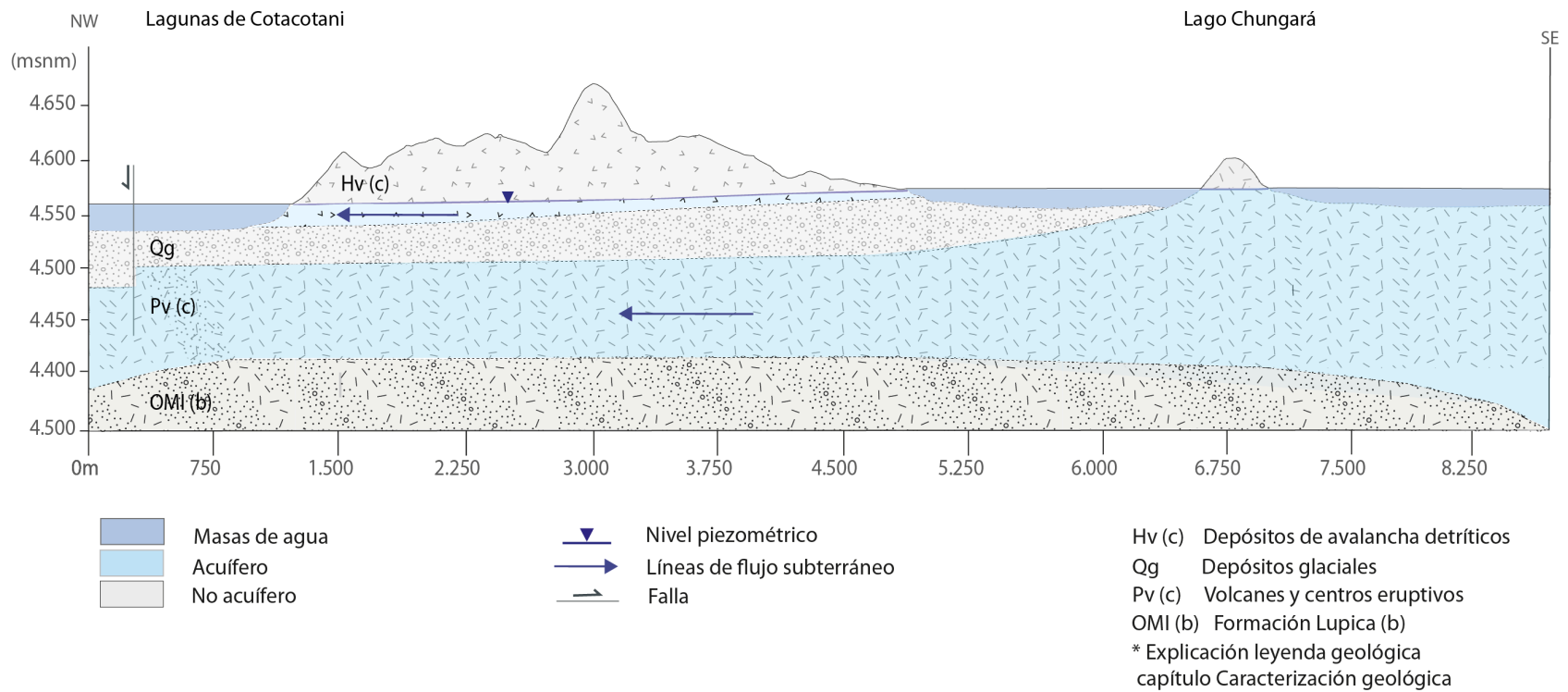


Figura 22. Perfil hidrogeológico del sector lago Chungará - lagunas de Cotacotani. Fuente: elaboración propia.

## **SECTOR CHUNGARÁ - CHIRIGUAYA**

El sector Chiriguaya se encuentra al suroeste de la cuenca del lago Chungará y al este de la cuenca del río Lauca. Se trata de un portezuelo de 4.800 m que separa ambas cuencas donde se observan manifestaciones hidrotermales como es el caso de las termas que dan nombre al sector. En este sector, no se conocen antecedentes que hablen de posible conexión y la única información disponible es un perfil TEM.

Como se observa en la **Figura 23**, la formación OMI (a) predomina en este sector siendo una formación acuífera (UH1 ó UH2) presente en ambas cuencas. No podemos hablar de conexión entre cuencas ya que no existe un gradiente hidráulico entre ellas. Actualmente, se observa una divisoria de aguas subterránea que evita que el agua se desplace de una a otra, no obstante al tratarse de un sistema en equilibrio natural, éste podría variar con el tiempo. No existiría una barrera hidráulica que las aisle una de otra.

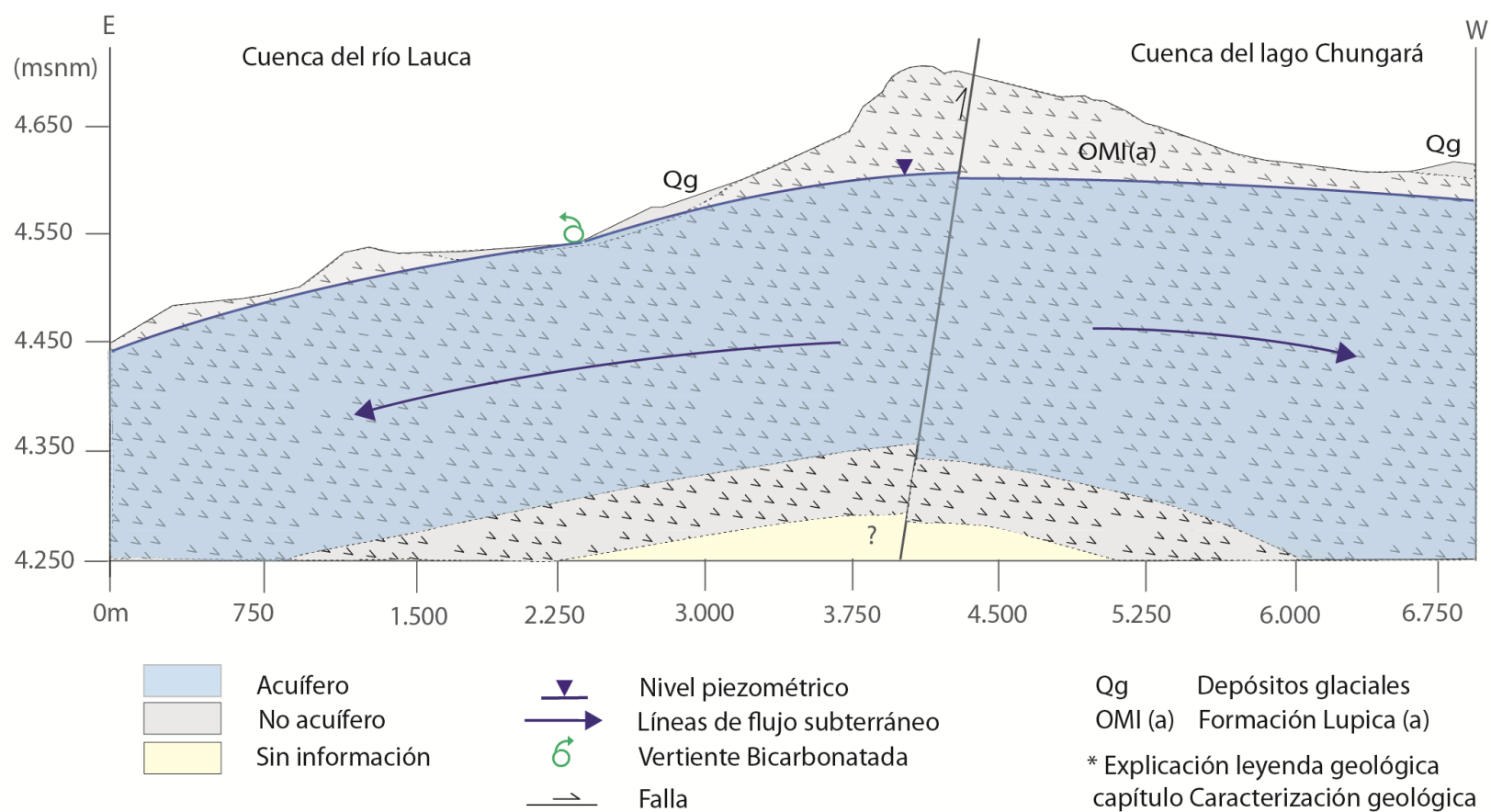


Figura 23. Perfil hidrogeológico del sector lago Chungará - Chiriguaya. Fuente: elaboración propia.

## **CUENCA SALAR DE SURIRE**

Al norte de la cuenca de Surire, un portezuelo que se eleva pocos metros sobre el salar divide ambas cuencas. Según GARCÍA *et al.* (García *et al.*, 2004), este portezuelo está formado por depósitos aluviales (Pa). Este tipo de sedimentos acostumbran a tener permeabilidades altas, y dada la geomorfología del puerto (éste se eleva 40 m en 4 km) podría ser una vía de conexión entre las dos cuencas.

Al interpretar la geofísica observamos que coincidiendo con la parte más alta del portezuelo, hay una formación volcánica impermeable (UH5) que divide subterráneamente las dos cuencas. De esta forma concluimos que no existiría conexión activa entre ambas zonas (**Figura 24**).

Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota

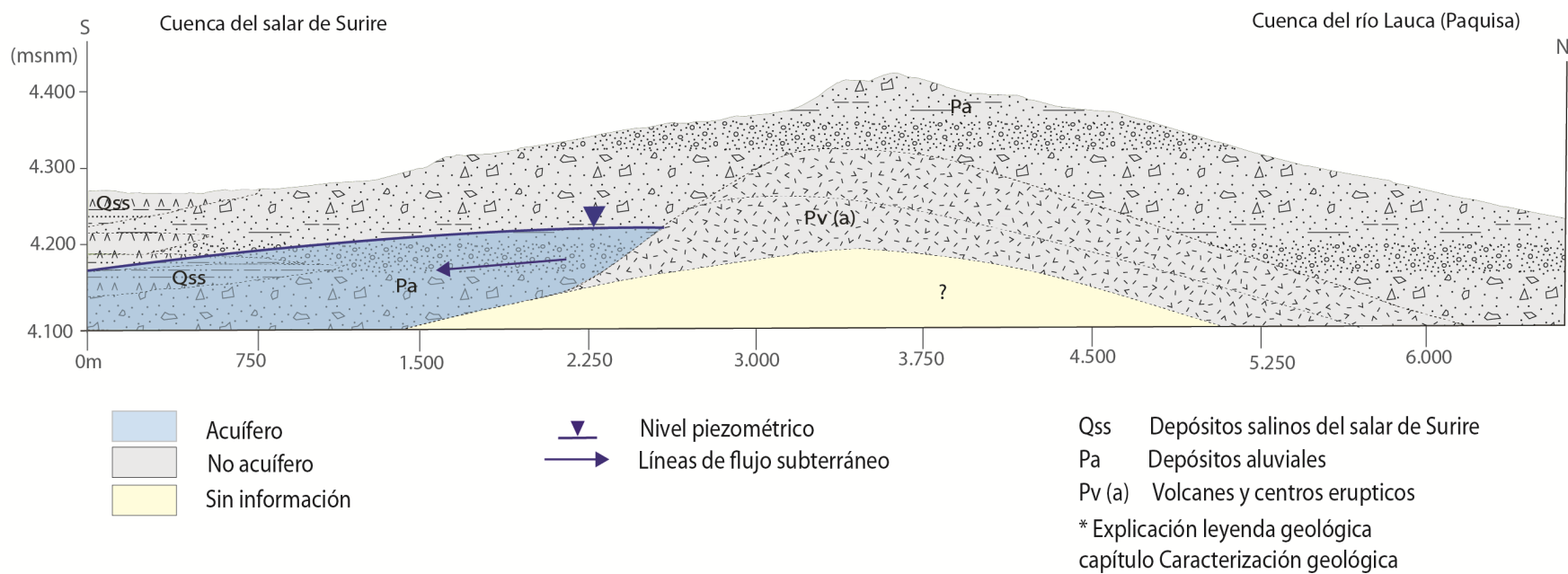


Figura 24. Perfil hidrogeológico del sector salar de Surire - Paquisa. Fuente: elaboración propia.

