



DIAGNÓSTICO DE LA SUBCUENCA APORTANTE AL EMBALSE CARITAYA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA

RESUMEN EJECUTIVO

NOVIEMBRE 2014



ESTUDIO BÁSICO “DIAGNÓSTICO DE LA SUBCUENCA APORTANTE AL EMBALSE CARITAYA”

RESUMEN EJECUTIVO

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	ANTECEDENTES.....	5
1.2	OBJETIVOS Y ALCANCES DEL ESTUDIO.....	5
2	RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES	6
3	MARCO CONCEPTUAL: ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	7
3.1	CLIMA DE LA REGIÓN.....	7
3.2	INFORMACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES Y FOTOS AÉREAS.....	7
3.3	MORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA DE LA ZONA.....	8
3.4	HIDROLOGÍA	9
3.5	HIDROGEOLOGÍA	11
3.6	HIDROGEOQUÍMICA.....	11
4	INFORMACIÓN LEVANTADA EN TERRENO	13
4.1	CAMPAÑA DE AFORO.....	13
4.2	MUESTREO HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO.....	14
4.3	CAMPAÑA GEOFÍSICA.....	14
5	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.....	14
5.1	DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA.....	14
5.2	PRECIPITACIONES	15
5.3	EVAPORACIÓN POTENCIAL.....	16
5.4	ANÁLISIS DE CAUDALES.....	16
5.5	ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	16
6	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	17
6.1	GEOLOGÍA SUPERFICIAL.....	17
6.2	GEOLOGÍA DE SUB-SUPERFICIE	17
7	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	20
8	CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA	23
8.1	DESCRIPCIÓN PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS (DESCRIPCIÓN RANGOS, TABLAS, PLANTA CE	23
8.2	CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA Y DESCRIPCIÓN ESPACIAL.....	24
8.3	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE AS Y B.....	25
8.4	ISOTOPIA.....	26
9	CARACTERIZACIÓN MEDIOAMBIENTAL	26
9.1	FLORA Y VEGETACIÓN	27
9.2	FAUNA TERRESTRE	29
9.3	FLORA Y VEGETACIÓN ACUÁTICA	29

9.4	IDENTIFICACIÓN DE BOFEDALES	31
9.5	MEDIO SOCIOCULTURAL	31
10	MODELO CONCEPTUAL	32
11	ALTERNATIVAS DE MEJORAS EN LA CALIDAD DEL RECURSO	35
11.1	SISTEMA DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE LAS AGUAS	35
11.2	ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 1: PLANTA DE TRATAMIENTO	40
11.3	ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 2. HUMEDALES ARTIFICIALES Y FITOREMEDIACIÓN	41
11.4	ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 3. VENTA DEL RECURSO A LA MINERÍA..	43
11.5	ESTIMACIÓN DE IMPACTOS EN LA PRODUCCIÓN	44
12	PARTICIPACIÓN CIUDADANA.....	47
13	CONCLUSIONES.....	49
14	RECOMENDACIONES	51

LISTADO DE TABLAS

Tabla 4-1: Resumen de campañas de terreno	13
Tabla 11-1 Parámetros para la estimación del diámetro de las tuberías	38
Tabla 11-2 Cubicación de la Conducción 1	39
Tabla 11-3 Cubicación de la Conducción 2.....	39
Tabla 11-4 Cubicación de la Conducción 3.....	39
Tabla 11-5 Costo de Inversión Alternativa 1	41
Tabla 11-6 Costo de Inversión Alternativa 2	43
Tabla 11-7: Sensibilidad o tolerancia al boro de cultivos agrícolas	45
Tabla 11-8: Caudal de riego requerido por cultivos tolerantes al boro.	46
Tabla 11-9: Análisis de productividad y precios de cultivos tolerantes al boro	46
Tabla 12-1: Programa del Taller de Participación Ciudadana	47

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Subcuenca en zona de estudio delimitada en un modelo digital de elevación (SRTM 90x90 m)	6
Figura 3-1: Geología 1:1.000.000 SERNAGEOMIN 2002	9
Figura 3-2: Red hidrográfica de la cuenca de Camarones	10
Figura 3-3: Esquema de la Cuenca del Río Camarones y lugares relevantes para el estudio de UTA (2010)	12
Figura 5-1: Subcuenca aportante al embalse Caritaya	15
Figura 6-1: Mapa geológico	18
Figura 6-2: Mapa geológico sector río Caritaya y lagunas Amuyo	19
Figura 7-1: Mapa hidrogeológico sector de estudio	21
Figura 7-2: Mapa hidrogeológico sector río Caritaya y Lagunas Amuyo	22
Figura 8-1: Perfil de conductividad del río Caritaya durante su paso por las Lagunas de Amuyo	23
Figura 8-2: Perfiles de temperatura y profundidad de las lagunas de Amuyo	24
Figura 9-1: Pisos vegetacionales (Modificado de cobertura Luebert y Pliscoff, 2009)	28
Figura 9-2: Domo de precipitados en Lagunas de Amuyo	30
Figura 9-3: a. Charco con tapete microbiano; b. Tapete microbiano c. Foto de Crustáceo tomada por UNAP (2011)	30
Figura 9-4: Zonas de humedales mapeadas	31
Figura 10-1: Mapa funcionamiento conceptual	34
Figura 11-1: Esquema conceptual de sistema de mitigación	36
Figura 12-1: Asistencia primer Taller de Participación Ciudadana	48

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La presente consultoría corresponde a la elaboración del Estudio Básico del proyecto “Diagnóstico de la Subcuenca Aportante al Embalse Caritaya”, encargado a GeoHidrología (GeoH) Consultores por la Comisión Nacional de Riego (CNR) del Ministerio de Agricultura. El estudio tiene como finalidad establecer las fuentes de contaminación de las aguas aportantes al embalse, la confección de un modelo hidrogeológico conceptual de funcionamiento de la subcuenca (ver zona de estudio en la Figura 1-1), proponer medidas de mitigación/remediación para mejorar la calidad de las aguas embalsadas y la construcción de una estación fluviométrica.

La cuenca del río Camarones cuenta con una obra de regulación, el embalse Caritaya (capacidad de 42.171.000 m³) construido en la década del 30 y reparado el año 2009 por la DOH. El río Camarones recibe aporte, desde la parte superior de la cuenca, fundamentalmente de los tributarios Ajatama y Caritaya. El embalse Caritaya, aumenta la seguridad y disponibilidad de los recursos hídricos, no obstante las aguas son de mala calidad dados sus altos contenidos de arsénico (As) y boro (B). El estudio DGA-UTA (2010) detectó que uno de los principales focos de contaminación de As y B del río Caritaya, corresponden a las lagunas de Amuyo, ubicada en una de las subcuencas aportante al embalse Caritaya.

La zona de estudio comprende la subcuenca localizada inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya. La subcuenca de estudio tiene un largo W-E de 22 km y un ancho N-S de 12 km aproximadamente, con un área de 362 km² (estimada a partir de Modelo Digital de Elevación SRTM 90x90, UTM 19° S, WGS 84). Especial foco tienen el entorno de las lagunas de Amuyo y el tramo del río entre las lagunas y el embalse. La subcuenca en estudio es parte de los terrenos de la Comunidad Indígena de Mulluri.

La subcuenca se ubica en la comuna de Camarones en la I región de Tarapacá, cerca del límite con la región de Arica y Parinacota. Esta cuenca cuenta con una obra de regulación, el embalse Caritaya (capacidad de 42.171.000 m³) construido en la década del 30 y reparado el año 2009 por la DOH. El río Camarones recibe aportes, desde la parte superior de la cuenca, fundamentalmente de los tributarios Ajatama y Caritaya.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES DEL ESTUDIO

El objetivo general del proyecto en su totalidad es caracterizar la hidrología, hidrogeología y geoquímica de la subcuenca aportante al embalse Caritaya, siempre considerando que el objetivo es comprender el funcionamiento de las fuentes de contaminación natural de las aguas.

Los objetivos específicos del estudio son:

- Caracterizar hidrológica e hidroquímicamente la subcuenca.
- Caracterizar geológicamente la cuenca y la subcuenca.

La búsqueda se centró principalmente en obtener información sobre los aspectos relevantes de la zona y que permiten caracterizarla con miras a comprender el funcionamiento de las fuentes de contaminación de las aguas, es decir, información referente a:

- Hidrología (caudales, precipitaciones, etc.).
- Morfología (red drenaje, pendientes, tipo suelos, etc.).
- Geología e hidrogeología (formaciones geológicas, acuíferos, estratos, niveles de aguas subterráneas, etc.).
- Calidad de aguas y geoquímica (análisis de calidad de aguas, química de los suelos y calidad de aguas subterráneas, etc.).
- Fluvial (secciones, pendientes, granulometría, dinámica, etc.).
- Imágenes satelitales y fotografías aéreas.
- Situación técnica y legal de los derechos de aprovechamientos de aguas (DAA) y de las organizaciones existentes ligadas a la distribución del recurso hídrico (OUAs).

Como resultado, se identificaron 26 antecedentes, cuya información fue revisada, analizada y sistematizada en fichas que contienen los siguientes campos: fuente, autor principal, coautores, resumen del contenido, lugar físico donde están los antecedentes, año de publicación, palabras claves y otros datos de interés.

3 MARCO CONCEPTUAL: ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

En base a la recopilación de antecedentes y base de datos, se presenta de manera preliminar el marco conceptual, en el que se emplazan las lagunas de Amuyo y la subcuenca de estudio.

3.1 CLIMA DE LA REGIÓN

La región de Arica y Parinacota presenta un clima atípico para la latitud, con ausencia casi total de precipitaciones en gran parte de su territorio. Estas sólo se registran en la zona alta, referentemente en época estival, fenómeno denominado invierno altiplánico

3.2 INFORMACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES Y FOTOS AÉREAS

En relación a observar la variación geomorfológica temporal, se han colectado diversas imágenes satelitales y fotos aéreas, cuyas fuentes han sido: Google Earth, Servicio Aerofotogramétrico (SAF) y Nasa.

En este contexto, no se han encontrado grandes diferencias en el sector de las lagunas de Amuyo, sólo pequeñas diferencias en lo que se refiere al cauce principal del río Caritaya y el sector del embalse. A continuación se lista la información recolectada y analizada. Se detalla la fecha de captura satelital o aérea de la imagen.

3.3 MORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA DE LA ZONA

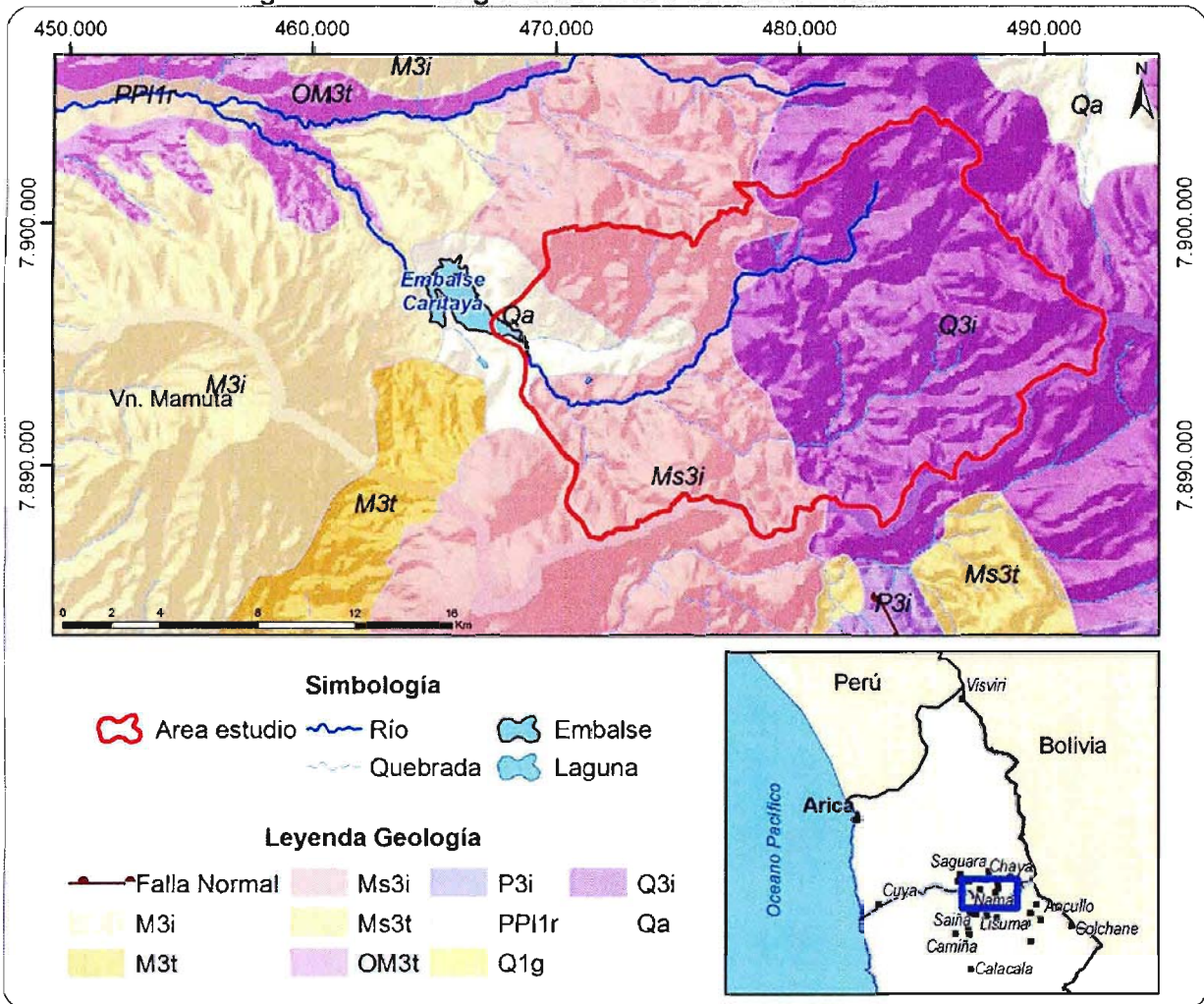
El área de estudio, corresponde a la subcuenca del río Caritaya aguas arriba del embalse con el mismo nombre, está localizada entre la Precordillera y la Cordillera Occidental. La subcuenca de estudio tiene un largo W-E de 22 km y un ancho N-S de 12 km aproximadamente, con un área de 280 km².

Las alturas más bajas se ubican en la base del río Caritaya a 3650 msnm al oeste del área de estudio y las máximas elevaciones superan los 5.000 msnm en el escarpe que se extiende hacia el sur de los volcanes Chuquinanta y Mulluri, ubicados al norte del área de estudio. Hacia el oeste dominan pendientes suaves de 1° a 2°, en el relleno aluvial y fluvial. Mientras que en el límite este de la cuenca los cerros presentan pendientes cercanas a los 25°.

De acuerdo a SERNAGEOMIN 2002, en el área de estudio afloran tres unidades descritas como: centros y secuencias volcánicas del Mioceno (M3i), depósitos volcánicos del cuaternario (Q3i) y depósitos aluviales del cuaternario (Qa). Sin embargo, en una descripción regional de este informe, se presentan siete unidades que afloran en el área de estudio (ver Figura 3-1).

Importante es destacar que la actividad volcánica en la Precordillera oriental y el Altiplano occidental produce secuencias Miocenas Medias y Cuaternarias de lavas basálticas y andesíticas, depósitos de lahares, y ignimbritas que dan origen a la mayoría de los depósitos del área de estudio. Estos depósitos incluyen los depósitos de los volcanes El Márquez, Mamuta y otros volcanes del arco, presentes al norte y al oeste del área de estudio, respectivamente. Asociados con la actividad volcánica existen depósitos de oro exhalativos, los cuales han sido incluidos en la franja metalogénica del Altiplano-Cordillera Occidental de los Andes Centrales.

Figura 3-1: Geología 1:1.000.000 SERNAGEOMIN 2002

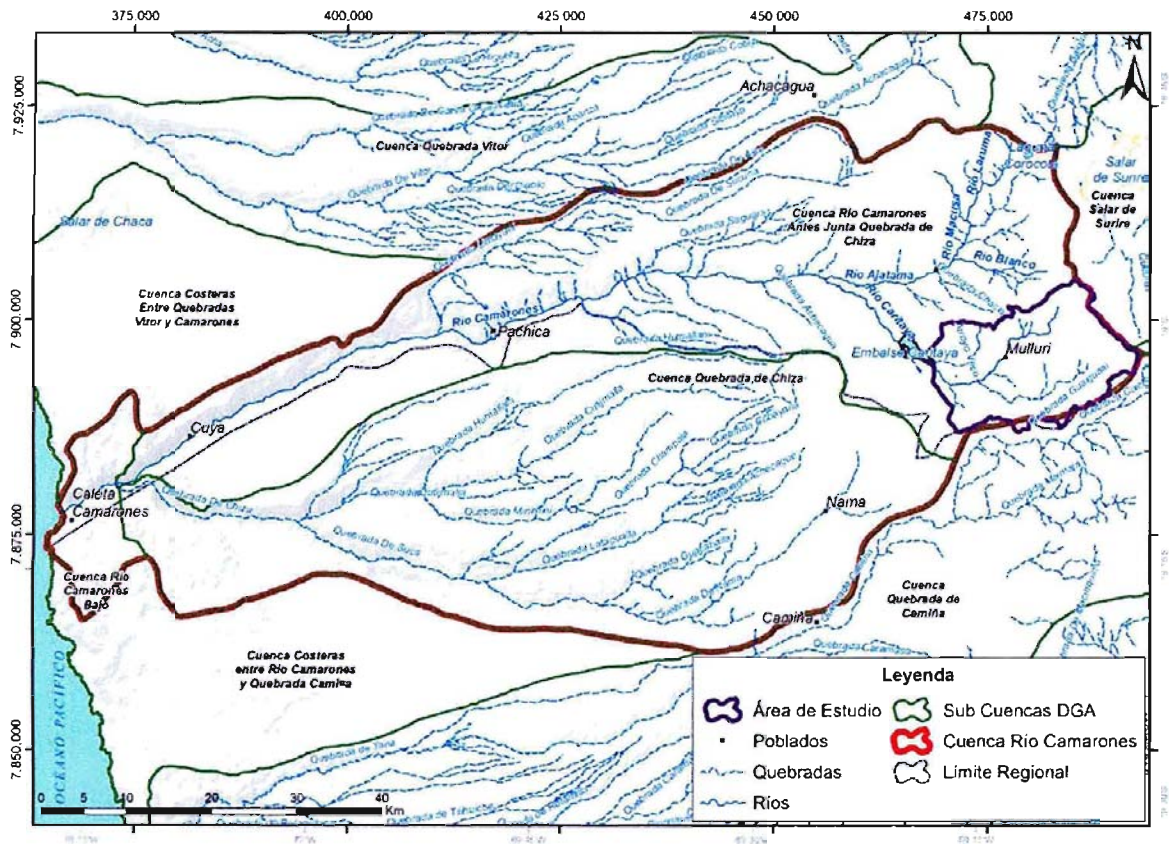


Fuente: SERNAGEOMIN, 2002

3.4 HIDROLOGÍA

La cuenca del río Camarones se encuentra en su mayor parte en la XV región de Arica y Parinacota, situándose al sur de ésta y al norte de la I Región. Esta hoya hidrográfica drena un área total de 4.681 km² y limita con las siguientes cuencas: Al norte con quebrada Vitor o Codpa y Costeras entre quebradas Vitor y Camarones; al sur limita con la quebrada de Tana o Camiña y al oriente limita con el salar de Surire (Ver Figura 3-2).

Figura 3-2: Red hidrográfica de la cuenca de Camarones



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a Niemeyer (1980), la hoya del río Camarones tiene un régimen permanente, sin embargo, en sequías prolongadas suelen sumirse sus aguas en las arenas en su curso inferior.

Su principal curso de agua corresponde al río Camarones, el que nace en Arepunta de la reunión de los ríos Ajatama y Caritaya, por el norte y sur, respectivamente. El río Camarones desarrolla su curso en dirección suroeste, en el que recibe los aportes intermitentes de las quebradas Saguara y Umayani, ambas por el norte, y de la quebrada de Chiza por el sur. Finalmente después de recorrer aproximadamente 97 km en un valle estrecho aluvial con un ancho variable entre 25 y 700 m, desemboca en el océano pacífico en el sector denominado Caleta Camarones.

Tal como se señaló en la descripción de la hidrografía de la cuenca del río Camarones, la hoya se caracteriza por presentar flujos permanentes a lo largo de todo el año, en el río Camarones y sus dos formadores: ríos Ajatama y Caritaya. En los otros tributarios del río principal el flujo es ocasional y se acentúa en épocas de lluvias, es decir, entre los meses de diciembre y marzo.

3.5 HIDROGEOLOGÍA

El área de estudio presenta escasos antecedentes de la hidrogeología. El estudio Mapa Hidrogeológico de Chile escala 1:2.500.000 del año 1986 realizado por la empresa IPLA, presenta en general las características hidrogeológicas regionales. El estudio describe que la potencialidad hidrogeológica en el sector de la provincia altiplánica está ligada al clima y a la litología.

El hecho de existir precipitaciones estivales, unido con una cubierta en su mayoría volcánica terciaria-cuaternaria, con permeabilidad secundaria debido al fracturamiento permite la infiltración del recurso y transmisión a sectores más bajos. Estos sectores generalmente provistos de relleno cuaternario no consolidado volcanoclástico de tipo aluvial o fluvial almacenan el recurso y permiten el acceso a él a través de pozos. Frecuentemente se detecta la presencia de arsénico (aparentemente ligado a la actividad volcánica) y el boro, en aguas superficiales como subterráneas. Sistemas de escurrimiento superficial cerrado, subterráneamente estarían interconectadas a través de acuíferos. Se estima que el recurso renovable de estos sistemas cerrados está limitado a la descarga por evaporación que se produce desde los salares.

El sistema regional corresponde a cauces transversales con respaldo altiplánico y salida al mar. Los acuíferos están constituidos por relleno cuaternario fluviales en los lechos de los ríos. Estos acuíferos no confinados tienen espesores no superiores a 200 m. La alimentación está directamente relacionada con los ríos (IPLA, 1986).

3.6 HIDROGEOQUÍMICA

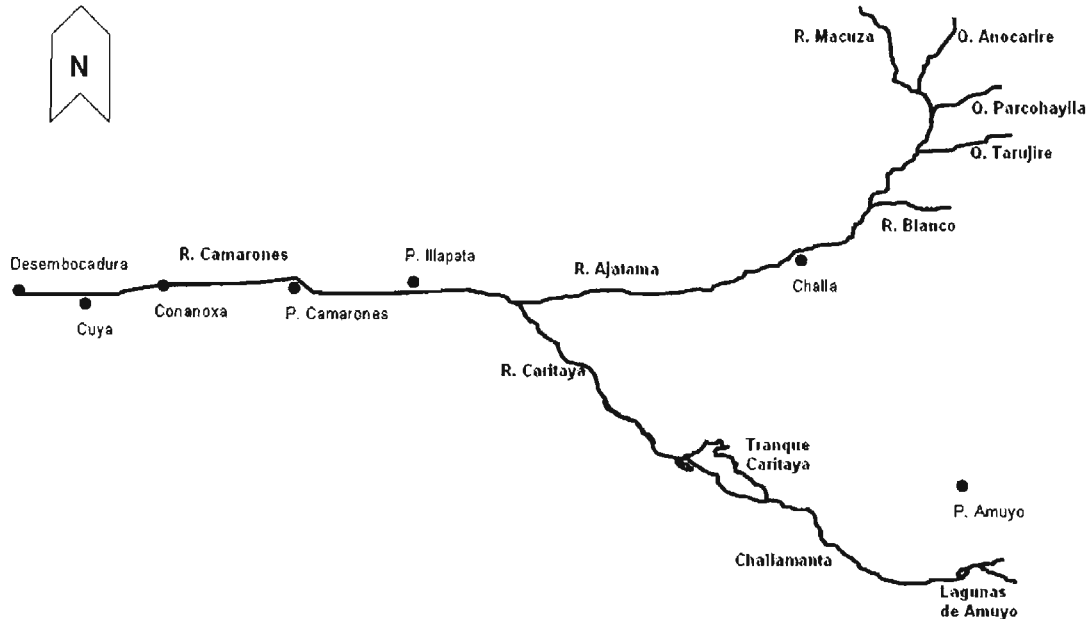
El marco hidrogeoquímico que se describe en el informe se basa en una síntesis realizada al estudio denominado: "Cuenca de Camarones: Identificación y caracterización de fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: rol del embalse Caritaya" (UTA 2010). El estudio tuvo como objetivo caracterizar espacialmente la variabilidad en la composición fisicoquímica de las aguas y sedimentos a lo largo del cauce del río Camarones y de sus principales afluentes, identificando a aquellos que representen entradas importantes de elementos o especies químicas críticas al río Camarones.

El río Caritaya, principal afluente al embalse Caritaya, presenta altas concentraciones de arsénico y boro, dado los aportes de las quebradas del margen sur, de las lagunas de Amuyo y por la incorporación de elementos químicos provenientes de la lixiviación o disolución de minerales durante su tránsito aguas arriba de las lagunas de Amuyo. Estas fuentes de contaminación presentan conductividades eléctricas entre 15.240 y 21.180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un alto contenido de arsénico (mayor a 15 mg/l) y altas concentraciones de boro (sobre los 100 mg/l).

Los cursos de agua con los niveles más bajos de arsénico boro y sales disueltas fueron localizados en el río Ajatama y corresponden a los afluentes: Macuza, Anocarire y río Blanco (Figura 3-3). En contraposición, los niveles más altos de arsénico, boro y sales disueltas en la cuenca fueron asociados al río Caritaya y sus afluentes. Los puntos de más conflicto se ubican en el área de las lagunas de Amuyo, lugar en que se encuentran las denominadas:

laguna Roja, Verde y Amarilla (lagunas de Amuyo), que representan una fuente puntual importante de ingreso de elementos al río Caritaya.

Figura 3-3: Esquema de la Cuenca del Río Camarones y lugares relevantes para el estudio de UTA (2010)



Fuente: UTA, 2010

Las lagunas de Amuyo corresponden a afloramientos hidrotermales con niveles elevados de arsénico, boro y sales disueltas. Las aguas de estas lagunas son incorporadas al curso principal del río Caritaya incrementando sus niveles de elementos disueltos y por consiguiente disminuyendo su calidad. En términos generales, las aguas superficiales muestreadas son aguas cloruradas sódicas, son frescas en el Río Atajama y salobres en los ríos Camarones y Caritaya. Las aguas saladas de las lagunas de Amuyo son del tipo cloruradas sódicas.

Se pudo establecer que las aguas del río Caritaya a través de su paso por el embalse Caritaya, mantienen intactos sus niveles de sales y algunos elementos/especies importantes desde el punto de vista agronómico, como es el caso del boro, por lo que en la práctica el agua que se embalsaría tendría una calidad equivalente a la que posee el río en la actualidad.

La operación del embalse, además de acumular agua, permite el depósito de sedimentos arsenicados, siendo necesario el establecimiento de procesos de gestión relacionados al manejo de estos materiales.

Lo que ocurre con el embalse Caritaya, en donde mediante un proceso de remoción pasiva el arsénico es abatido con una eficiencia en torno al 24%. De acuerdo al agua que ingresa al embalse Caritaya (Challamanta), ésta posee una concentración de 3,13 mg/l As (con un caudal 395,6 l/s) y en la salida presentan una concentración de 2,52 mg/l As. Este proceso de remoción es atribuible al mayor tiempo de residencia, bajo condiciones de baja

turbulencia, con que dispone el agua que ingresa durante su tránsito a través del embalse. Este hecho permite que el embalse se comporte como un sedimentador del material en suspensión presente en las aguas del río. Los principales elementos/especies removidos por este proceso de sedimentación son el arsénico y la sílice, junto a una disminución en el parámetro turbiedad (directamente relacionada con el material en suspensión).

4 INFORMACIÓN LEVANTADA EN TERRENO

Para la confección de un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca de estudio, se programaron distintas campañas en terreno para levantar información que complemente la existente.

Primero se realizó una campaña en diciembre de 2013 cuyos objetivos fueron conocer el terreno para planificar los trabajos futuros y complementar los antecedentes geológicos recopilados con una inspección de campo.

Se planificaron además tres campañas durante los meses de enero, marzo y mayo de 2014, para la medición de aforos en distintos puntos de la cuenca de estudio, y muestreo hidroquímico e isotópico. Por efectos del invierno altiplánico, la campaña fallida del mes de enero no se pudo realizar debido a los cortes de caminos provocados por las lluvias. En la Tabla 4-1 se presentan los puntos aforados y muestreados durante ambas campañas.

En paralelo, durante el mes de marzo se realizó la campaña geofísica a cargo de la empresa Geodatos S.A.I.C.

A fines de abril la empresa Teknoriego realizó una visita de terreno para levantar la información topográfica del eje hidráulico aguas arriba y debajo de la localización presupuestada para la estación fluviométrica.

Tabla 4-1: Resumen de campañas de terreno

Nombre en el texto	Objetivo	Mes de realización
Campaña Geológica	Descripción geológica	diciembre 2013
Campaña fallida	Aforos y muestreo hidroquímico	enero 2014
Primera Campaña	Aforos y muestreo hidroquímico	marzo 2014
Segunda Campaña	Aforos y muestreo hidroquímico	mayo
Campaña Geofísica	NanoTEM y Tomografía	marzo y Abril 2014
Campaña Estación fluviométrica	Topografía eje hidráulico	abril 2014

Fuente: Elaboración propia

4.1 CAMPAÑA DE AFORO

La estimación de los caudales pasantes se realizó por medio de la metodología denominada "área-velocidad". El caudal de una sección de aforo se calcula por medio de la sumatoria del producto entre el área de un conjunto de subsecciones (1 a N) y la velocidad promedio de

escurrimiento en la subsección correspondiente. La sección a aforar cumplió con los aspectos indicados en las Normas Hidrométricas de la DGA (1978).

4.2 MUESTREO HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO

Los datos hidroquímicos corresponden a muestras obtenidas mayoritariamente aguas arriba del embalse Caritaya en dos campañas de terreno. En la primera campaña se tomaron 19 muestras y en la segunda 16, de cursos de aguas superficiales, lagunas y el embalse, las cuales fueron analizadas por el laboratorio ALS.

Además, se recolectaron 6 muestras para análisis de isótopos estables de Oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$) y Deuterio ($\delta^2\text{H}$), focalizado entorno a las lagunas de Amuyo las cuales fueron enviadas al laboratorio de Isótopos Medio Ambientales de la CCHEN. En términos generales las muestras no fueron filtradas *in situ*, con excepción de los puntos RC-5, Lag-1 y RC-9 para los cuales en la primera campaña se recolectó una muestra filtrada y otra sin filtrar para análisis hidroquímico. El objetivo de la duplicidad de muestras fue investigar la capacidad de transportar metales y metaloides en disolución entorno a la descarga de las lagunas de Amuyo.

4.3 CAMPAÑA GEOFÍSICA

Se realizó un estudio de resistividad mediante las técnicas de Transiente Electromagnético (TEM), en el modo NanoTEM, y Tomografía Eléctrica. Las estaciones se distribuyen en 5 perfiles de NanoTEM y 2 perfiles de Tomografía, situados en el sector de las lagunas de Amuyo.

El objetivo del estudio fue determinar las características geoelectricas de la sub-superficie que permitan obtener información de la estratigrafía, del nivel freático y principalmente de estructuras geológicas que pudieran condicionar la dinámica de aguas subterráneas.

5 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

5.1 DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA

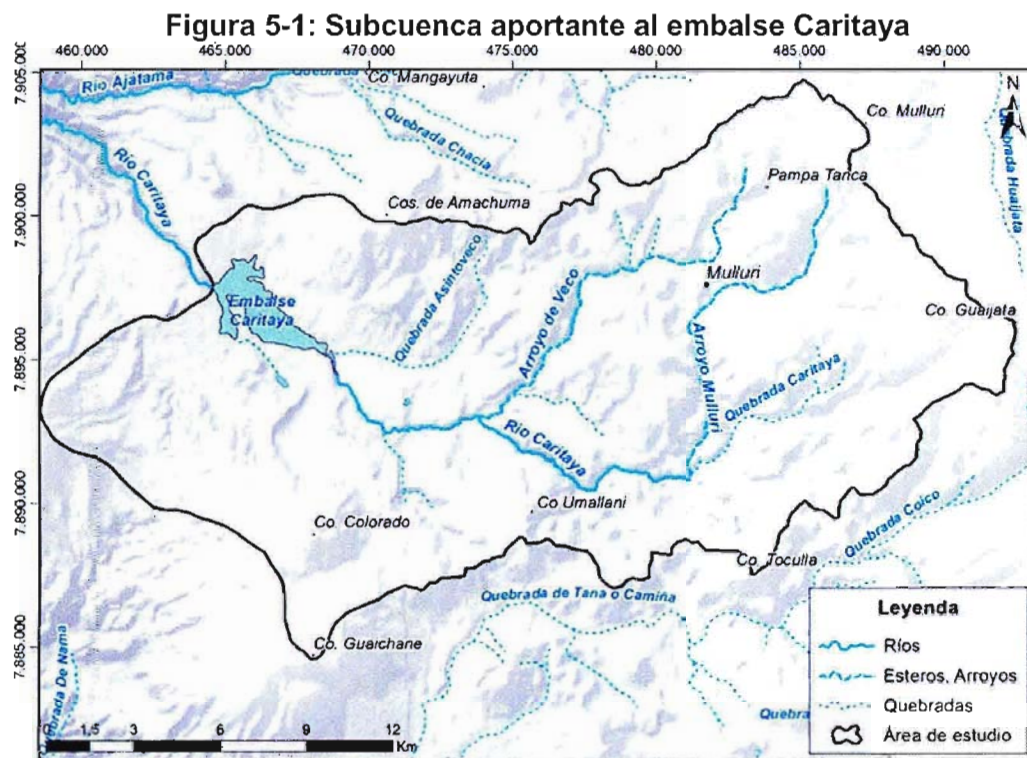
La cuenca aportante al embalse Caritaya corresponde a una subcuenca del río Camarones ubicada en la comuna de Camarones, en el límite sur de la región de Arica y Parinacota. Tienen una superficie de 362 km² y se ubica entre los paralelos 18°55' y 19°7' de latitud sur.

El embalse es recargado por el río Caritaya, el cual corresponde al cauce principal de la subcuenca que drena de oriente a poniente y sus nacientes se localizan en el margen oeste de los volcanes Mulluri y Guaijata (Figura 5-1). El río Caritaya nace en la unión de los cauces permanentes de la quebrada Caritaya con el arroyo Mulluri.

Su principal tributario corresponde al arroyo Veco (Yustacaba), el cual confluye a 350 m aguas arribas del paso del río Caritaya por las lagunas de Amuyo. Las lagunas de Amuyo es

una fuente de recarga de aguas hidrotermales al río. Un tributario de menor importancia corresponde a la quebrada Asintoveco la cual presenta un régimen esporádico.

Otros afluentes permanentes, los cuales no presentan nombres, se localizan en el margen sur de la subcuenca y cuyas nacientes se encuentran en los cerros Colorado, Umallani y Toculla (Figura 5-1). El arroyo Veco y Mulluri nacen desde el volcán Mulluri en la Pampa de Tana (Figura 5-1). Las nacientes de la quebrada de Caritaya se localizan en el volcán Guaijata (Figura 5-1).



Fuente: Elaboración propia

5.2 PRECIPITACIONES

Para la caracterización de las precipitaciones en la cuenca aportante al embalse Caritaya, se utilizaron seis estaciones pluviométricas dependientes de la Dirección General de Aguas (DGA). Estas seis estaciones se encuentran fuera de la cuenca de estudio pero su análisis permite comprender el régimen de precipitaciones en el largo plazo en la cuenca. En la cuenca existe una estación con registro de precipitaciones, Caritaya Embalse con información entre los años 1932 a 1936 y los años 1964 y 1965, pero su corta data no es suficiente para aportar en la caracterización.

El análisis de las precipitaciones medias (mensual y anual) se realizó con el objeto de comprender el comportamiento temporal y espacial de ellas, y determinar la ocurrencia de periodos secos y húmedos analizando la serie de precipitaciones de largo plazo. Además se caracterizaron las precipitaciones máximas lo cual incluyó análisis de frecuencia en las estaciones seleccionadas para determinar precipitaciones para distintos periodos de retorno.

5.3 EVAPORACIÓN POTENCIAL

Debido a los escasos registros de evaporación en la zona, para la caracterización de la evaporación potencial en la cuenca aportante al embalse Caritaya, se consideraron 11 estaciones pertenecientes a la DGA a nivel regional, que incluyen estaciones de la región de Arica y Parinacota y Tarapacá.

5.4 ANÁLISIS DE CAUDALES

Dado que en la subcuenca aportante al embalse Caritaya no existen registros fluviométricos, el análisis de caudales para la subcuenca de estudio se realizó a partir de dos cuencas cercanas y de características similares, las cuales son las cuencas de Codpa y Camiña. El análisis se realizó por medio de la trasposición de la información fluviométrica a la subcuenca de estudio.

En el río Camarones, ubicado aguas abajo de la desembocadura del embalse Caritaya, existen dos estaciones fluviométricas, Río Camarones en Chilpe y Río Camarones en Conanoxa, pero dado el carácter regulatorio del embalse en los caudales de este río, estos registros no permiten comprender el régimen de caudales del río Caritaya por lo que no serán utilizadas para el análisis.

Para el análisis de los caudales medios en la cuenca de estudio, se utilizaron dos estaciones fluviométricas pertenecientes a la DGA, Río Codpa en Cala-Cala y Río Camiña en Altusa.

Por otro lado, para el análisis de crecidas en la cuenca de estudio se recopilaron los registros disponibles de caudales máximos instantáneos en las estaciones utilizadas para la caracterización de caudales medios. Se realizó un análisis de frecuencia para estimar caudales máximos para distintos períodos de retorno en las cuencas de los ríos Codpa y Camiña, y a partir de éstos se estimaron caudales máximos para la cuenca de estudio.

5.5 ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

Para la subcuenca del embalse Caritaya no se pudo realizar un balance hídrico debido a la escasa información que se dispone. Tanto la precipitación como los caudales medios se estimaron a partir de un análisis hidrológico regional, y aunque permiten comprender las componentes hidrológicas del sistema, para la determinación del balance es incierto.

Además, se desconocen variables importantes para la definición del balance como la variación del almacenamiento del acuífero y del embalse Caritaya, y la evapotranspiración real del sistema. Pese a esto, en esta sección se presenta una estimación del balance hídrico en la cuenca con el objetivo de tener una primera aproximación a la disponibilidad hídrica y no para la generación de planes de gestión y administración del recurso.

Para la subcuenca del embalse Caritaya se ha estimado un ingreso de agua por precipitaciones igual a 236,3 mm/año (equivalente a 2.711 l/s). A partir de la trasposición de caudales, se estimó un caudal de salida de la cuenca entre 152 l/s (Codpa) y 209 l/s (Camiña), equivalente a un caudal entre 13,2 mm/año y 18,2 mm/año.

6 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

6.1 GEOLOGÍA SUPERFICIAL

Es importante de mencionar que existen notorias zonas de alteración en el área de estudio, las cuales pueden ser zonas de aporte de contaminantes naturales al río. Como ha sido mencionado, el activo afloramiento de agua hidrotermal que se expresa en las lagunas de Amuyo (Ah, Ah(a), Ah(r), Ah(v)) en mapa geológico en Figura 6-1 y Figura 6-2.

Los depósitos volcánicos Miocenos y Pleistocenos han sido erosionados por los cauces fluviales pertenecientes a la red de drenaje del río Caritaya, produciendo depósitos fluviales que rellenan el valle.

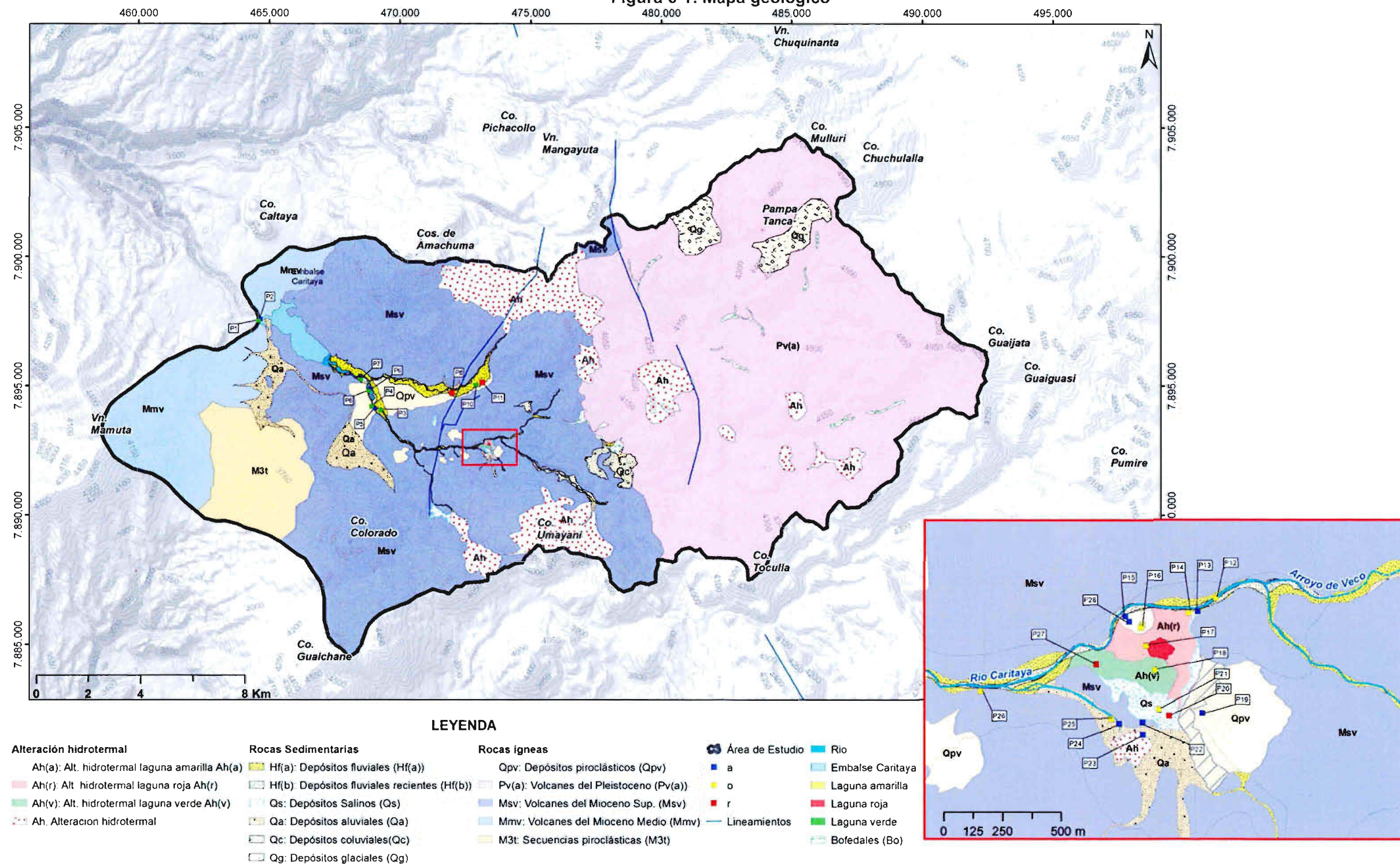
6.2 GEOLOGÍA DE SUB-SUPERFICIE

Con el objetivo de interpretar la geología de sub-superficie se subcontrató una campaña geofísica con la empresa Geodatos S.A.I. la cual permitió obtener información de la estratigrafía, del nivel freático y del espesor del relleno. El levantamiento de datos geofísicos, se planificó considerando que las estaciones se distribuyeran en 5 perfiles NanoTEM y 2 perfiles de Tomografía.

En base a: a) la descripción de las unidades geológicas, b) su disposición observada en superficie, c) la interpretación de las variaciones de resistividad eléctrica observadas en las secciones de NanoTEM, se construyeron perfiles geológicos.

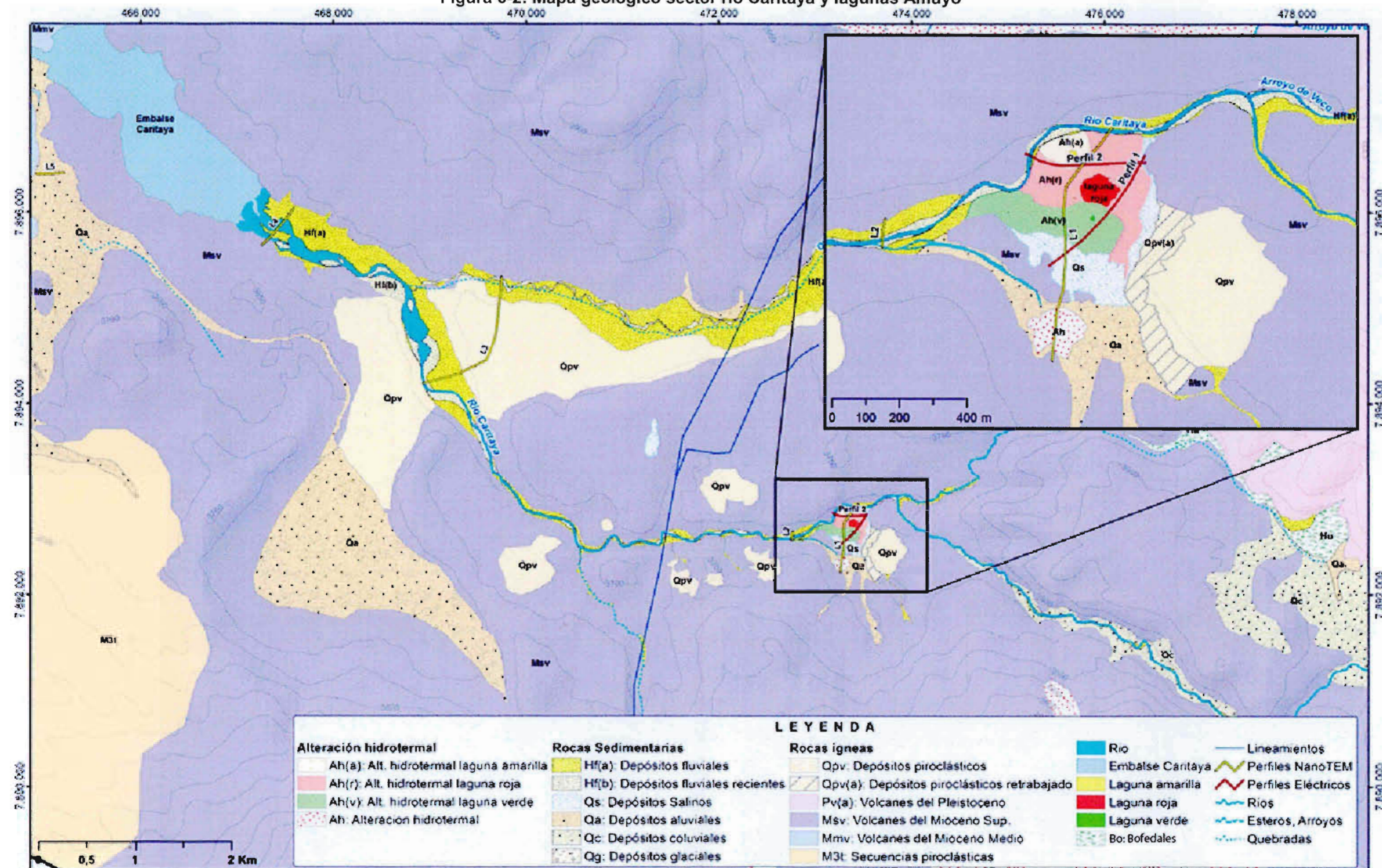
Apoyado por el análisis de secciones de tomografía eléctrica, se pudo interpretar con mayor detalle los depósitos sub-superficiales en las lagunas de Amuyo.

Figura 6-1: Mapa geológico



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-2: Mapa geológico sector río Caritaya y lagunas Amuyo



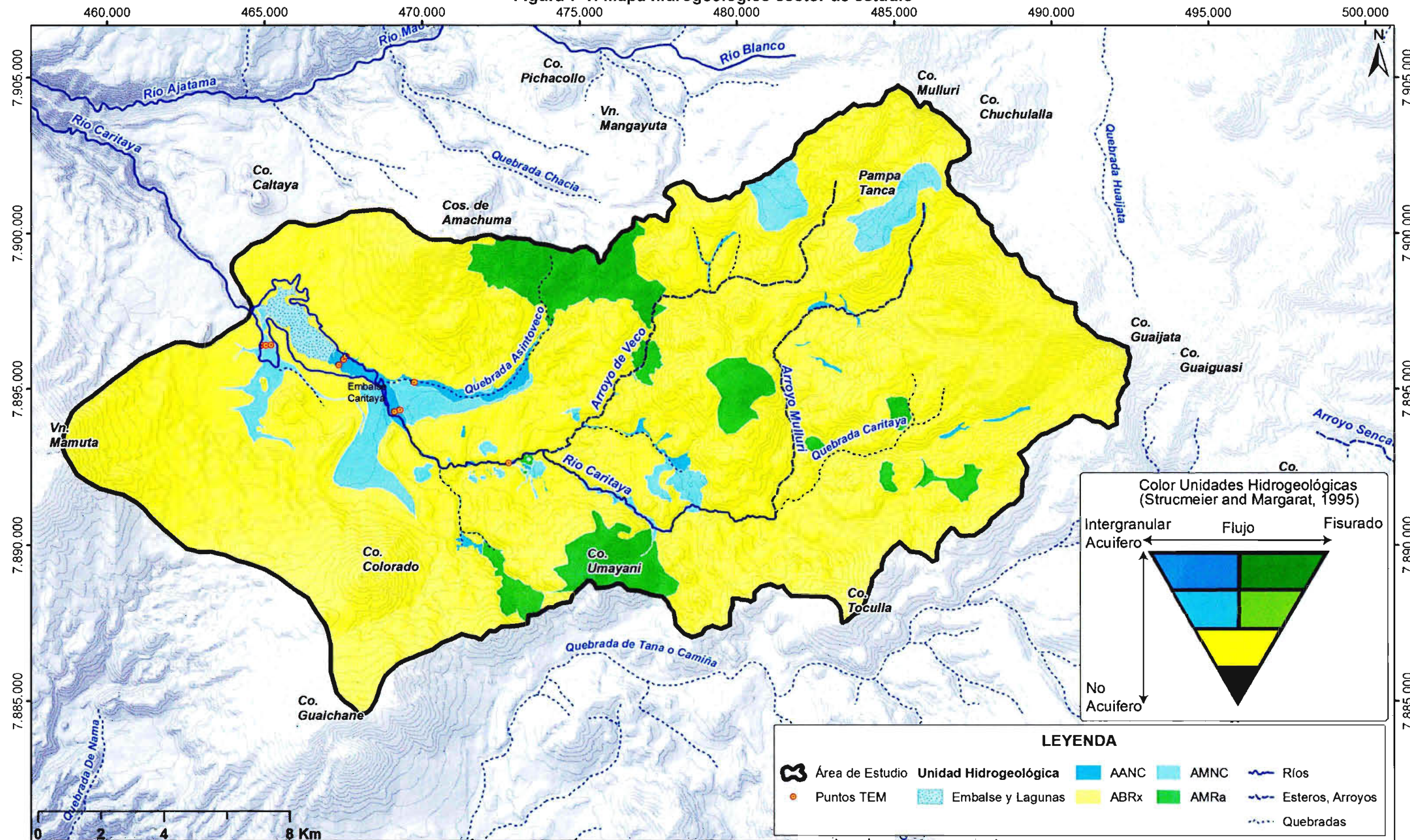
Fuente: Elaboración propia

7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Para la zona de estudio se establecieron cinco unidades hidrogeológicas con diferente potencial hidrogeológico, según se aprecia en las Figura 7-1y Figura 7-2.

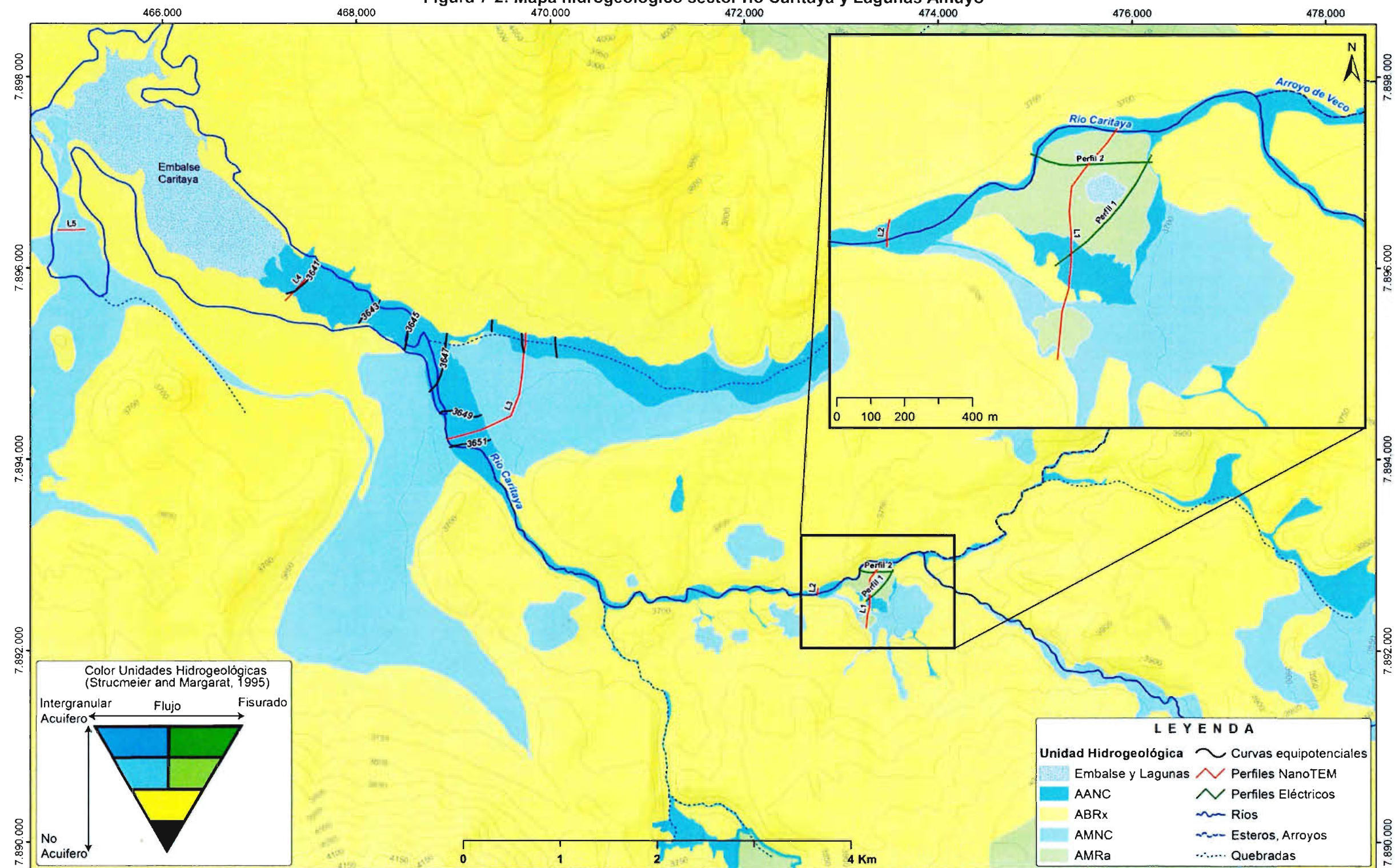
Basados en los perfiles NanoTEM se interpretó la profundidad del nivel piezómetro en cada uno de los perfiles, permitiendo estimar las curvas piezométricas del acuífero localizado inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya.

Figura 7-1: Mapa hidrogeológico sector de estudio



Fuente: Elaboración propia

Figura 7-2: Mapa hidrogeológico sector río Caritaya y Lagunas Amuyo



Fuente: Elaboración propia

8 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

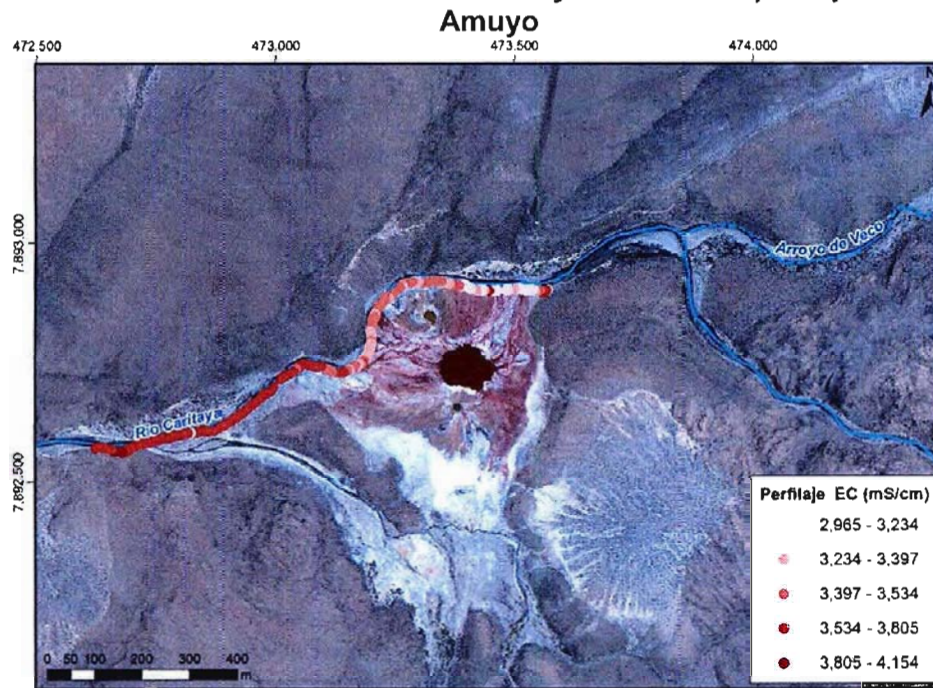
8.1 DESCRIPCIÓN PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS (DESCRIPCIÓN RANGOS, TABLAS, PLANTA CE)

Las aguas del embalse y aguas abajo del mismo presentan una escasa variación en su conductividad, lo cual es indicativo que la conductividad eléctrica está dada por especies disueltas más que por especies en suspensión sedimentable.

Las aguas de las Lagunas de Amuyo y aquellas provenientes de quebradas del margen sur de la subcuenca, presentan una conductividad entre 15.240 y 21.180 MS/cm. Las aguas de las lagunas presentan un pH neutro entre 7 y 7,5 el cual las diferencia de las quebradas del margen sur que presentan un pH levemente superior a 8.

Luego del paso por las lagunas de Amuyo el río Caritaya aumenta su conductividad eléctrica. Un barrido de conductividad realizado durante su tránsito revela un aumento desde valores cercanos a los 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta valores cercanos a los 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 8-1).

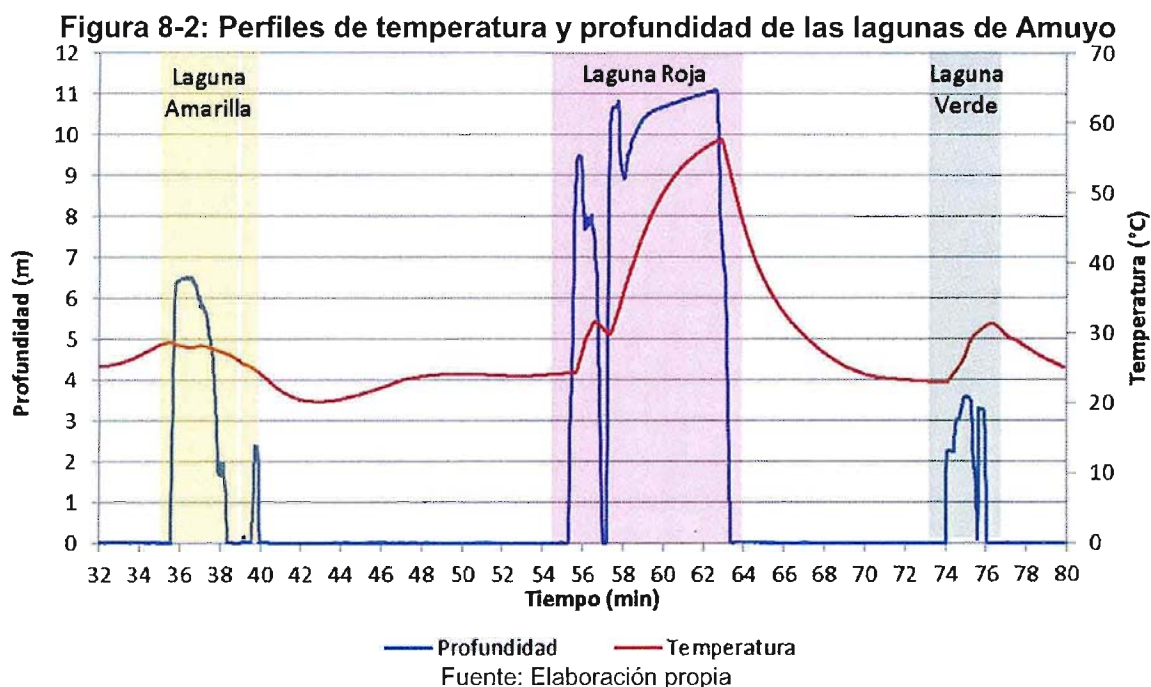
Figura 8-1: Perfil de conductividad del río Caritaya durante su paso por las Lagunas de Amuyo



Fuente: Elaboración propia

En las lagunas se realizaron mediciones de temperatura, pH y Conductividad eléctrica superficial. En forma extraordinaria, se midieron las temperaturas y profundidad aproximada del fondo de las lagunas con un transductor marca In-Situ Inc. modelo Rugged troll 100. El transductor fue amarrado a una cuerda, lanzado al centro de la laguna y luego recogido por uno de sus bordes. Con esto se obtuvieron mediciones de temperatura y profundidad a lo largo de la sección por donde el transductor es arrastrado.

Los resultados de esta investigación se muestran en la Figura 8-2. En el eje de las abscisas se presenta el tiempo en el cual el transductor estuvo recolectando datos (con frecuencia de 1 segundo), en el eje de las ordenadas principal se presenta la profundidad y en el eje de las ordenadas secundario se presenta la temperatura.



La laguna Roja posee una temperatura superficial cercana a 24,5°C y una profundidad estimada de 11 m, donde se midió una temperatura de 57°C. La laguna amarilla, que es la más próxima al río Caritaya, presenta una temperatura superficial de 25°C, una profundidad estimada de 6,5 m donde se midió una temperatura de 28°C. Luego de cerca de 2 meses luego del terremoto se registró un descenso de aproximadamente 1 metro solo en el nivel de la Laguna Amarilla. La laguna verde presenta una temperatura superficial de 33°C y una profundidad estimada de 3,5 m, donde se midió una temperatura de 33°C.

El potencial de óxido reducción de todas las muestras es positivo y fluctúa entre 93 y 284 mV. No obstante, se observaron zonas reductoras en los fangos existentes al fondo de las lagunas.

8.2 CLASIFICACIÓN HIDROQUÍMICA Y DESCRIPCIÓN ESPACIAL

La clasificación composicional de las aguas superficiales del sector del río Caritaya se basa en la proporción relativa de los elementos mayoritarios diferenciados en aniones y cationes. Se interpreta que las aguas salobres cloruradas sódicas del río Caritaya se originan por aportes de aguas meteóricas que lixivian zonas de alteración y reciben aportes de afloramientos hidrotermales directos. Del mismo modo, las aguas salobres de las lagunas de Amuyo corresponden a aguas de origen hidrotermal.

Las muestras del arroyo de Veco y Mulluri son aguas cloruradas sódico- cálcicas con porcentajes de bicarbonato mayores que las muestras del río Caritaya. Se interpreta una fuente meteórica para las aguas frescas del arroyo de Veco con escaso aporte hidrotermal o de lixiviación de zonas de alteración.

El río Caritaya, antes de su paso por las lagunas de Amuyo, presenta una conductividad eléctrica salobre cercana a los 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con aguas cloruradas sódicas, indicando aportes hidrotermales o la lixiviación de zonas de alteración aguas arriba del punto RC-13. Esto permite interpretar que existen importantes aportes de origen hidrotermal o la lixiviación de zonas de alteración aguas arriba del arroyo Mulluri, muy probablemente en la quebrada de Caritaya.

8.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE AS Y B

En la parte alta del arroyo de Veco el As se encuentra bajo 0,2 mg/l, lo que aumenta ligeramente al llegar a la confluencia con el río Caritaya, ya que antes de la desembocadura los valores medidos se mantienen bajo los 0,3 mg/l.

En la parte alta del arroyo Mulluri se registró concentración de As de 1,7 mg/l. En el tramo superior del río Caritaya, antes de la confluencia con el arroyo de Veco, la concentración de As aumenta desde 4,5 mg/l de hasta 5,6 mg/l. El aporte de aguas frescas del arroyo de Veco diluye la concentración de As del río Caritaya, de 5,6 a 4,2 mg/l en la campaña de marzo y de 4,6 a 3,1 mg/l en la segunda campaña de mayo.

Las lagunas en particular destacan por su alto contenido de As (entre 15 y 25 mg/l). El aporte de las lagunas produce un leve aumento de As en el río Caritaya, de 4,2 a 4,6 mg/l en la campaña de marzo y de 3,1 a 3,4 mg/l en la segunda campaña de mayo. En la primera campaña de mayo el Caritaya presentó un promedio de As de 4,4 mg/l y en la campaña de mayo el valor descendió a 3,8 mg/l.

El contenido de As del embalse es cercano a 3 mg/l y aguas abajo desciende ligeramente a 2,4 mg/l. Esta disminución de la concentración de As aguas abajo del embalse refleja un abatimiento de este elemento producido por el embalse Caritaya.

En general el comportamiento del B es similar al del As, excepto aguas abajo del embalse. Las aguas del arroyo de Veco presentan concentraciones menores a 2 mg/l desde la cabecera hasta la confluencia con el río Caritaya. Como era de esperarse las aguas frescas del arroyo de Veco causan una dilución en el contenido de B, que disminuye de 27,9 a 19,2 mg/l en la primera campaña de marzo y desde 26,92 a 23,95 mg/l en la segunda campaña de mayo.

El arroyo Mulluri presentan concentraciones de B de 8,3 mg/l, las cuales aumentan por sobre 25 mg/l aguas abajo de su unión con la Quebrada Caritaya. Esto permite reforzar la hipótesis de que la quebrada Caritaya es una fuente importante de contaminantes naturales al río Caritaya.

Al igual que las quebradas del margen sur, las lagunas poseen concentraciones de boro por sobre los 100 mg/l. En la primera campaña de marzo se detectó un leve aumento asociado a los aportes de las lagunas de Amuyo.

Contrariamente al caso del As, en el embalse Caritaya la concentración de B es de 22,46 mg/l y aguas bajo de éste se mantiene con una concentración similar. Esto indica que el embalse no logra abatir las concentraciones de B, producto de que este elemento es conservativo y se encuentra en disolución.

8.4 ISOTOPIA

Se realizan campañas de toma de muestra en marzo, y mayo de 2014, donde muestrean el arroyo de Veco, del río Caritaya y de la laguna Roja. Se analizaron isótopos estables de Oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$) y Deuterio ($\delta^2\text{H}$) en aguas frescas del arroyo de Veco, aguas salobres del río Caritaya y aguas salobres a saladas de la laguna Roja.

Las aguas de las lagunas se encuentran enriquecidas en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ respecto a las aguas del río Caritaya y el arroyo de Veco. Este enriquecimiento se puede atribuir a evaporación desde las lagunas o bien a los procesos geoquímicos de interacción agua - roca. En el primer caso, la composición isotópica final de las aguas de las lagunas sería la consecuencia de un enriquecimiento desde un agua meteórica recargada a una mayor altura.

Por otra parte, en el caso de haber enriquecimiento debido al intercambio isotópico entre minerales y el fluido a altas temperaturas, el proceso se traduciría en un enriquecimiento exclusivamente en $\delta^{18}\text{O}$. Donde la variación en $\delta^2\text{H}$ sería despreciable. No se descarta la ocurrencia de ambos procesos.

9 CARACTERIZACIÓN MEDIOAMBIENTAL

El objetivo de esta caracterización fue identificar los principales componentes ambientales de la zona de estudio vinculados a los recursos hídricos, por lo que a continuación se describen algunos aspectos bióticos y socioculturales.

Como se ha mencionado, la subcuenca del embalse Caritaya se localiza en el Altiplano. El clima presenta fuertes fluctuaciones de temperatura, tanto en el día como entre las estaciones del año. Durante toda época, las noches son frías, e incluso en el verano las temperaturas pueden bajar del punto de congelación. Cuando sale el sol, la radiación es intensa y el ambiente se entibia. Pero a la sombra, o si el sol se esconde, las temperaturas bajan rápidamente.

Si bien es cierto que el Altiplano está ubicado en la zona de los Andes desérticos del Norte, donde la topografía se encuentra marcada por el profundo sello de la aridez, tiene vegetación y fauna, lagos y vegas, ya que se ven en algunas épocas del año favorecida por lluvias de origen tropical que vienen desde el Este durante el verano, provocando el llamado "invierno boliviano" y que permite el desarrollo de la vida.

9.1 FLORA Y VEGETACIÓN

En términos generales, La vegetación del Altiplano está conformada principalmente por especies bajas. El único árbol que crece en ese ambiente es la “queñoa” (*Polylepis tarapacana*), de troncos retorcidos recubiertos de una corteza rojiza que se descascara como papel, que forma bosquetes en las quebradas y entre los roqueríos, hasta los 4.700 m de altitud, siendo, de hecho, uno de los árboles que crecen naturalmente a mayor altura en el mundo. Otras plantas muy interesantes de la Puna son las llaretas, arbustos de crecimiento denso y acojinado, de ramas y hojas resinosas.

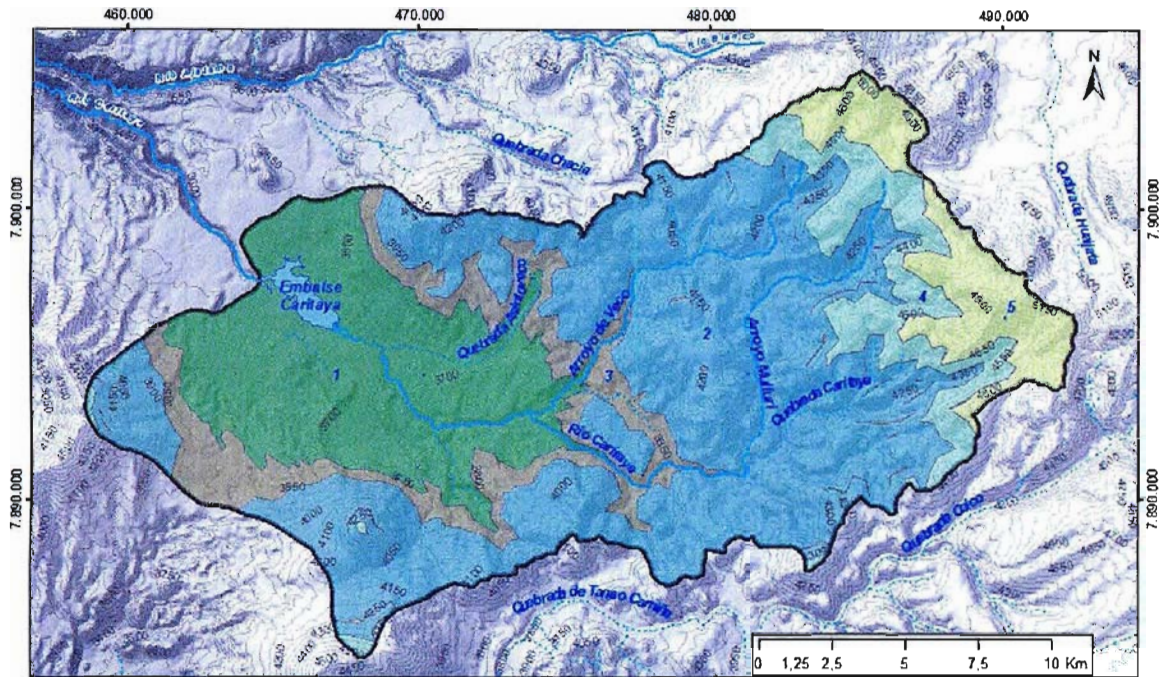
La distribución regional de la vegetación chilena indica que el área de estudio se encuentra dominada por formaciones andinas subtropicales y xerofíticas, dentro de la ecoregión altiplánica andina. Las particulares condiciones ecológicas de altura y sequedad permiten que sólo una fauna y flora muy especializada vivan en este medio.

La principal formación vegetal que se puede identificar en el entorno del Embalse Caritaya es el tolar, ya que esta formación se manifiesta desde los 3.100 a 3.900 m de altitud, preferentemente en las numerosas quebradas intermedias, con coberturas que no sobrepasan el 25% del suelo (MOP, 2006?). La especies dominantes dentro del tolar, son *Baccharis tola* y *Baccharis santelices* (conocidas localmente como ñakas) y *Fabiana ramulosa* (kipa), que aparece esporádicamente desde los 3.200 m.s.n.m. (SIM, 2008).

En la Figura 9-1 se presenta la distribución altitudinal de los pisos vegetacionales elaborada por Luebert y Pliscoff (2009). Los pisos vegetacionales son:

1. Matorral bajo tropical andino de *Fabiana ramulosa* y *Diplostegium meyenii* (Altitud: 3.650 - 3.950 m.s.n.m.).
2. Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lepidophylla* y *P. quadrangularis* (Altitud: 3.750 - 4.450 m.s.n.m.).
3. Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Festuca orthophylla* (Altitud: 3.750 - 4.600 m.s.n.m.).
4. Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Azorella compacta* (Altitud: 4.200 - 4.650 m.s.n.m.).
5. Matorral bajo tropical andino de *Azorella compacta* y *Pycnophyllum molle* (Altitud: 4.550 - 5.350 m.s.n.m.).

Figura 9-1: Pisos vegetacionales (Modificado de cobertura Luebert y Pliscoff, 2009)



Leyenda

Pisos Vegetacionales

- 1 = Matorral bajo tropical andino de *Fabiana ramulosa* y *Diplostephium meyenii*
- 2 = Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lepidophylla* y *P. quadrangularis*
- 3 = Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Festuca orthophylla*
- 4 = Matorral bajo tropical andino de *Parastrephia lucida* y *Azorella compacta*
- 5 = Matorral bajo tropical andino de *Azorella compacta* y *Pycnophyllum molle*

- Área de Estudio
- Río
- Embalse Caritaya
- Ríos
- Esteros, Arroyos
- Quebradas

9.2 FAUNA TERRESTRE

Los animales también han sabido adaptarse a las difíciles circunstancias altiplánicas. Al visitante interesado y sensible siempre le sorprende encontrar – a esas latitudes – tal variedad de fauna. Grandes manadas de vicuñas y guanacos han vuelto a poblar las laderas, después de haberse visto casi extinguidos y haber sido protegidas celosamente durante los últimos decenios. Huemules, zorros andinos y vizcachas son también habitantes relativamente comunes. Asimismo algunos roedores pequeños, como el ratón chinchilla y el chinchillón, que habitan debajo de las piedras o de los cojines de llareta.

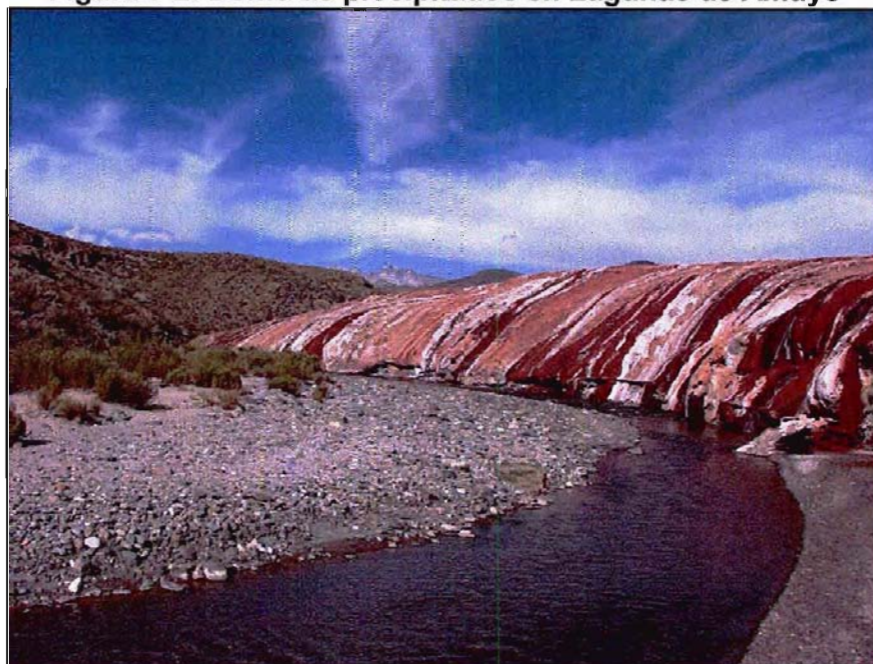
La fauna de la ecoregión altiplánica es una de las más ricas y variadas del país. Entre los mamíferos hay roedores como la vizcacha y el quirquincho. Entre los grandes herbívoros destacan la llama, la vicuña y la alpaca, que viven preferentemente en los bofedales y pajonales. El guanaco vive en las partes más altas de esta ecoregión. Los predadores principales son el zorro culpeo y el chingue. Entre las aves, la principal es el ñandú y la perdiz de la puna. Entre las aves de bofedales y lagunas destacan la guallata, la tagua gigante y el flamenco. Entre la fauna herpetológica destacan el Sapo telmatobio y la culebra andina.

9.3 FLORA Y VEGETACIÓN ACUÁTICA

Las lagunas de Amuyo corresponden a una expresión de aguas hidrotermales en superficie, existente a 3711 msnm. Las aguas producen la precipitación de minerales (Carbonatos, Sulfatos y Sílice) que se depositan en forma de costras superpuestas sobre las rocas volcánicas del mioceno superior y sobre los depósitos fluviales del Río Caritaya (Figura 9-2). La continua superposición de las costras forman una estructura en forma de domo, que posee un diámetro aproximado de 380 metros y se eleva por sobre el lecho del río cerca de 15 m. Estas lagunas son una rareza geológica y presenta un gran potencial como atractivo geo turístico.

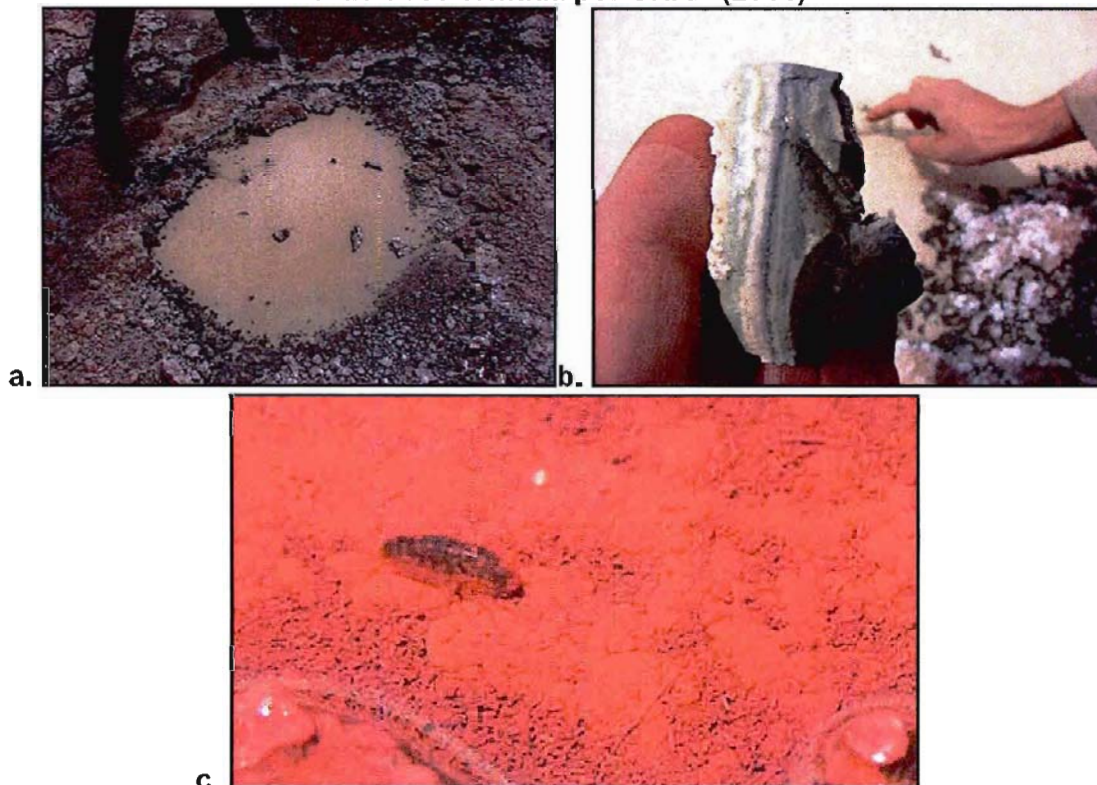
Entorno a las lagunas de Amuyo se desarrollan pequeños “charcos” salinos en los cuales se observaron crustáceos anfípodos y tapes microbianos (Figura 9-3).

Figura 9-2: Domo de precipitados en Lagunas de Amuyo



Fuente: Geohidrología Consultores

Figura 9-3: a. Charco con tapete microbiano; b. Tapete microbiano c. Foto de Crustáceo tomada por UNAP (2011)

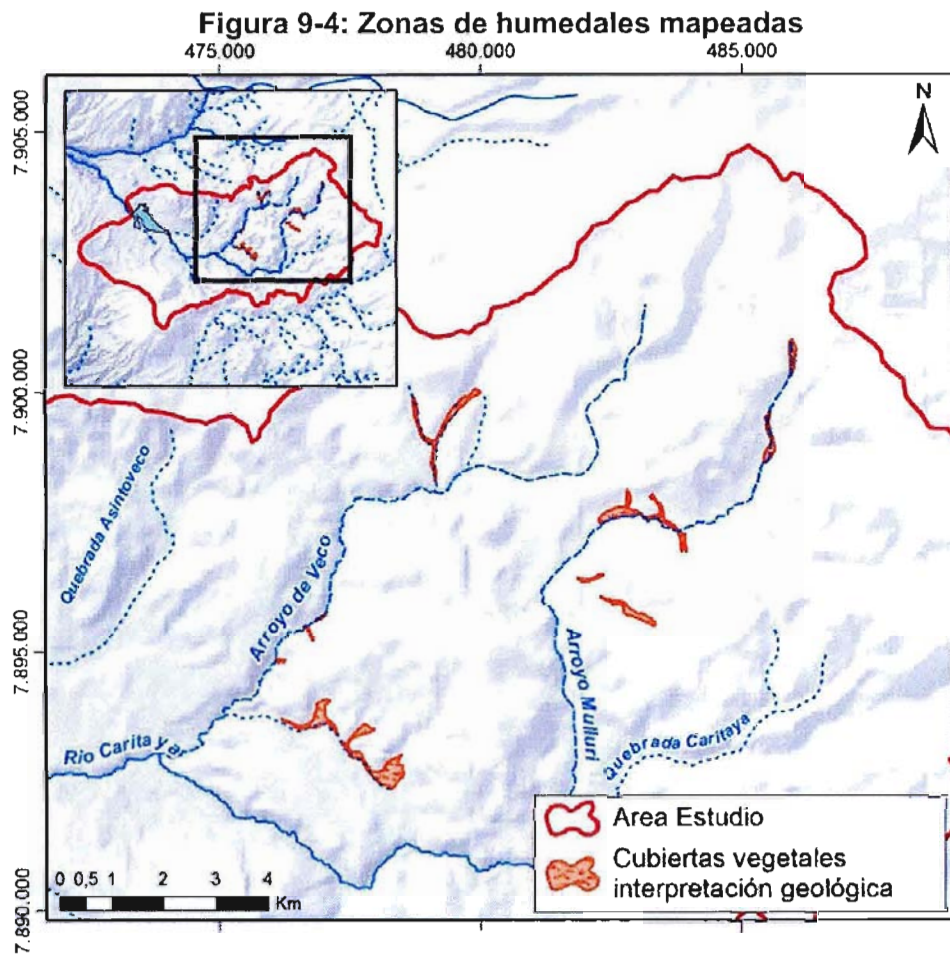


Fuente: Geohidrología Consultores

9.4 IDENTIFICACIÓN DE BOFEDALES

La identificación de bofedales y zonas de alto vigor vegetacional fue estimada a través de la teledetección y posterior reconocimiento en terreno de los bofedales durante la campaña geológica.

En el área de estudio no se observan áreas protegidas, pero si existen componentes ambientales sensibles, las cuales corresponden a bofedales alto-andinos localizados en la cabecera de la subcuenca (Figura 9-4), el sistema de Lagunas de Amuyo y la ribera del Río Caritaya en su totalidad.



Fuente: Elaboración propia

9.5 MEDIO SOCIOCULTURAL

En términos generales, los habitantes actuales del Altiplano, principalmente representantes de pueblos indígenas Aymaras y Quechuas, están adaptados fisiológicamente para vivir a esas altitudes; su sangre tiene mayor número de glóbulos rojos por unidad de volumen y éstos, a su vez, contienen más hemoglobina, con lo que mejoran el intercambio de los gases del sistema circulatorio, mejorando con ello la captación, el transporte y la entrega de

oxígeno. Están acostumbrados a los cambios bruscos de temperaturas y a las condiciones extremas para la vida que priman en el Altiplano. Los poblados alto-andinos, generalmente cercanos a vertientes o a bofedales, donde los habitantes pueden pastorear a sus animales, llamas y alpacas, domesticadas desde hace milenios (Hoffman *et al.* 1998)

Gran parte de la zona de estudio corresponden a tierras de la comunidad Indígena de Mulluri. El poblado de Mulluri se encuentra a cerca de 4.100 m.s.n.m y actualmente es utilizado esporádicamente durante las celebraciones u otros momentos del año. En el poblado se encuentra la iglesia de Mulluri, la cual se construyó a fines del siglo XIX y posee un estilo entre barroco andino y neoclásico. Fue declarada Monumento Nacional de Chile, en la categoría de Monumento Histórico, mediante el Decreto Exento n.º 1778, del 24 de noviembre de 2005.

10 MODELO CONCEPTUAL

El agua proveniente de las lagunas de Amuyo y aquellas provenientes de quebradas del margen sur de la subcuenca presentan una conductividad entre 15.240 y 21.180 MS/cm (Figura 10-1).

En términos generales, toda el agua del río Caritaya, de las lagunas y de las quebradas del margen sur son cloruradas sódicas. Las aguas salobres cloruradas sódicas del río Caritaya se originan por aportes de aguas meteóricas que lixivian zonas de alteración y reciben aportes de afloramientos hidrotermales directos.

El arroyo de Veco está compuesto por aguas meteóricas frescas del arroyo de Veco con escaso aporte de lixiviación de zonas de alteración y refresca el importante sistema de aguas salobres del río Caritaya. De este modo el arroyo de Veco diluye la concentración de As del río Caritaya, de 5,6 a 4,2 mg/l y la de B disminuye de 27,9 a 19,2 mg/l (Figura 10-1).

Las lagunas y quebradas del margen sur destacan por su alto contenido de As (mayor a 15 mg/l) y altas concentraciones de boro (sobre los 100 mg/l). No obstante, en las muestras recolectadas aguas arriba y abajo de estas fuentes de contaminación la concentración del río Caritaya sube levemente, consistentemente con el bajo caudal aportado.

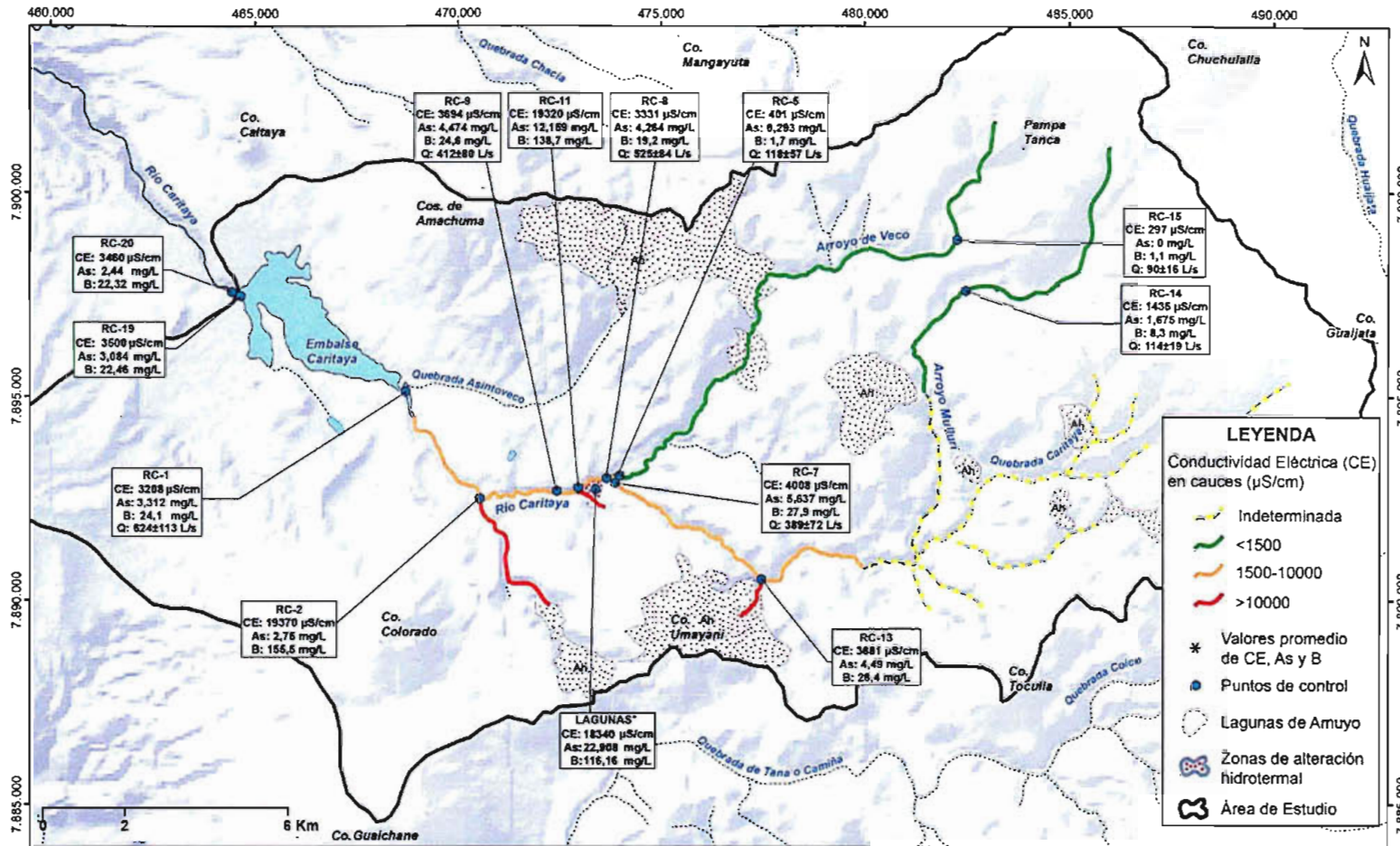
El contenido de As del embalse es cercano a 3 mg/l (RC-19) y aguas abajo desciende ligeramente a 2,4 mg/l (RC-20). Esta disminución de la concentración de As aguas abajo del embalse refleja un leve abatimiento de este elemento producido por el embalse Caritaya. Contrariamente al caso del As, en el embalse Caritaya la concentración de B es de 22,46 mg/l y aguas abajo de éste se mantiene con una concentración similar. Esto indica que el embalse no logra abatir las concentraciones de B, producto de que este elemento es conservativo y se encuentra en disolución.

Los análisis isotópicos permiten sumar evidencias de que el proceso de lixiviación de zonas de alteración es un factor preponderante en la mala calidad de las aguas del río Caritaya. Las aguas de las lagunas se encuentran enriquecidas en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ respecto a las aguas del río Caritaya y el arroyo de Veco, diferenciándolas claramente como un miembro extremo.

Los análisis isotópicos y de Cloruro de las aguas del río Caritaya indican que el aumento en la salinidad de las aguas del río Caritaya no está acompañado por un fraccionamiento isotópico, lo cual permite interpretar que el incremento en la salinidad del agua del río es producido por disolución de minerales, más que por un proceso de evaporación o mezcla con aguas de origen hidrotermal.

En síntesis, el río Caritaya presenta altas concentraciones de As, B y una mala calidad producto de los aportes de las quebradas del margen Sur, de las lagunas de Amuyo y por aportes de elementos químicos provenientes de la lixiviación o disolución de minerales. El proceso de lixiviación-disolución ocurre fundamentalmente aguas arriba de las lagunas, y aguas abajo de las lagunas su CE y química permanecen relativamente constantes (Figura 10-1).

Figura 10-1: Mapa funcionamiento conceptual



Fuente: Elaboración propia

11 ALTERNATIVAS DE MEJORAS EN LA CALIDAD DEL RECURSO

Agua arriba del embalse, el río Caritaya es alimentado por aguas de baja salinidad provenientes desde los arroyos Veco y Mulluri. Por el contrario, el agua del río Caritaya recibe agua con altas concentraciones de boro y arsénico proveniente de las lagunas de Amuyo y aportes desde quebradas del margen sur. A continuación se presenta un sistema de mejoras de la calidad del recurso, el cual está compuesto por tres alternativas de solución, las cuales son:

- Alternativa de solución 1. Planta de tratamiento,
- Alternativa de solución 2. Humedales artificiales y fitoremediación,
- Alternativa de solución 3. Venta del recurso a la minería.

Las alternativas mencionadas cuentan con un sistema de captación y conducción orientado a desviar las aguas de buena calidad, evitando que se mezclen con contaminantes naturales provenientes de las lagunas de Amuyo y las quebradas del margen sur, además del incremento de metales y salinidad producidos por el proceso de lixiviación durante el avance de aguas superficiales y aportes de otras fuentes.

Se ha clasificado el agua en función del valor de conductividad eléctrica, según los siguientes rangos de valores:

- Buena calidad: $CE \leq 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$
- Mala calidad: $CE > 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$

Esta clasificación se basó en la norma chilena NCh 1.333, donde se advierte que el agua con un rango de $1.500 \mu\text{S}/\text{cm} < CE < 3.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ puede tener efectos adversos en muchos cultivos. Por otro lado, el estudio "Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego", de la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (2005), recomienda la restricción del agua para riego si la conductividad eléctrica está en el rango de $700 \mu\text{S}/\text{cm} < CE < 3.000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Basándose en estos estudios, se consideró adecuado el valor de $2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ como valor referencial.

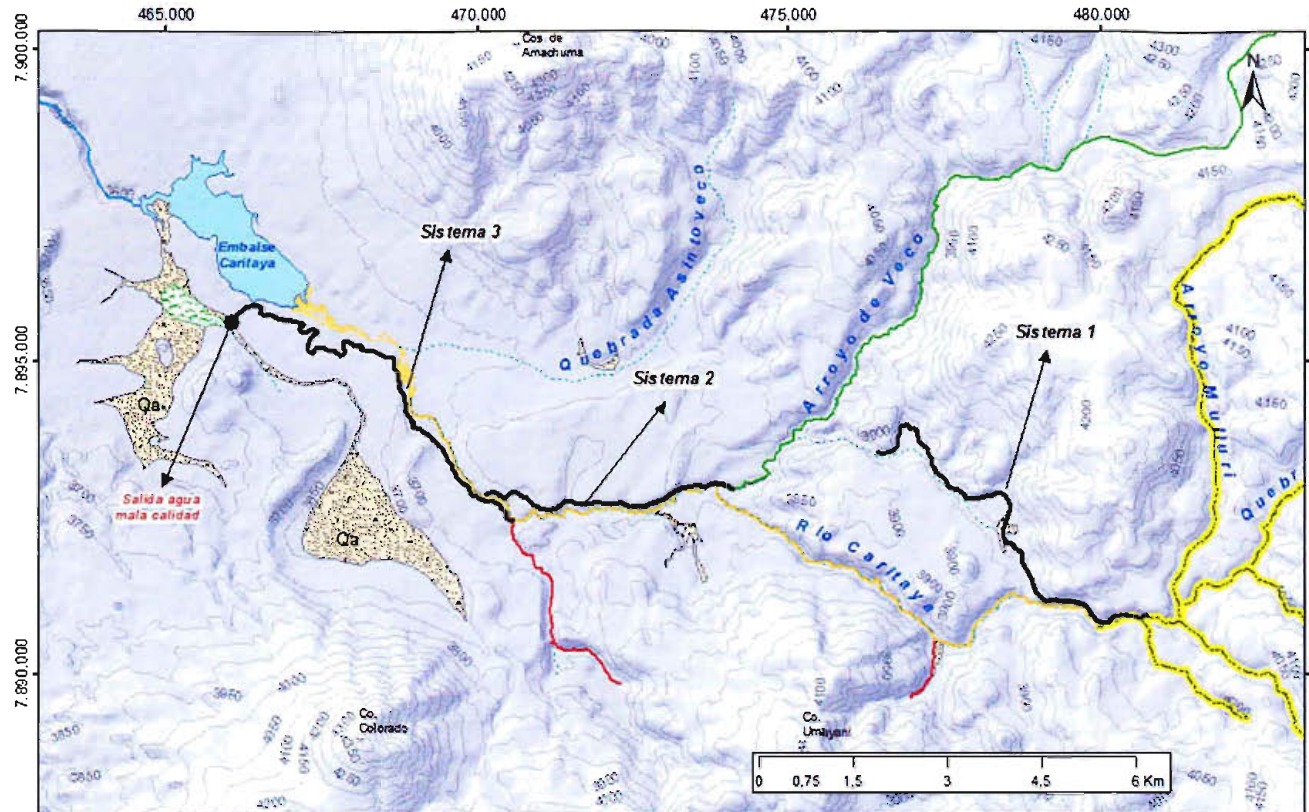
A continuación se describe en detalle el sistema de captación y conducción de las aguas.

11.1 SISTEMA DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE LAS AGUAS

El sistema de captura y conducción, considera la implementación de 3 sistemas complementarios, los cuales se presentan en la Figura 11-1. Estos tramos constan de una obra de toma, conducción y descarga de las aguas al cauce natural.

Los tres sistemas de captación y conducción complementarios propuestos, desvían el agua de mediana y mala calidad hasta el sector indicado en la Figura 11-1, donde posteriormente se realizará la mejora del recurso utilizando la alternativa más conveniente.

Figura 11-1: Esquema conceptual de sistema de mitigación



SISTEMA 1

Captación arroyo Mulluri y quebrada Caritaya
 $50 < Q < 300$ l/s
 $CE \approx 2.000 \mu S/cm$; $As \approx 2$ mg/l ; $B \approx 12$ mg/l
Entrega arroyo de Vecco
 $100 < Q < 500$ l/s
 $800 < CE < 2.000 \mu S/cm$
 $0,5 < As < 1,5$ mg/l
 $5 < B < 10$ mg/l

SISTEMA 2

Captación arroyo de Vecco
 $100 < Q < 500$ l/s
 $800 < CE < 1.600 \mu S/cm$
 $0,5 < As < 1,5$ mg/l
 $5 < B < 10$ mg/l
Entrega aguas abajo de quebrada sur

SISTEMA 3

Captación río Caritaya (aguas abajo lagunas de Amuyo) y quebrada sur
 $50 < Q < 200$ l/s
 $9.000 < CE < 18.000 \mu S/cm$
 $5 < As < 20$ mg/l
 $75 < B < 160$ mg/l
Entrega suroeste de embalse Caritaya:
 3 alternativas de solución



A continuación se describe cada uno de los sistemas propuestos:

Sistema de captura y conducción 1

1. Se capta el agua de baja salinidad de la quebrada de Caritaya y arroyo Mulluri, en los puntos donde su conductividad eléctrica alcance valores cercanos a los 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta agua tendría concentraciones de arsénico y boro entorno a los 2 y 12 mg/l respectivamente. Los puntos de captación de este sistema deberán ser definidos por un estudio de aforos y parámetros físico químicos in-situ (salinidad, pH, Eh, temperatura, OD), aguas arriba de las lagunas de Amuyo, quebrada Caritaya y arroyo Mulluri. Se espera capturar con este sistema un caudal medio entre 50 y 300 l/s. Los caudales de crecidas no serán captados por este sistema, el que será diseñado de manera de permitir su paso en caso de ocurrencia.
2. El agua captada se conducirá por medio de una tubería en forma gravitacional, la cual descargará al arroyo de Veco, el que cuenta con buena calidad de agua ($\text{CE} < 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Se espera que el agua resultante de esta mezcla oscile entre 100 y 500 l/s, con una salinidad entre 800 y 1.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, una concentración de boro entre 5 y 10 mg/l y una concentración de arsénico entre 0,5 y 1,5 mg/l.
3. Existen dos posibilidades para reintegrar el agua desviada al arroyo de Veco:
 - a. Descargar el agua al término del bofedal y que posteriormente escurran en forma natural hasta el arroyo de Veco.
 - b. La segunda posibilidad es aprovechar los 200 metros de diferencia de cota para generar energía mediante una central hidroeléctrica de pasada, previo a su descarga al arroyo de Veco.

Sistema de captura y conducción 2

1. Este sistema de conducción capta el agua de baja salinidad del arroyo Veco, proveniente del sistema anterior, antes de la confluencia con el río Caritaya. Posteriormente se conduce el agua por medio de una tubería que evita la interacción con el lecho del río. Se espera capturar entre 100 y 500 l/s, con una salinidad entre 800 y 1.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, una concentración de boro entre 5 y 10 mg/l y concentraciones de arsénico entre 0,5 y 1,5 mg/l.
2. Finalmente el agua es reintegrada aguas abajo de la última quebrada que aporta aguas de mala calidad.

Sistema de captura y conducción 3

1. Este sistema capta el agua de mala calidad, inmediatamente aguas abajo de la última quebrada del margen sur. Esto permite captar el agua de las lagunas y las quebradas del margen sur en un solo punto, minimizando de esta manera costos y el impacto visual de sistemas independientes para cada fuente de contaminación. Se espera captar entre 50 l/s y 200 l/s, con una salinidad entre 9.000 y 18.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con concentración de B entre 75 y 160 mg/l y concentraciones de As entre 5 y 20 mg/l.
2. El agua de mala calidad se conduce al sector suroeste del embalse Caritaya.
3. A la salida de este sistema, las aguas de mala calidad deberán ser tratadas de acuerdo a las alternativas mencionadas.

Obras de Captación y Conducción

El sistema de captura y conducción, para los 3 tramos proyectados, consta de una obra de toma, conducción y descarga de las aguas de mala calidad al cauce natural.

La obra de toma corresponde a una barrera transversal al cauce que desvía las aguas hacia un canal de transición o aducción, al cual se empalma una tubería de HDPE destinada a portear, mediante escurrimiento gravitacional, el flujo hasta el punto de descarga, en el cual se contempla una obra tipo enrocado para la protección del terreno natural.

Dada la magnitud de las crecidas asociadas al invierno altiplánico, se consideró como obra de toma una barrera utilizando el material disponible en el sector, la cual deberá ser repuesta después de cada crecida. El canal de aducción será excavado en tierra y el punto de empalme con la tubería proyectada se contempla una obra de hormigón que permita darle estabilidad a la tubería, y considera su inicio sobre la cota de fondo del canal para evitar el ingreso de piedras al interior del tubo.

Estas obras deberán permitir el paso de un caudal ecológico, que permita sustentar los ecosistemas aguas abajo.

Para el trazado de la tubería se proyecta una plataforma sobre el terreno, con una cama de arena sobre la cual se dispone la tubería.

La estimación de los diámetros de las tuberías para los sistemas de conducción, se realizó a partir de los datos proporcionados en la Tabla 11-1, y como criterio de diseño hidráulico, se consideró una relación de altura de escurrimiento y diámetro (h/D) al interior de las tuberías de 70% para asegurar el correcto funcionamiento de la tubería.

Debido a que sólo se cuenta con un levantamiento topográfico general de la zona, se consideró una pendiente única a lo largo de todo el trazado, en futuras etapas de ingeniería, donde se cuente con mayor información de los trazados, esta condición debe ser revisada.

Tabla 11-1 Parámetros para la estimación del diámetro de las tuberías

Parámetro	Conducción 1 (C1)	Conducción 2 (C2)	Conducción 3 (C3)
Caudal de diseño (m ³ /s)	0,300	0,500	0,200
Pendiente de diseño*	0,010	0,006	0,004
Diámetro (mm)	450	600	450

Nota: El coeficiente de rugosidad escogido corresponde a una tubería de tipo HDPE o PRFV ($n=0,010$).

* La pendiente de diseño se obtuvo a partir del desnivel entre la captación y restitución y la longitud estimada de los trazados. C1: Desnivel = 70 m – Longitud = 6970 m; C2: Desnivel = 30 m – Longitud = 4400 m; C3: Desnivel = 30 m – Longitud = 7600 m.

La cubicación del movimiento de tierra y materiales asociados a los 3 tramos de conducción se consignan en la Tabla 11-2, Tabla 11-3 y Tabla 11-4, respectivamente. Para la cubicación del canal de aducción se consideró una longitud de 10 m, con un ancho promedio de 4 m y 2 metros de profundidad, y para el enrocado se consideró un tramo de 5 m de largo y 2 de ancho con un espesor 0,3 m.

Tabla 11-2 Cubicación de la Conducción 1

Ítem	Unidad	Cantidad
Excavación para colocar tubería	m ³	32.500
Excavación canal de aducción	m ³	80
Relleno cama de la tubería	m ³	558
Hormigón	m ³	3
Armadura (20 kg/m ³)	kg	50
Tubería HDPE $\phi=450$ mm	m	6.970
Enrocado	m ³	3

Tabla 11-3 Cubicación de la Conducción 2

Ítem	Unidad	Cantidad
Excavación para colocar tubería	m ³	20.000
Excavación canal de aducción	m ³	80
Relleno cama de la tubería	m ³	352
Hormigón	m ³	3
Armadura (20 kg/m ³)	kg	50
Tubería HDPE $\phi=600$ mm	m	4.400
Enrocado	m ³	3

Tabla 11-4 Cubicación de la Conducción 3

Ítem	Unidad	Cantidad
Excavación para colocar tubería	m ³	17.000
Excavación canal de aducción	m ³	80
Relleno cama de la tubería	m ³	608
Hormigón	m ³	3
Armadura (20 kg/m ³)	kg	50
Tubería HDPE $\phi=450$ mm	m	7.600
Enrocado	m ³	3

Una vez las aguas de mala y mediana calidad sean desviadas de acuerdo a los sistemas complementarios descritos anteriormente, es que se debe seleccionar la alternativa de mejora del recurso más conveniente.

A continuación se describen en detalle las alternativas de solución:

11.2 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 1: PLANTA DE TRATAMIENTO

La primera alternativa considera tratar el agua proveniente del sistema 3 de captación y conducción, la que tiene peor calidad química por su alto contenido de arsénico y boro. El tratamiento se realizaría en las inmediaciones de la descarga del sistema 3, aprovechando el sistema gravitacional y su cercanía con el embalse Caritaya, el cual recibiría el agua tratada para su acumulación y regulación para el riego.

Para la remoción de arsénico generalmente se ocupan procesos de precipitación química, como es la coagulación con sales de aluminio y fierro y el ablandamiento con cal. Otros métodos alternativos que no son de uso masivo, son remoción por resinas de intercambio iónico, por adsorción en alúmina activada y por procesos de membranas como osmosis inversa y nanofiltración.

Para la utilización del proceso de coagulación-filtración, hay que tener claro ciertos factores y recomendaciones. Antes de agregar el coagulante es necesario ajustar el pH según sea el coagulante a utilizar, tener presente que la presencia de fosfato y sílice afectan el proceso, la presencia de cloruros, carbonato y sulfato no interfieren en el tratamiento y que habiendo presencia de calcio y manganeso puede favorecer el proceso. Si se utiliza un proceso de membranas se requiere que el agua a tratar tenga una nivel bajo de SDT y SST, se tenga en consideración que la presencia de cloruro, sulfato, nitrato y metales pesados disminuye eficiencia de tratamiento y que la presencia de materia orgánica, fierro y manganeso puede ensuciar las membranas.

Por otro lado, el uso de coagulación, sedimentación y filtración, no es muy efectivo en la remoción de altas concentraciones de boro. Para esto, son necesarios procesos especiales como intercambio iónico y osmosis inversa, los cuales reducen en una cantidad considerable el nivel de boro en el agua, pero aun así su tratamiento es muy costoso si sólo existe boro.

Teniendo en cuenta lo anterior, se contempla un tratamiento en base a intercambio iónico, lo que permitiría reducir los niveles tanto de arsénico como boro a los niveles que se requiere para cumplir con las exigencias de la norma de riego (NCh 1.333).

El intercambio iónico es un proceso donde iones con carga iguales son intercambiados entre el agua y la resina sólida. El agua se hace pasar por un lecho de resina catiónica, y los iones de calcio y magnesio son remplazados por iones de sodio. Cuando los iones de sodio se agotan, la resina de intercambio iónico pierde su función y se puede regenerar añadiendo una solución de cloruro de sodio.

Una planta de tratamiento de intercambio iónico tipo, consiste en dos o más lechos de resina contenidas en unidades a presión, conectadas con bombas, cañerías y equipos auxiliares para su regeneración. Las unidades a presión son típicamente de 4 metros de diámetro, con la resina a unos 0,6 – 1,5 metros de profundidad.

Este tipo de tecnología es aplicable a la zona de estudio, dado que las temperaturas ambientales a la cual operan estas plantas pueden variar entre los 2 a 40°C. Además, no se necesitan espacios grandes, comparados con otros tipos de plantas de tratamiento, para lo

cual es óptimo para el sector donde descarga el sistema 3 dado su cercanía con el embalse Caritaya.

Otra ventaja de utilizar este tipo de tecnología, es que reduce indirectamente la conductividad y la salinidad del agua, la cual es alta en el agua captada.

Los costos estimados de inversión corresponden a 7,2 millones de dólares aproximadamente, el cual se detalla en la Tabla 11-5, además de un costo de tratamiento de US\$ 7/m³, considerando una concentración de 160 mg/l de boro.

Tabla 11-5 Costo de Inversión Alternativa 1

Costos Alternativa N°1	
Ítems	Precio Total
1. Costos del Sistema de Captación y Conducción	USD
1.1 Sistema 1	\$ 1.704.356
1.2 Sistema 2	\$ 1.787.702
1.3 Sistema 3	\$ 1.557.238
2. Costos de Inversión e Implementación Planta de Tratamiento	\$ 2.221.010
Subtotal de costos de inversión	\$ 7.270.306
3. Costos de tratamiento por volumen de agua (m³)	\$ 7

Fuente: Elaboración propia

11.3 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 2. HUMEDALES ARTIFICIALES Y FITOREMEDIACIÓN

La segunda alternativa de solución considera la implementación y puesta en marcha de un humedal artificial y fitoremediación. Esta alternativa consiste en el ingreso de las aguas de mala y mediana calidad provenientes del sistema 3 al humedal artificial y la remoción del exceso de elementos contaminantes utilizando ciertas especies bióticas.

Los humedales son áreas de tierra que se mantienen húmedas durante gran parte o todo el año, cuya constitución produce una alteración de las propiedades del suelo, dado los cambios químicos, físicos y biológicos que ocurren durante la inundación. Estos humedales incluyen especies de plantas aptas para crecer en medios saturados y que pueden también sobreponerse a escasez periódica de elementos químicos esenciales como oxígeno.

La gran cantidad de agua involucrada en los humedales hace que éstos tengan una alta tasa de actividad biológica, la que hace que los humedales sean capaces de transformar muchos contaminantes comunes presentes en aguas, volviéndolos subproductos inocuos o **nutrientes esenciales** que pueden ser usados para actividad biológica adicional (Kadlec and Wallace, 2009). Esta tecnología de tratamiento puede ser aplicada a aguas residuales, tanto de origen industrial, animal, como residencial, aguas de tormentas de origen urbano y de agricultura, agua de minería y remediación de agua subterránea, entre otros.

Los humedales naturales han sido usados como sitios de descarga de agua contaminada, desde la existencia de las aguas residuales (al menos 100 años atrás, dependiendo del lugar). Así mismo, los humedales artificiales (o humedales construidos), para el tratamiento de aguas tienen su origen en la investigación llevada a cabo en Alemania Occidental en la década de los 50 y en el hemisferio occidental en la década de los 70.

Se propone que el humedal artificial esté localizado sobre depósitos aluviales (aguas abajo de la descarga del sistema 3), de los cuales se cree poseen un nivel escaso de conexión hidráulica con el sistema hidrogeológico del río Caritaya. Pese a esto, se hace necesaria la impermeabilización del terreno de manera de evitar que exista algún tipo de infiltración en acuíferos más profundos.

Por otra parte, un humedal de las dimensiones anteriormente descritas hace sentido, ya que a menos de 30 km al noreste de la zona de estudio se han identificado humedales naturales protegidos por la DGA, de dimensiones mayores que la indicada. Estos son Parcoalla, con 64 ha y Surire con 487 ha.

Desde un punto de vista socio-cultural, se sugiere que los humedales sean mantenidos por las comunidades Aymaras. De este modo, la mejora de la calidad de las aguas será una fuente de trabajo para la comunidad de Nama y/o Mulluri.

En términos de costos, la transformación de contaminantes es de relativo bajo costo, y puede involucrar movimiento de tierra, impermeabilización del terreno, la plantación de las especies bióticas que harán la labor de remoción de los contaminante y el tratamiento correspondiente. Por otra parte, en comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas, los humedales artificiales o fitoremediación, corresponden a los menos costosos, tanto en operación como mantención.

Debido a la baja implementación de esta tecnología en Chile y el mundo, es que la valorización de los costos asociados es complicada y sólo debe considerarse como referencial y no como valor absoluto. Los costos para este tipo de tecnología, pueden estimarse de acuerdo a un estudio realizado en EEUU (Dunner, 2004) para un humedal artificial de 4,38 (l/s), el cual fue extrapolado a 100 l/s, en donde se consideraron los costos de especies bióticas e impermeabilización.

Por lo tanto, considerando un caudal de 100 l/s los costos estimados de inversión corresponden a 6,9 millones de dólares aproximadamente y se detallan en la Tabla 11-6, además de un costo de operación y mantenimiento de 160.000 dólares aproximadamente.

Tabla 11-6 Costo de Inversión Alternativa 2

Costos Alternativa N°2	
Ítems	Precio Total
1. Costo del Sistema de Captación y Conducción	USD
1.1 Sistema 1	\$ 1.704.356
1.2 Sistema 2	\$ 1.787.702
1.3 Sistema 3	\$ 1.557.238
2. Costos de Inversión Humedal Artificial	\$ 1.900.835
Subtotal de costos de inversión	\$ 6.950.131
3. Costos de operación y mantención por caudal (l/s)	\$ 1.600

Fuente: Elaboración propia

11.4 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN 3. VENTA DEL RECURSO A LA MINERÍA

La última alternativa de solución es considerar la venta o arriendo del agua que se capte por medio de los sistemas de captación y conducción. Esta agua podrá ser utilizada para procesos mineros, de modo que el agua de mejor calidad, que se almacene en el embalse Caritaya, sea utilizada para usos agrícolas.

Esta alternativa no tiene asociado ningún costo para su implementación, ya que la captación y posterior direccionamiento quedaría a cargo de terceros interesados en el agua.

De acuerdo a información dispuesta en el estudio Diagnóstico y diseño definitivo "Reparación embalse Caritaya" (SMI Ltda., 2009), a nivel de organización de canales, a fecha del informe habían constituidas 36 comunidades de aguas, de los 60 canales que componen el sistema. El valle se encuentra dividido en 3 secciones de las cuales la sección alta, se encuentra totalmente regada y los regantes se comprometieron a captar agua únicamente entre las 06:00 y las 19:00 horas. Cuenta con 27 canales, 8.994 acciones con 450 l/s aproximadamente, entre los que destaca Umaxo-Illapata con 52 regantes. Incluye los sectores:

- Condumaya (10 canales)
- Illapata- Esquiña (7 canales)
- Quebradas (10 canales)

Estas aguas, en la medida que existan titulares de su propiedad adecuadamente identificados y con sus derechos regularizados, pueden enajenarlas o arrendarlas sin limitación alguna.

En efecto, el Código de Aguas en su Artículo 6° establece que el derecho de aprovechamiento, es un derecho real que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas, con los requisitos y en conformidad a las reglas que prescribe este código.

El derecho de aprovechamiento sobre las aguas es de dominio de su titular, quien podrá usar, gozar y disponer de él en conformidad a la ley. Esto quiere decir que los propietarios de estas aguas, pueden enajenarlas o arrendarlas conforme a las normas de derecho privado que regulan la materia.

A su vez el Artículo 21° señala que la transferencia, transmisión y la adquisición o pérdida por prescripción de los derechos de aprovechamiento se efectuará con arreglo a las disposiciones del Código Civil, salvo en cuanto estén modificadas por el presente código.

Sin perjuicio de lo expuesto, y de las plenas atribuciones y garantías de los propietarios de estas aguas, en términos que son libres y soberanos para llegar a una solución voluntaria, el embalse Caritaya requiere de un consenso o concurso de voluntades de la totalidad de sus usuarios, en un acuerdo global que beneficie a todos y a la que todos deben concurrir con sus respectivos aportes.

11.5 ESTIMACIÓN DE IMPACTOS EN LA PRODUCCIÓN

El estudio de la UTA (2010) describe que la calidad química de las aguas del río Camarones es deficiente para el riego por el alto contenido salino total y por el elevado contenido de boro. Los niveles de boro en sus aguas son extraordinariamente altos, tanto para normativas internacionales como para la norma chilena de riego NCh 1.333 que acepta 0,75 mg/l. En el estudio de la UTA (2010) se menciona que el valor promedio de arsénico varía entorno a los 0,86 mg/l y el contenido de boro promedio con un valor de 20,6 mg/l (en Conanoxa, localizado aguas arriba del poblado de Cuya). En el caso del arsénico este valor promedio se encuentra más de 80 veces por sobre el valor recomendado por la NCh 409.2005 que establece un contenido máximo de arsénico total de 0,01 mg/l para el agua destinada para consumo humano (Par más detalle ver “Capítulo de Marco Conceptual”).

Para lograr estimar el impacto en la producción agrícola que tendría implementar las medidas antes narradas, primero es necesario estimar cual será la mejora en la calidad de las aguas del río Camarones.

El agua del río Camarones, se forma gracias a la mezcla de aguas del río Ajatama y las del río Caritaya, los cuales no presentan información de calidad y cantidad sistemática que permitan realizar una correcta estimación de su estado base. Sumado a ello no existe control sobre las extracciones o fuentes de aporte de contaminación antrópica en toda la amplitud de la cuenca del río Camarones.

Dada la carencia de información descrita, la estimación en la potencial mejora en calidad del río Camarones y una posterior estimación de su impacto productivo presentan mucha incerteza, por lo que el análisis que se presenta a continuación debe ser considerado como orientativo y preliminar.

El cálculo de la concentración de boro en río Camarones, en función de la variación de caudales en los ríos Caritaya y Ajatama, revelan que las combinaciones de caudales más probables de mezcla son entre 50 y 200 l/s, para aportes del río Ajatama, y entre 200 y 500 l/s para aportes del río Caritaya.

Considerando el análisis anterior, las concentraciones del río Camarones pueden pasar desde 14,7 mg/l en promedio a valores entre 11,3 y 18,4 mg/l de boro.

La toxicidad del boro en las plantas se caracteriza por un crecimiento lento, malformaciones en las hojas, colores café y amarillo, clorosis, necrosis, incremento de moho, marchitez e inhibición de germinación de polen y crecimiento de tubos de polen. Sin embargo, existen cultivos tolerantes a concentraciones relativamente altas de este elemento traza, como el espárrago, considerado muy tolerante (concentraciones de hasta 15 mg/l), la alfalfa y el tomate (concentraciones de hasta 6 mg/l). La Tabla 11-7 muestra la tolerancia de los cultivos al boro indicados en este estudio.

El caso del arsénico es diferente, pues los cultivos sólo pueden tolerar bajas concentraciones. El efecto principal del arsénico en las plantas aparece en la destrucción de la clorofila en el follaje como consecuencia de la inhibición de la producción de enzimas. Debido a que el crecimiento de la planta se retarda ante la posible ocurrencia de una acumulación significativa de arsénico, las partes comestibles usualmente no acumulan arsénico a niveles dañinos para los consumidores. De acuerdo a este estudio, la concentración máxima aceptable del agua de riego es de 2 mg/l de arsénico para suelos neutros a alcalinos de textura fina. Concentraciones mayores reducen el rendimiento de los cultivos pues retarda su crecimiento.

Tabla 11-7: Sensibilidad o tolerancia al boro de cultivos agrícolas

Tolerancia al boro	Cultivo
Muy tolerante (6 a 15 mg/l)	Espárrago
Tolerante (4 a 6 mg/l)	Tomate, Alfalfa, Betarraga, Remolacha
Moderadamente tolerante (2 a 4 mg/l)	Lechuga, Repollo. Apio, Avena, Maíz, Trébol, Alcachofa, Calabaza
Moderadamente sensible (1 a 2 mg/l)	Arveja, Zanahoria, Rábano, Papa, Pepino
Sensible (0,5 a 1 mg/l)	Durazno, Cereza, Ciruela, Uva, Cebolla, Ajo, Camote, Trigo, Cebada, Girasol, Frutilla, Poroto
Muy sensible (< 0,5 mg/l)	Mora

El desvío de aguas de buena calidad de afluentes al embalse Caritaya reducirá las concentraciones de arsénico a un rango de entre 0,5 y 1,5 mg/l, mientras que el boro se reducirá a un rango de entre 3,6 y 9,1 mg/l. Esto permitirá la reducción de la concentración de boro en el río Camarones entre 11,3 y 18,4 mg/l dependiendo de los caudales de sus tributarios (río Caritaya y río Ajatama). Por su parte el arsénico se reducirá a valores inferiores a 2 mg/l lo que permitirá un adecuado desarrollo de la actividad agrícola.

Estas concentraciones permitirán un adecuado crecimiento de especies muy tolerantes y tolerantes al boro como espárrago, tomate, alfalfa, betarraga y remolacha, lo que permitirá ampliar la gama de cultivos presentes en el valle, dominado por la alfalfa (70% aproximadamente).

Para determinar el aumento de la productividad agrícola del valle del río Camarones, se calculó la demanda hídrica de los cultivos tolerantes al boro antes señalados. Para ello se

utilizó la metodología de cálculo de evapotranspiración de cultivos bajo condiciones de stress hídrico señalada en el documento “Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (FAO, 2006).

De acuerdo a esta guía, condiciones de baja fertilidad del suelo, toxicidad salina, suelos inundados, plagas, enfermedades y la presencia de horizontes duros o impenetrables en la zona radicular, pueden generar un crecimiento deficiente de la planta y una reducción de la evapotranspiración. Asimismo, condiciones de falta de agua y salinidad en el suelo pueden reducir la absorción del agua y limitar la evapotranspiración del cultivo (ETc).

De acuerdo a lo señalado en los TDR del presente estudio, los predios actualmente cultivados cubren una superficie de 1.630,7 ha, mientras que la superficie total cultivable es de 1.861,6 ha. De acuerdo al Censo Agropecuario realizado en 2007, en la región de Tarapacá las principales técnicas de riego son tendido y goteo. Considerando esto, la última columna de la Tabla 11-8 muestra el riego requerido por cada cultivo asumiendo el uso total del área cultivable (1.861,6 ha) para cada especie, con una eficiencia de riego del 20% para el riego por tendido y 95% para el riego por goteo. De esta tabla se desprende que los cultivos que requieren menos riego son espárrago, alfalfa y betarraga y que el caudal requerido está en el rango de caudales aportados por los ríos Caritaya y Ajatama, siempre que éste sea realizado mediante goteo, por lo que sería factible utilizar al máximo el potencial agrícola del río Camarones.

Tabla 11-8: Caudal de riego requerido por cultivos tolerantes al boro.

Tolerancia al boro	Cultivo	Kc	Ks	ETc (mm/d)	Riego requerido (l/s)	
					Tendido	Goteo
Muy tolerante	Espárrago	0,95	0,5	2,57	2.763	582
Tolerante	Tomate	1,15	0,5	3,11	3.345	743
	Alfalfa	0,95	0,5	2,57	2.763	614
	Betarraga	1,05	0,5	2,84	3.054	679
	Remolacha	1,20	0,5	3,24	3.491	776

Para determinar cuáles de los 5 cultivos incluidos en este análisis generan mayor rentabilidad del uso del suelo, se utilizó los datos de productividad y precio de mercado de ellos. La Tabla 11-9 muestra el análisis realizado con información extraída desde las bases de datos de ODEPA. Como resultado se obtuvo que los cultivos más rentable son el espárrago y el tomate, los que alcanzan un valor total por hectárea cultivada alrededor de los \$30.000.000. Por el contrario, la betarraga, tiene la producción menos rentable, con un valor total de \$208.000 por hectárea.

Tabla 11-9: Análisis de productividad y precios de cultivos tolerantes al boro

Cultivo	Productividad por hectárea	Precio	Valor del cultivo por hectárea producida
Espárrago	20 ton	\$1500 por kilo	\$30.000.000
Tomate	100 ton	\$230 por kilo	\$23.000.000
Alfalfa	15 ton	\$100 por kilo	\$1.500.000

Betarraga	160.000 unidades	\$13 por unidad	\$208.000
Remolacha	80 ton	\$25 por kilo	\$2.000.000

Considerando estos resultados, se recomienda el cultivo de espárragos para los predios agrícolas que actualmente están sin uso en la zona y que alcanzan las 230 ha aproximadamente. Si se mantiene la distribución actual de cultivos en el valle, dominado principalmente por alfalfa, y se aprovechan estas 230 ha actualmente no cultivadas con espárragos, se podrían generar \$6.900 millones adicionales en ingresos para la zona.

12 PARTICIPACIÓN CIUDADANA

Como parte del desarrollo del proyecto “Diagnóstico de la subcuenca aportante al Embalse Caritaya”, GeoHidrología Consultores realizó, el día 5 de marzo de 2014 en la ciudad de Arica, un taller inicial de participación ciudadana (PAC de inicio). La PAC de inicio tuvo como propósito presentar a la comunidad, los objetivos y alcances del estudio, y levantar las inquietudes, sugerencias, requerimientos y problemáticas que existen actualmente con respecto a los recursos hídricos y su gestión.

La convocatoria a la actividad de participación se realizó con el apoyo de la I. Municipalidad de Camarones y profesionales de la CNR. En conjunto se hizo llegar invitaciones a los actores representantes de la comunidad y a las autoridades. Logrando una convocatoria de más de 37 participantes.

El programa con el cual se desarrolló la actividad se presenta en la Tabla 12-1.

Tabla 12-1: Programa del Taller de Participación Ciudadana

Hora	Actividad	Responsable
11:30 a 11:35	Saludo maestro de ceremonia	Sra. Javiera Herrera (CNR)
11:35 a 11:45	Palabras de Bienvenida	Sr. Andrés Puiggros Seremi de Agricultura (s) de la región de Arica y Parinacota
11:45 a 12:10	Presentación PAC	Sr. Leonardo Machuca (CNR) - Sr. Marcelo Solari (GeoH)
12:10 a 12:35	Ronda de preguntas	
12:35 a 12:45	Entrega de bonos Ley de Riego*	Seremi de Agricultura (S) de la región de Arica y Parinacota-Coordinador de la Macrozona Norte de la CNR- Autoridades asistentes- Regantes beneficiados
12:45 a 12:55	Palabras de beneficiario*	
13:05 a 13:15	Palabras de cierre	Sr. Alberto Manzanares- Coordinador de la Macrozona Norte de la CNR
13:15 a 13:40 hrs	Cóctel	

*Actividad anexa al Taller Participativo.

La asistencia controlada durante la realización del taller contabilizó la participación de 37 asistentes (Figura 12-1). En Anexo I se presenta la lista de asistencia de la actividad.

Figura 12-1: Asistencia primer Taller de Participación Ciudadana



Para recoger las inquietudes, consultas y sugerencias de los asistentes con respecto al proyecto, en el Taller Participativo se realizó una sesión de consultas donde se entregó la palabra a los asistentes. En ésta los asistentes manifestaron interés o inquietud fundamentalmente en cuatro aspectos:

- Cuantificación de la mejora en la calidad de las aguas tras el proyecto y cómo se amplían las posibilidades de especies cultivables,
- Qué obras de solución genera el estudio y cómo podría afectar al turismo,
- Posibilidades de ampliar el estudio hacia aguas abajo del Embalse Caritaya para un mejor análisis de la calidad de las aguas,
- Involucrar a la comunidad en la realización del estudio.

Ante estas consultas las respuestas de los encargados de desarrollar el proyecto, tanto de GeoHidrología como CNR, fue reformular las expectativas de los asistentes recalcando que éste es un estudio básico, que pretende generar un modelo conceptual del sistema y establecer las bases para evaluar posibles soluciones al problema de la calidad de las aguas. Además, y como parte de los objetivos del taller, se invitó a los asistentes a colaborar y participar del desarrollo del estudio.

13 CONCLUSIONES

Para realizar el diagnóstico de la subcuenca aportante al embalse Caritaya, se comenzó analizando y caracterizando la geología, hidrología, hidrogeología e hidrogeoquímica del sector. Complementando lo anterior, se realizó una campaña de aforo de caudales, un muestreo hidroquímico e isotópico y además una campaña geofísica.

La hidrología del sector está caracterizada por precipitaciones fundamentalmente entre los meses de diciembre a marzo, siendo el mes de febrero el que registra la mayor precipitación. Estas precipitaciones están fuertemente relacionadas con la altitud, en el que se estimó un incremento en la precipitación de 13,9 mm por cada 100 m de altitud.

La subcuenca estudiada no presenta registros fluviométricos, por ello el análisis de caudales realizado se estimó en base a cuencas cercanas de Codpa y Camiña. El resultado del análisis de caudales determinó que en la estación seca, entre abril y noviembre, el 90% de los caudales se encontraría bajo los 300 l/s. Para el período de lluvias e invierno altiplánico, se estimó que un 10% es igual o mayor a 1.200 l/s. Por otra parte, se estimó que los caudales máximos instantáneos, para un periodo de retorno de 100 años, son del orden de los 17 m³/s.

Se determinó con la caracterización hidrogeológica del sector, que la subcuenca está compuesta por rocas volcánicas y rellenado por depósitos aluviales y fluviales mal consolidados que se depositan en las quebradas y en una amplia llanura fluvial localizada inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya. Estos depósitos albergan un acuífero con una baja capacidad de almacenamiento, el cual fluye libremente hacia el embalse Caritaya y es recargado fundamentalmente por la infiltración del río Caritaya.

Se puede indicar, según la hidrogeoquímica analizada del sector, que el río Caritaya presenta aguas de mala calidad, con conductividades entre 3.000 y 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por su lado, los principales afluentes al río Caritaya provienen de la quebrada Caritaya, el arroyo de Veco, con conductividades entorno a los 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ donde comienza y 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en su confluencia con el río Caritaya, y el arroyo Mulluri con una calidad intermedia de alrededor de 1.435 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Según lo anterior, una de las principales conclusiones de este estudio, a diferencia del estudio de la UTA (2010), el cual atribuía como única fuente de contaminación natural a las lagunas de Amuyo, es la identificación de múltiples fuentes de contaminación aportantes al embalse Caritaya. Se identificó, incluso, que aguas arriba de las lagunas de Amuyo el río Caritaya ya tiene una calidad deficiente, y que además el arroyo de Veco aporta con aguas de buena calidad.

El río Caritaya, principal afluente al embalse Caritaya, presenta altas concentraciones de arsénico y boro, dado los aportes de las quebradas del margen sur, de las lagunas de Amuyo y por la incorporación de elementos químicos provenientes de la lixiviación o disolución de minerales durante su tránsito aguas arriba de las lagunas de Amuyo. Estas fuentes de contaminación presentan conductividades eléctricas entre 15.240 y 21.180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un alto contenido de arsénico (mayor a 15 mg/l) y altas concentraciones de boro (sobre los 100 mg/l).

Basados en las conclusiones anteriores, se propone como principal medida la captación y desvío de aguas de buena calidad ($< 2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$) para evitar que las aguas disuelvan minerales que incorporen contaminantes y que se mezclen con aportes de mala calidad.

En forma complementaria se propuso la captación, desvío y manejo del agua de mala calidad, de manera que no sea incorporada al embalse. En la descarga del agua de mala calidad se propusieron tres alternativas de solución, una que contempla utilizar una planta de tratamiento para el abatimiento de arsénico, boro y conductividad eléctrica, otra que consiste en utilizar un sistema de fitoremediación, para tratar en forma natural esta agua, y por último se propuso vender o arrendar esta agua a terceros.

Se consideró además, una estación fluviométrica la cual tiene como objetivo generar información base para potenciales medidas de remediación, mitigación y/o separación de las aguas de buena y mala calidad. En este sentido, la construcción de esta estación busca poder registrar y transmitir los caudales que ocurren el 90% del tiempo del río Caritaya, y así comprender de mejor manera el aporte de la contaminación natural de arsénico y boro, junto con el aporte de aguas frescas del arroyo de Veco.

14 RECOMENDACIONES

En términos generales se recomienda realizar un conjunto de estudios complementarios que permitan evaluar y mejorar el diseño e implementación de las medidas de mejora de la calidad del agua almacenada. Estos estudios debiesen considerar al menos:

- Estudiar la conductividad eléctrica, pH, la reducción de la oxidación potencial (ORP) y la hidroquímica del río Mulluri, quebrada Caritaya y quebradas aguas arriba de las lagunas. El motivo de lo anterior es identificar de forma más precisa los cambios de calidad del agua superficial, con miras a identificar los puntos de captación del sistema de conducción.
- Considerar el contexto regional cuando se desarrolle en detalle las soluciones, al incluir por ejemplo el río Ajatama en la calidad del agua a ser destinada para riego.
- Complementar la estación fluviométrica con sensores de conductividad eléctrica que reporten teleméricamente los datos recolectados.
- Realizar levantamiento topográfico de detalle para mejorar el diseño del sistema de conducción, mitigación y remediación.
- Realizar una investigación específica para el diseño e instalación de un sistema de remediación pasivo por humedales y piscina de infiltración. Este estudio debiese incluir aspectos tales como:
 - Caracterización de eficiencia de especies autóctonas para remover arsénico y boro.
 - Realizar estudio hidrogeológico de línea de base, para caracterizar la geometría (profundidad de basamento, nivel freático), la permeabilidad, transmisividad, almacenamiento, características geoquímicas e hidroquímicas del subsuelo y la mineralogía del suelo.
- Definir y desarrollar los aspectos legales, ambientales y sociales que debiesen cumplir los proyectos asociados a las medidas mejoras de la calidad del agua almacenada.