

**Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
Departamento de Ingeniería de Procesos.**



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

Tesis Doctoral 2015

*“Caracterización de cuerpos de agua asociados a
vegas altoandinas de la hoya hidrológica del río
Elqui, del desierto transicional de Chile.”*

Alfonso Armijo León

Santiago de Chile

16 de noviembre de 2015

**D/D^a. Nizardo Benítez Vega SECRETARIO/A DEL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS DE
LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA,**

CERTIFICA,

Que el Consejo de Doctores del Departamento en su sesión de fecha 23 de noviembre de 2015 tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación, a la tesis doctoral titulada "*Caracterización de cuerpos de agua asociados a vegas altoandinas de la hoya hidrológica del río Elqui, del desierto transicional de Chile*" presentada por el doctorando D Alfonso Antonio Armijo León y dirigida por los Doctores Sebastián Ovidio Pérez Báez y Jorge Gabriel Cepeda Pizarro.

Y para que así conste, y a efectos de lo previsto en el Artº 6 del Reglamento para la elaboración, defensa, tribunal y evaluación de tesis doctorales de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, firmo la presente en Las Palmas de Gran Canaria, a veintitrés de noviembre de dos mil quince.



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO: INGENIERIA DE PROCESOS

Programa de Doctorado: Ingeniería Ambiental y Desalinización

Título de Tesis

***“CARACTERIZACIÓN DE CUERPOS DE AGUA ASOCIADOS A VEGAS
ALTOANDINAS DE LA HOYA HIDROLÓGICA DEL RÍO ELQUI, DEL DESIERTO
TRANSICIONAL DE CHILE.”***

Tesis doctoral presentada por: Alfonso Armijo León

Dirigido por los doctores.

Dr. D. Sebastián Ovidio Pérez Báez., Universidad de las Palmas, España.

Dr. D. Jorge Gabriel Cepeda Pizarro., Universidad de la Serena, Chile.

El Director

El Director

El Doctorando

Sebastián Pérez

Jorge Cepeda

Alfonso Armijo León

Las Palmas de Gran Canaria, a 16 de noviembre de 2015

**Caracterización de cuerpos de agua asociados a vegas
altoandinas de la hoya hidrológica del río Elqui, del
desierto transicional de Chile.**

Tesis Doctoral

Alfonso Armijo León

Universidad de las Palmas de Gran Canaria

Departamento de Ingeniería de Procesos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1	1
Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
1.2 Humedales.....	3
1.2.1 Definición	3
1.2.2 Servicios ambientales entregados por los humedales	4
1.2.3 Importancia de los humedales en la conservación de la diversidad biológica.....	8
1.2.4 Los humedales altoandinos.....	9
1.3 El sistema ambiental del Humedal Tambo Puquíos	11
1.4 Literatura citada:	24
Capítulo 2.....	28
Dinámica fluviométrica y limnológica de un cuerpo superficial de agua asociado a un prado húmedo de los Andes del norte-centro de Chile.....	28
Capítulo 3.....	30
Algunas características abióticas de pozas superficiales interiores presentes en una vega altoandina del desierto transicional de Chile.	30
Capítulo 4.....	32
Análisis de la calidad del agua de la vega Tambo-Puquíos según la normativa chilena y española.....	32
4.1 Marco conceptual	33
4.1.1 Aspectos normativos chilenos en calidad de agua.....	33
4.1.2 Aspectos normativos españoles de calidad de agua	44

4.2 Materiales métodos.....	50
4.2.1 Sitio de estudio.....	50
4.2.2 Parámetros examinados	52
4.3 Resultados y discusión	57
4.3.1 Análisis del agua del estero Tambo, respecto a la norma chilena y española.....	57
4.3.2 Análisis del agua de las pozas interiores de la vega Puquíos, respecto a la norma chilena y española.....	67
4.3.3 Detección de hallazgos	76
4.4 Conclusiones	85
4.5 Literatura citada:	87
Conclusiones.....	91
Anexo 1.....	96
Anexo 2.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Funciones productos y atributos de los humedales (UICN, 2003).....	6
Tabla 1. 2 Caudales superficiales medios anuales registrados a diferentes altitudes del tramo Estero Tambo-Río Vacas Heladas.....	20
Tabla 4. 1. Listado de Normas chilenas (NCh) de calidad de agua.....	36
Tabla 4. 2 Elementos esenciales de NCh409.....	39
Tabla 4. 3 Elementos o sustancias no esenciales en la NCh409	40
Tabla 4. 4 Parámetros relativos a características organolépticas	40
Tabla 4. 5 Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego.	43
Tabla 4. 6 Clasificación, según su salinidad, de las aguas para riego	44
Tabla 4. 7 Anexo I del RD 60. Normas de Calidad Ambiental para sustancias prioritarias y para otros contaminantes. Apartado A. Normas de Calidad Ambiental (NCA).	46
Tabla 4. 8 Anexo II del RD 60. Normas de Calidad Ambiental para sustancias preferentes. Apartado A. Normas de Calidad Ambiental (NCA).....	47
Tabla 4. 9 Anexo I del RD 140. Parámetros y valores paramétricos. B1.Parámetros químicos.....	49
Tabla 4. 10 Anexo I del RD 140. Parámetros y valores paramétricos. C.Parámetros indicadores.....	49
Tabla 4. 11 Valores de algunos parámetros descriptivos del agua del sistema léntico de la Vega Tambo, obtenidos a los 3.940 msnm. Valores en (mg/l), excepto pH.....	55
Tabla 4. 12 Promedios anuales (\pm DS) de parámetros descriptivos del agua del sistema léntico de la Vega Puquíos. Valores en (mg/l), excepto CE, pH y Na (%).....	56
Tabla 4. 13. Parámetros de Puquíos que superan al menos una de las normas chilenas (año 2000).....	72
Tabla 4. 14. Parámetros de las pozas de la vega Puquíos que superan el RD60 (año 2000).....	76

Tabla 4. 15. Parámetros de Puquíos que superan el RD140 (año 2000).....	76
Tabla 4. 16. Criterio de cumplimiento de la normativa de calidad de agua, tanto para agua potable como para agua natural, según normativa chilena y española.....	77
Tabla 4. 17. Clasificación de la calidad del agua potable para los parámetros medidos en Tambo.	77
Tabla 4. 18. Clasificación de la calidad del agua natural para los parámetros medidos en Tambo.	78
Tabla 4. 19. Clasificación de la calidad del agua potable para los parámetros medidos en Puquíos.	78
Tabla 4. 20. Clasificación de la calidad del agua natural para los parámetros medidos en Puquíos.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Principales vegas en la cuenca del Río del Toro (3.800-4.000 msnm), Cordillera de Doña Ana (Región de Coquimbo, Chile).....	12
Figura 1. 2 Orografía del área del humedal Tambo-Puquíos, con principales quebradas aportantes (e.g., quebradas La Menta, El Azufre, Vacas Heladas y Cajón Ancho).	13
Figura 1. 3 Aspecto general del humedal Tambo-Puquíos, tramo vegas Puquíos (3.800-4.000 msnm). Se observa el curso del Río Vacas Heladas y los puquíos o lagunas negras incluidas en la vega.....	14
Figura 1. 4 Disposición espacial de las principales unidades de vegetación del humedal Tambo-Puquíos.....	23
Figura 4. 1 Fisiografía del área de la VTP (3850-4000 msnm). Imagen Aster del 4 de febrero de 2003. TA: estaciones de bombeo de agua (CMEI) (Gentileza de FA Squeo).....	51
Figura 4. 2 Vista general de la vega estudiada (VTP, 3.940 a 3.850 msnm).....	52
Figura 4. 3 Vista de Estero Tambo (3.940 msnm).....	53
Figura 4. 4 Vista de las pozas superficiales en la vega Puquíos (3.850 msnm)...	54
Figura 4. 5 Variabilidad anual de pH promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.....	59
Figura 4. 6 Variabilidad anual de RSF promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.....	59
Figura 4. 7 Variabilidad anual de Fe promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.....	60
Figura 4. 8. Variabilidad anual de Mn promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.....	60
Figura 4. 9. Variabilidad anual de Cu promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.....	61
Figura 4. 10. Variabilidad anual de As promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.....	61
Figura 4. 11. Variabilidad anual de FI promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1993 a 1999.....	62

Figura 4. 12. Variabilidad anual de Sulfato promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.	62
Figura 4. 13 Variabilidad anual de As promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.	64
Figura 4. 14. Variabilidad anual de Cu promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999. Nota: hay 4 rangos de límites máximo de Cu para este decreto, según registros de 1999, la dureza de Tambo es >100, por lo que su límite de Cu en RD60 es 0,12 mg/l.	64
Figura 4. 15. Variabilidad anual de F1 promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1993 a 1999.	65
Figura 4. 16. Variabilidad anual de pH promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.	65
Figura 4. 17. Variabilidad anual de Fe promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.	66
Figura 4. 18. Variabilidad anual de Mn promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.	66
Figura 4. 19. Variabilidad anual de Sulfato promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.	67
Figura 4. 20. Variabilidad anual de pH promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 2000.	69
Figura 4. 21. Variabilidad anual de CE promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 1999.	70
Figura 4. 22. Variabilidad anual de F1 promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 2000.	70
Figura 4. 23. Variabilidad anual de Sulfato promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 2000.	71
Figura 4. 24. Variabilidad anual de NO ₃ promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 1999.	71
Figura 4. 25. Variabilidad anual de F1 promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1998 a 2000.	74

Figura 4. 26. Variabilidad anual de pH promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1998 a 2000.....	74
Figura 4. 27. Variabilidad anual de Sulfato promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1998 a 2000.	75
Figura 4. 28. Variabilidad anual de NO ₃ promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1998 a 1999.....	75

Simbología

msnm	Metros sobre el nivel del mar
UICN	Unión internacional para la conservación de la naturaleza
CONAF	Corporación nacional forestal, Chile.
SAG	Servicio agrícola ganadero, Chile
VTP	Vega Tambios-Puquios
CONAMA	Comisión nacional de medio ambiente, Chile.
DGA	Dirección general de aguas, Chile.
SERNAGEOMIN	Servicio nacional de geología y minería, Chile.
IPCC	Intergovernment panel on climate change.
CONICYT	Comisión nacional de investigación y tecnología, Chile.
UNEP	United nations environment programme.
RSF	Residuos sólidos en suspensión.
STD	Sólidos totales disueltos.
CE	Conductividad eléctrica.

Capítulo 1

Introducción.

En esta tesis doctoral se estudian las características de una vega altoandina Chilena, específicamente se analizan algunos cuerpos de agua de la vega Tambo-Puquíos. En el primer capítulo de este trabajo se presenta una introducción general a la tesis, otorgando un marco contextual del sitio de estudio, en el segundo capítulo se estudia la vega Tambo, analizando las características del agua en el estero Tambo, en el tercer capítulo se estudia la vega Puquíos, analizando las características del agua en las pozas interiores de la vega Puquíos, finalmente en el capítulo cuarto se estudia el total de la vega Tambo-Puquios, analizando la calidad del agua del estero Tambo y la calidad del agua de las pozas interiores de la vega Puquíos.

A continuación se presenta el primer capítulo de esta tesis doctoral, donde inicialmente se exponen los objetivos de este trabajo, a continuación se presenta un marco contextual referido a los humedales y finalmente se detallan las características medioambientales del humedal Tambo-Puquíos.

1.1 Objetivos

Objetivo general

Estudiar las características físicas y químicas del agua superficial en una vega altoandina del desierto transicional de Chile. El caso de la Vega Tambo-Puquíos, Región de Coquimbo, Chile.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la dinámica fluviométrica del estero Tambo.
2. Documentar la variabilidad altitudinal y temporal de algunos de los parámetros físicos y químicos del estero Tambo.
3. Describir las pozas de Puquíos en términos de sus principales atributos físicos y químicos.
4. Comparar las características físicas y químicas de las pozas de Puquios con otras pozas que se encuentran en los Andes del norte.
5. Caracterizar la calidad del agua de la vega Tambo-Puquíos de acuerdo a la normativa chilena y española.

1.2 Humedales

1.2.1 Definición

La Convención sobre los Humedales define a los humedales como “Extensiones de marismas, pantanos, turberas y aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Ramsar, 2004).

Adicionalmente, el Manual de la Convención Ramsar de 1996 especifica que los humedales "podrán comprender o incorporar zonas costeras y ribereñas adyacentes a humedales, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal” (Davis *et al.*, 1996).

En los humedales naturales se han diferenciado tres grandes grupos, definidos según el ámbito de localización: ámbito continental o costero, y dentro del costero se han diferenciado los subgrupos, según el rango de marea: mediterráneo o atlántico, ya que el rango de marea y la altura del oleaje determina la formación de barras costeras (Andrés y Gracia, 2000), principal proceso de cierre de las albuferas. Así se definen tres grupos, que son:

- Humedales del ámbito costero mediterráneo,
- Humedales del ámbito costero atlántico,
- Humedales del ámbito continental,

Además, hay humedales artificiales, como estanques de cría de peces y camarones, estanques y tranques de granjas y tierras agrícolas de regadío, depresiones inundadas por salinas, embalses, estanques de grava, piletas de aguas residuales y canales. La Convención Ramsar ha adoptado un Sistema

Ramsar de Clasificación de Tipos de Humedales que incluye 42 tipos, agrupados en tres categorías: humedales marinos y costeros, humedales continentales y humedales artificiales (Ramsar, 2006).

1.2.2 Servicios ambientales entregados por los humedales

Los humedales proveen de bienes y servicios esenciales para la existencia de la vida, tales como el agua, alimentos y otros componentes que inciden en la calidad de vida de las personas asociadas a ellos. Estos ambientes húmedos poseen atributos o valores intrínsecos que los distinguen de otros ecosistemas y es ahí donde reside su gran importancia en el sistema vital del planeta.

Algunos autores hacen diferencias entre bienes ambientales, funciones ambientales y servicios ambientales (Mejías, R. y Segura, O. 2002), a saber:

Bienes Ambientales: son los productos de la naturaleza que aprovecha directamente el ser humano o pueden ser transformados en un sistema de producción, por lo tanto su característica fundamental es que son tangibles y pueden ser comercializados, obteniéndose un precio de mercado y así obtener una estimación precisa de los ingresos.

Funciones Ambientales o ecológicas: es la capacidad de las interacciones entre los elementos del ecosistema de proveer bienes y servicios que satisfagan las necesidades humanas directa o indirectamente, algunos ejemplos son: el ciclo hidrológico, regulación de gases y formación de suelos.

Servicios Ambientales: son el resultado de las funciones que brindan los ecosistemas y que benefician a la comunidad local, nacional o internacional. Para que una función ambiental se transforme en un servicio ambiental, dicha función debe generar un beneficio ecológico, social y económico, por lo tanto incide

directamente en la protección y mejoramiento del medio ambiente. (Cordero *et al.*, 2008).

Por otro lado, los tipos de servicios ambientales que proveen los ecosistemas van a depender de innumerables factores, entre ellos se encuentra el elemento abastecedor de servicios ambientales (bosque, humedal, pradera, terrenos agrícolas, mar, entre otros) y el estado de conservación de estos. Por lo tanto, los servicios ambientales se pueden presentar en cualquier lugar, pero no necesariamente brindan servicios de la misma calidad y cantidad.

Por su parte, la UICN en 1992 ha realizado una clasificación de los beneficios que se extraen de las complejas interacciones que ocurren entre los componentes de los humedales, diferenciándolos en productos, funciones y atributos, como se observa en la **tabla 1.1**.

Tabla 1. 1 Funciones productos y atributos de los humedales (UICN, 2003)

Funciones	Productos
Recarga de acuíferos Descarga de acuíferos Control de inundaciones Estabilización de la línea costera y control de la erosión Exportación de biomasa Protección contra las tormentas Transporte de aguas Actividades recreativas y turismo	Productos Recursos vegetales y forestales Flora y fauna silvestre Pastos y recursos forrajeros Recursos agrícolas Recursos minerales Abastecimiento de agua
Retención de sedimentos, tóxicos y nutrientes	Atributos
Soporte de cadenas tróficas Hábitat para vida silvestre	Diversidad biológica Patrimonio cultural

Servicios de Suministro o Provisión: Son los productos que se obtienen de los ecosistemas y presentan un mercado estructurado (para la mayoría de ellos). Como por ejemplo: alimentos, agua pura, leña, fibra, bioquímicos y recursos genéticos, entre otros.

Servicios de Regulación: Son los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos. Ejemplo de ellos son: morigeración del clima, regulación de las enfermedades, regulación del agua, purificación del agua, polinización y control biológico, entre otros.

Servicios Culturales: Corresponden a beneficios no materiales que se obtienen de los ecosistemas. Están muy ligados a los valores humanos, su identidad y su comportamiento. Como ejemplo de ellos se pueden mencionar los beneficios espirituales, religiosos, de recreación y ecoturismo, estéticos, de inspiración, educacionales, de sentido de identidad y pertenencia a un lugar y herencia cultural, etc.

Servicios de Base o Soporte: Son los servicios necesarios para la producción de los demás servicios del ecosistema. Por ejemplo: la formación de suelo, producción de materias primas y ciclos de nutrientes, entre otros.

En general, los servicios ambientales producen beneficios en diferentes niveles, a saber:

Beneficio a nivel local: aquí se puede mencionar la conservación de los bosques, recibiendo el dueño un beneficio económico.

Beneficio a nivel del país: se refiere por ejemplo de la provisión de agua para la población, la producción de energía hidroeléctrica, la comercialización de derechos de captura de carbono o la generación de turismo ecológico.

Beneficio a nivel mundial: este punto abarca la fijación y retención de las emisiones de efecto invernadero y la protección de la biodiversidad.

1.2.3 Importancia de los humedales en la conservación de la diversidad biológica

Los humedales, que corresponden a sistemas intermedios entre ambientes permanentemente inundados de agua y ambientes normalmente secos, presentan una rica diversidad biológica, la que varía de acuerdo a su origen, localización geográfica, características químicas, vegetación dominante, características del suelo, sedimentos y geomorfología (UICN. 2002).

Durante mucho tiempo, gran parte de los humedales fueron considerados como lugares poco productivos e incluso, en muchos casos como lugares riesgosos e insalubres a los que era mejor drenar para convertirlos en áreas productivas tales como campos de cultivo, represas, terrenos urbanos u otros tipos de uso tradicional. Sin embargo, en años recientes se ha desarrollado un mayor conocimiento sobre la importancia ecológica y económica de los humedales en su estado natural, lo cual ha incrementado el interés mundial por su conservación y manejo sustentable (CONAF, 2010).

En la actualidad se sabe que los humedales Figuran entre los ecosistemas más productivos de la tierra (Barbier *et al.* 1997) y la diversidad biológica en estos es amplia, por cuanto aportan el agua y la productividad primaria de la que dependen innumerables especies vegetales y animales para su supervivencia.

De este modo, los humedales andinos y altoandinos, mantienen una diversidad biológica única y se caracterizan por un alto nivel de endemismo, tanto de especies animales como vegetales, terrestres y acuáticas. Estos humedales son, además, refugio y zonas de reproducción de una gran cantidad de especies que se encuentran con problemas de conservación (Ministerio de Medio Ambiente, 2011)

Si se analizan las metas y submetas para el año 2010 del Convenio sobre la Diversidad Biológica (UNEP, 2010) referidas a la biodiversidad de las aguas

continentales se puede concluir que estas están lejos de haberse alcanzado, y se puede comprobar que en los últimos 10 años el índice de disminución/pérdida de algunas poblaciones ligadas a los humedales de las que se tiene datos sólidos se ha más que cuadruplicado.

1.2.4 Los humedales altoandinos

En general, los humedales de montaña constituyen unidades de paisaje (sensu Goigel 1989, Johnson & Gage 1997, Odum & Sarmiento 1998) que se desarrollan en terrenos inundados, con expresión de diferentes formas de biota hidrofítica. Son considerados ecosistemas frágiles, cuyo valor biológico reside en las variadas y originales comunidades de especies y endemismos que albergan (Hails 1997, Ramsar 2004). También constituyen importantes recursos ecosistémicos para la fauna silvestre y el ganado trashumante, y por su participación en la regulación de los recursos hídricos, ya sea como filtros de sales o como reservorios, vías de flujo y de regulación del agua (Hails 1997). En el norte-centro de Chile, los humedales altoandinos representan islas biogeográficas inmersas en ambientes de clima árido o semiárido. Altamente dependientes del patrón pluviométrico, estos ecosistemas generalmente se forman en sectores de superficies planas o en centros deprimidos de sitios con mayor pendiente y drenaje pobre, con acumulación de agua por escurrimiento superficial o afloramiento subterráneo (Cepeda *et al.* 2000). La alta heterogeneidad fisiográfica, hidrológica y geológica de la zona andina favorece la existencia de diversos tipos de humedales (Squeo *et al.* 1993, Veit 1993, Cepeda *et al.* 2004), que se diferencian entre sí en tamaño, biota y estructura (SAG 2003). Desde el punto de vista paisajístico, constituyen ecotopos que contrastan fuertemente con el paisaje xeromórfico característico de esa altitud. Estos humedales, -llamados también vegas, veranadas o pastizales de altura en el lenguaje local-, poseen depósitos orgánicos de diferente profundidad; de manera que las plantas que crecen en ellos obtienen gran parte de sus nutrientes del agua que se carga con éstos al pasar por los sustratos minerales subyacentes o aledaños. Corrientemente se ha destacado la importancia

ecológica de los humedales para la avifauna (Ramsar 2004); sin embargo, estos ambientes albergan una alta diversidad de taxa que han sido poco estudiados a la fecha.

Actualmente los humedales de montaña no sólo se encuentran amenazados por la excesiva carga de animales domésticos y silvestres que les impone la ganadería de trashumancia y la elevada tasa de extracción de agua que demanda el consumo humano, ganadero y minero (SAG 2003), sino también por los probables efectos del cambio climático global (IPCC 2001), en especial el aumento de las temperaturas, que en estas zonas podría provocar un ascenso de la línea de las nieves y el aumento de los caudales de invierno y primavera (CONICYT 1989, Andrade & Peña 1993, Arroyo *et al.* 1993, Contreras 1993, Peña 1993, Mooney *et al.* 2001).

1.3 El sistema ambiental del Humedal Tambo Puquíos

Descripción general. El humedal Tambo-Puquíos forma parte de la red de vegas presentes en la cuenca del río del Toro (**Figura. 1.1**), en la alta montaña de la hoya hidrográfica del río Elqui (IV Región de Coquimbo, Chile). Está asociado al curso inferior del estero Tambo (4.000 msnm) y al curso superior del río Vacas Heladas (3.850 msnm), en el valle Tambo-Vacas Heladas, subcuenca río Vacas Heladas, tramo Cajón Ancho-quebrada La Menta (**Figura. 1.2**). El agua que mantiene al humedal proviene tanto del escurrimiento que baja por las pendientes de los cerros circundantes como de las acumulaciones freáticas que tienen lugar en el sitio y de los flujos laterales que vienen desde el estero Tambo y el río Vacas Heladas. Sus elementos paisajísticos principales corresponden a las vegas Tambo (4.000 msnm) y Puquíos (3.850 msnm) (**Figura. 1.3**). Estas vegas corresponden a prados húmedos con vegetación azonal en medio de una matriz esteparia de vegetación zonal. Poseen diferentes niveles de humedad freática; en algunos casos, el agua forma prados pantanosos o se acumula en pequeñas pozas, conocidas localmente como aguas negras o puquíos. El estero Tambo se forma a partir de escurrimientos provenientes principalmente del Cerro Elefante (4.524 msnm). El río Vacas Heladas se origina de escurrimientos provenientes de la quebrada Vacas Heladas y del aporte que recibe del estero Tambo. El río Vacas Heladas se une al río Malo unos 22 km aguas abajo, formando el río del Toro el que, aproximadamente 100 km aguas abajo, se une al río de La Laguna formando el río Turbio, uno de los afluentes del río Elqui.

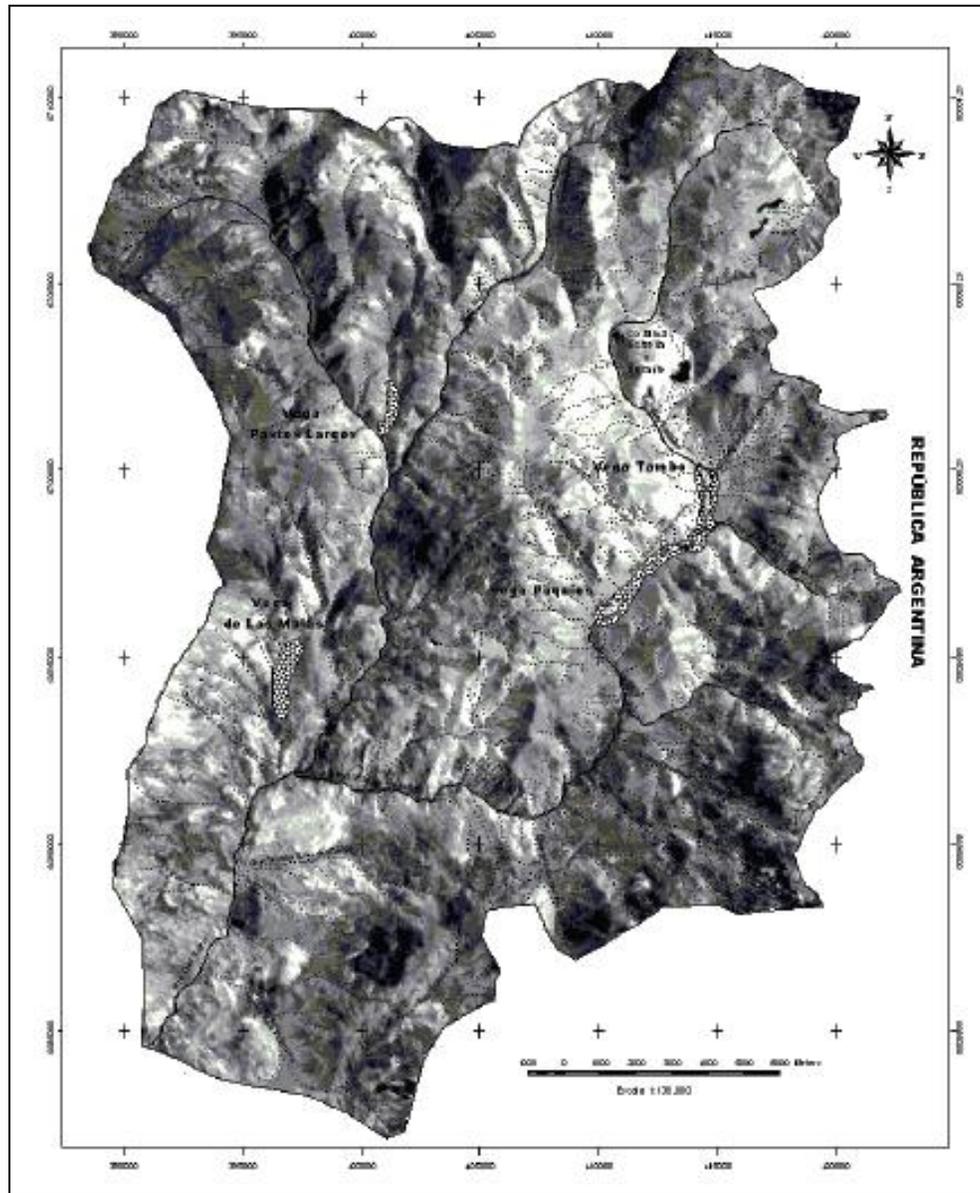


Figura 1. 1. Principales vegas en la cuenca del Río del Toro (3.800-4.000 msnm), Cordillera de Doña Ana (Región de Coquimbo, Chile).

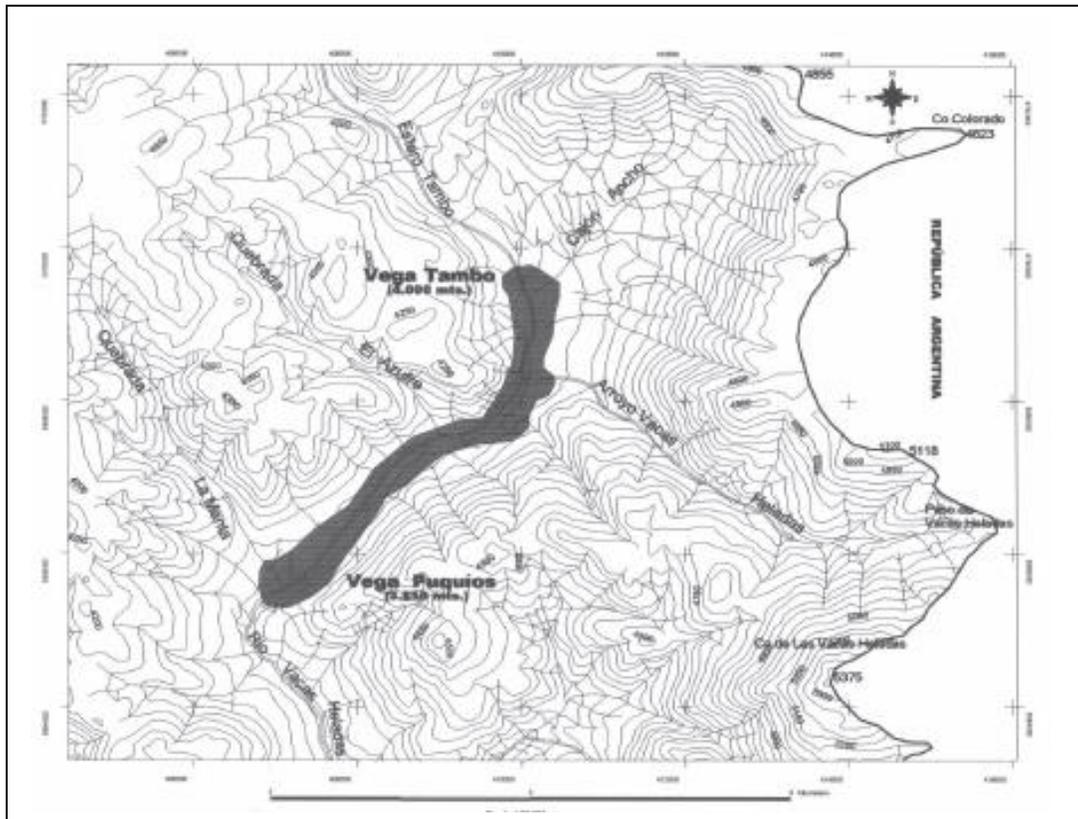


Figura 1. 2 Orografía del área del humedal Tambo-Puquíos, con principales quebradas aportantes (e.g., quebradas La Menta, El Azufre, Vacas Heladas y Cajón Ancho).



Figura 1.3 Aspecto general del humedal Tambo-Puquíos, tramo vegas Puquíos (3.800-4.000 msnm). Se observa el curso del Río Vacas Heladas y los puquíos o lagunas negras incluidas en la vega.

Estructura del paisaje. El área del humedal Tambo-Puquíos es una franja ribereña estrecha y discontinua, de unos 5 km de longitud, flanqueada por cerros altos. Es más ancha en su extremo norte (vega Tambo, ancho mayor de aproximadamente 2,5 km, piso superior, 4.000 msnm). En su extremo sur (aguas abajo de quebrada La Menta, 3.850 msnm) se encuentra encajonada a la cama del río, con unos ~30 m de ancho (**Figura. 1.2**). La diferencia de cota entre ambas vegas es de ~150 m. El paisaje del humedal está dominado por las características topográficas del sector, especialmente por el empaquetamiento del valle, por las alturas de los cerros circundantes, las diferencias en cota entre distancias cortas y las características de las quebradas afluentes. Las alturas mayores de la línea de cerros del flanco norte corresponden al Cerro Elefante (4.524 msnm), en cuya

base este se encuentra la subcuenca del estero Tambo, y al Cerro Canto Norte (4.550 msnm). Los cerros más importantes del flanco sur corresponden al Cerro La Despensa (4.319 m, lado oeste) y al cerro Vacas Heladas (5.375 m, lado este). Aguas abajo de la subcuenca del estero Tambo, las quebradas afluentes más importantes son Vacas Heladas, Rectificada y La Menta. Las vegas existentes en el área corresponden a prados húmedos dominados por *Puccinellia oresigena*, *Deschampsia caespitosa*, *Deyeuxia velutina* y *Carex maritima*, encerrados en un entorno estepario de *Stipa atacamensis-Adesmia subterranea*. Incluidas en los prados húmedos se encuentran las subunidades acuáticas representadas por el ritrón estero Tambo-río Vacas Heladas y cuerpos lénticos de diferente tamaño y existencia permanente o temporal. Aparte de las características topográficas, la distribución del agua edáfica tiene un rol fundamental en la existencia y características de los prados húmedos y de los cuerpos lénticos presentes en el sistema. Los suelos del humedal pueden estar completamente inundados, de carácter pantanoso o poseer niveles menores y variables de humedad (parches mezclados de vega y pajonal).

Geología. La roca madre del área de estudio data de mediados del Mioceno y se torna roca volcánica félsica limitada al oeste por la falla Baños del Toro, de rumbo norte-sur. La falla Baños del Toro forma el límite oeste de la roca terciaria que constituye la roca madre de la zona Cerro El Indio-VegaTambo. El cerro Canto Norte es una acumulación masiva de tobas dacíticas. Las brechas hidrotermales son una característica común en el área. Muchas de ellas intensamente silificadas y resistentes a la erosión. En el área existe una extensa faja de alteración hidrotermal que alcanza, con interrupciones, más de 200 km de dirección norte-sur y un ancho variable entre 1 y 10 km. El volumen de azufre, sulfuros y sulfatos es considerable e indica que existió un importante sistema de azufre durante la mineralización hidrotermal (Veit 1993).

Ecoclima. La precipitación total anual que recibe el área tiene un valor promedio de ~200 mm de agua líquida equivalente, con una gran variabilidad entre años.

Gran parte de la precipitación es sólida (>90% de la precipitación anual); con registros durante todo los meses del año, especialmente entre mayo y agosto. El rango de temperaturas medias mensuales del aire va desde -17,3° C (mínima, julio) a 24,2° C (máxima, enero). Los meses más fríos son junio, julio y agosto, con temperaturas promedios bajo 0° C. Los meses más cálidos son diciembre, enero y febrero, con promedio cercano a 10° C. El promedio anual de la humedad relativa del aire es cercano al 50%; con una variabilidad mensual promedio entre 43-55%, existiendo meses con 100% de humedad relativa como máximo y 7% como mínimo. Los promedios mensuales de velocidad del viento fluctúan entre 3,7 y 5,6 m/s, tendiendo a ser mayores entre los meses de mayo y octubre. Durante la mañana, el viento tiende a soplar desde el noreste; en las tardes, éste tiende a soplar en dirección oeste o suroeste. Existe una estrecha relación entre dirección y velocidad, las mayores velocidades se registran cuando el viento sopla desde el noreste o desde el norte (dirección predominante en la mañana) y desde el oeste o suroeste (dirección predominante en la tarde).

Suelos. En la matriz esteparia, debido a la fuerza gravitacional, los suelos de los taludes de las pendientes pronunciadas y abruptas contienen escasa o ninguna materia orgánica, excepto en su base donde existen suelos aluviales. En los taludes más moderados y llanos existen suelos de mejor desarrollo. En estos ambientes la actividad biológica se desarrolla principalmente bajo los arbustos y los pastos, donde se puede acumular una capa vegetal de varios centímetros de espesor. En las cimas de los cerros, el viento, las bajas temperaturas y la erosión limitan el desarrollo de los suelos. En las pendientes a grandes alturas, la vegetación está ausente (Squeo *et al.* 1993). En las vegas, el suelo subyacente a los parches de vegetación es de tipo deposicional, grueso y pedregoso. Sobre este suelo existe un estrato orgánico de diferente grosor y estado de descomposición. Sobre él se asienta una capa vegetal viva. Esta capa se distribuye en el área en forma de colchones de diferente altura, con un micro-relieve ligeramente ondulado que no supera 0,20-0,3 m.

Hidrografía. El estero Tambo es uno de los cursos naciotes de agua de la red de drenaje que da origen al río Elqui, nace como arroyo Tambo en el límite con Argentina a partir de la quebrada La Deidad (4.300 msnm, **Figura 1.2**), que escurre inicialmente en dirección ~nor-este, tiene aportes desde las cumbres que limitan la cuenca y el territorio con Argentina de cotas de 4.735 y 5.113 msnm. La quebrada La Deidad cambia posteriormente de curso a dirección nor-oeste y, al recibir los aportes de una pequeña quebrada desde el norte, pasa a llamarse estero Tambo, escurriendo en dirección sur-oeste. Aguas abajo del arroyo Vacas Heladas, el estero Tambo pasa a denominarse río Vacas Heladas. Las principales quebradas o arroyos que confluyen al humedal Tambo-Puquíos son las quebradas (desde aguas arriba hacia aguas abajo): Cajón Ancho, arroyo Vacas Heladas, quebrada El Azufre, quebrada La Menta (= La Noria) (**Figura 1.2**). Dado que los cauces existentes en la zona son cauces del tipo de cabecera, las pendientes de los mismos son pendientes inclinadas o fuertes, siendo esperable encontrar regímenes de escurrimiento del tipo torrencial. El estero Tambo, posteriormente el río Vacas Heladas también, escurre en sus primeros 20 km con una pendiente relativamente uniforme y del orden de 2,5% (a los 3.800 msnm). Su pendiente aumenta a unos 3,3% en los siguientes 3 km y hasta la cota 3.700 msnm. Posteriormente y hasta su confluencia con el río Malo (2.520 msnm), en un tramo de 10 km, su pendiente alcanza un valor cercano al 12%. En el tramo estudiado, el estero Tambo y el río Vacas Heladas tienen los cauces con las menores pendientes de la zona descrita.

Hidrología. La información fluviométrica básica a partir de la cual se caracterizó el régimen de esorrentía del estero Tambo-río Vacas Heladas en la zona de los humedales proviene de mediciones (aforos) mensuales realizadas en algunas secciones de la cuenca del río del Toro, pre-definidas con dicho propósito (**Tabla 1.2**). El período total de aforos fue de 19 años para todo el área, entre los años 1981/1982 a 1999/2000. Para el tramo del humedal Tambo-Puquíos, en cambio, el período fue 17 años (1983/1984 - 1999/2000). Las principales características hidrológicas que se desprenden de estos registros son las siguientes:

- Los caudales bajos que escurren por el estero Tambo-río Vacas Heladas se mantienen, en general, por largos períodos;
- puesto que los caudales de alta probabilidad de excedencia que escurren por el estero Tambo-río Vacas Heladas (80% o más), son muy similares a lo largo del año, se infiere que dichos caudales se mantienen, en general, a nivel anual o multi-anual;
- dado que la probabilidad de ocurrencia de caudales altos es baja, la capacidad de extracción de agua en dirección al caudal ecológico mínimo está limitada por los caudales bajos;
- los antecedentes disponibles permiten presumir que el humedal está acomodado para funcionar bajo estas condiciones fluviométricas, y
- dado que la probabilidad de ocurrencia de caudales altos es baja, el impacto que generan los caudales de crecidas en las diversas recargas del sistema se mantiene prácticamente inalterado en el tiempo.

Del análisis hidrológico también se desprende que el equilibrio hídrico del humedal se mantiene debido a aportes de agua tanto superficiales como subterráneos. En este caso los aportes superficiales provienen de:

- la precipitación (sólida y líquida) que cae directamente sobre el humedal, y una vez que infiltra como agua líquida, queda disponible para satisfacer los requerimientos hídricos de la fitocenosis y,
- aportes de agua desde el estero vía escurrimiento superficial durante los eventos de crecida.

Mientras que los aportes subterráneos a la zona radicular o al acuífero que subyace a ella provienen de:

- los flujos subterráneos laterales a la zona de inundación del estero y vegetación, y
- los flujos subterráneos (o filtraciones) desde el estero hacia el acuífero. Dependiendo de los niveles de energía del acuífero y del estero, este flujo puede invertirse, generando escurrimientos desde el acuífero hacia el estero.

De acuerdo a la naturaleza del acuífero, los niveles de sus napas freáticas varían lentamente. Esta variación es aún más pequeña durante los meses de invierno, cuando las temperaturas disminuyen haciendo que los flujos afluentes o efluentes (hacia o desde los acuíferos) sean aún más pequeños. Esta dinámica temporal hace que, durante períodos de bajo caudal superficial, el sistema agua-vegetación se acomode a las condiciones hídricas presentes (agua más escasa) sin que necesariamente ocurra un colapso irreversible de los prados húmedos.

Tabla 1. 2 Caudales superficiales medios anuales registrados a diferentes altitudes del tramo Estero Tambo-Río Vacas Heladas.

Estación de aforo (msnm)	Cauce y ubicación	Cuenca aportante (km ²)	Caudal medio anual	
			(l/s)	(mm/año)
3.970	Estero Tambo, aguas arriba Cajón ancho	70,5	83,8	37,5
3.940	Río Vacas Heladas, aguas abajo Qda. Vacas Heladas	84,0	114,5	43,0
3.900	Río Vacas Heladas, aguas arriba pozo vertiente	93,0	63,2	21,4
3.825	Río Vacas Heladas, aguas arriba Qda. La Noria	105	122,1	36,7
3.800	Río Vacas Heladas, aguas abajo Qda. La Noria	111,5	181	51,1
2.520	Río Vacas Heladas, aguas arriba confluencia con Río Malo	206,5	305	46,6

Dependiendo de los niveles energéticos del acuífero y del estero, este flujo subterráneo puede invertirse. De acuerdo a la naturaleza del sistema acuífero, los niveles freáticos de los acuíferos varían lentamente. Esta variación es aún más pequeña durante los meses de invierno cuando, al disminuir la temperatura ambiental, los flujos afluentes o efluentes disminuyen.

Recursos bióticos. La vegetación de la matriz esteparia está caracterizada por la presencia de especies vegetales con crecimiento en cojín (e.g., *Adesmia* spp., *Calceolaria* sp., *Azorella* sp.). Las especies dominantes son los subarbustos *Adesmia aegiceras* y *A. echinus* (adesmias), y gramíneas perennes del género *Stipa*, principalmente *S. chrysophylla* y *S. pogonothera* (coirones). La cobertura vegetal de la matriz esteparia es ~27% (Squeo *et al.* 1994). En la vega Tambo (**Figura 1.4**) hay predominio del pasto álcali (*Puccinellia oresigena*, Gramineae), de la pajilla (*Deschampsia caespitosa*), de *Deyeuxia velutina*, (Gramineae) y de *Carex maritima*. La vegetación de la vega Puquíos (**Figura. 1.4**) está formada por las siguientes unidades: (1) vegas laterales asociadas a cursos de agua temporales; están localizadas en las quebradas del sector; tienen una cobertura de ~75% y están dominadas por las gramíneas *Deschampsia caespitosa* y *Deyeuxia velutina*; (2) vegas húmedas de borde de estero; están localizadas al borde del río Vacas Heladas, poseen una vegetación asociada a cursos permanentes de agua; tienen una cobertura vegetal superior al 90% y están dominadas por *Oxychloe andina* y *D. caespitosa*, ambas especies con crecimiento en cojín; (3) vegas salobres correspondientes a vegas ubicadas en sitios alejadas de los cursos de agua o afloramientos. Los suelos de estas vegas poseen una acumulación de sulfatos en su superficie; la cobertura vegetal es ~70%, las especies dominantes son *D. velutina* y *Carex maritima*. Estos parches representan una transición entre la vegetación del humedal con la esteparia del entorno; (4) vegas bajas asociadas a surgencias laterales. Estas dependen del escurrimiento superficial aportado por las surgencias, los parches húmedos se forman donde el agua se encuentra muy cerca de la superficie. La cobertura vegetal es ~100%, están dominadas por el cojín *Oxychloe andina* (>75%) y *D. velutina*. Parches de sustrato salobre ubicados en los bordes más secos de la surgencia, con coberturas >90%, con dominancia de la gramínea *D. velutina* (~76%); (5) pozas donde dominan las especies subacúaticas como el *Triglochin palustre*, *Myriophyllum quitense* y algas verdes filamentosas. La vegetación de borde de esteros está formada por *D. velutina*, *D. caespitosa*, *O. andina* y cojines de musgos.

La fauna de los invertebrados acuáticos más relevante se encuentra en las pozas. Los principales taxa son microcrustáceos Daphnidae, particularmente del género *Alona*, copépodos ciclopoideos y harpacticoideos, anfípodos, especialmente del género *Hyperia*, y ostrácodos de la familia Cyprinidae. Entre los insectos dominan las fases larvales de Diptera, y adultos de Hemiptera de las familias Corixidae y Notonectidae. La fauna de invertebrados asociados al estero Tambo es muy pobre tanto en diversidad como densidad. En los arroyos de las quebradas efluentes con aguas de mejor calidad se pueden encontrar larvas de Ephemeroptera y Trichoptera, junto a Turbellaria (Platyhelminthes) y Oligochaeta (Annelida). El grupo mayoritario de los invertebrados terrestres está formado por insectos. Existen alrededor de 106 familias, la mayoría de ellos pertenecientes al Orden Diptera.

Con respecto a la fauna de vertebrados, no se han detectado peces ni anfibios. Las aves acuáticas y semiacuáticas registradas para el sector utilizan las pozas del humedal como sitios de alimentación y empollamiento. Entre éstas se encuentran la gaviota andina (*Larus serranus*), el piuquén (*Chloephaga melanoptera*) y el pato juarjual (*Lophonetta specularoides*). El chorlito cordillerano (*Phegornis mitchelli*) y el playero de Baird (*Calidris bairdii*). Los principales elementos de la fauna de vertebrados de la matriz esteparia son guanacos, aves granívoras, lagomorfos y zorros. También se encuentran, aunque en menor proporción, roedores y reptiles (Cortés *et al.* 1995). La población de guanacos está conformada por piños de diferente tamaño que usan el humedal como área de pastoreo, abrevadero, revolcadero y descanso. La ornitofauna está representada por cuatro órdenes y trece familias; siendo las Passeriformes el grupo más diverso, con 17 especies; le siguen en importancia las Charadriiformes, especies muy asociadas a los ambientes acuáticos. El grupo de las aves insectívoras es especialmente abundante en las vegas y sus alrededores. Entre las aves visitantes se encontraron al playero de Baird (*Calidris bairdii*), migrador del hemisferio norte y las golondrinas (*Tachycineta leucopyga*, *Hirundo rustica*).

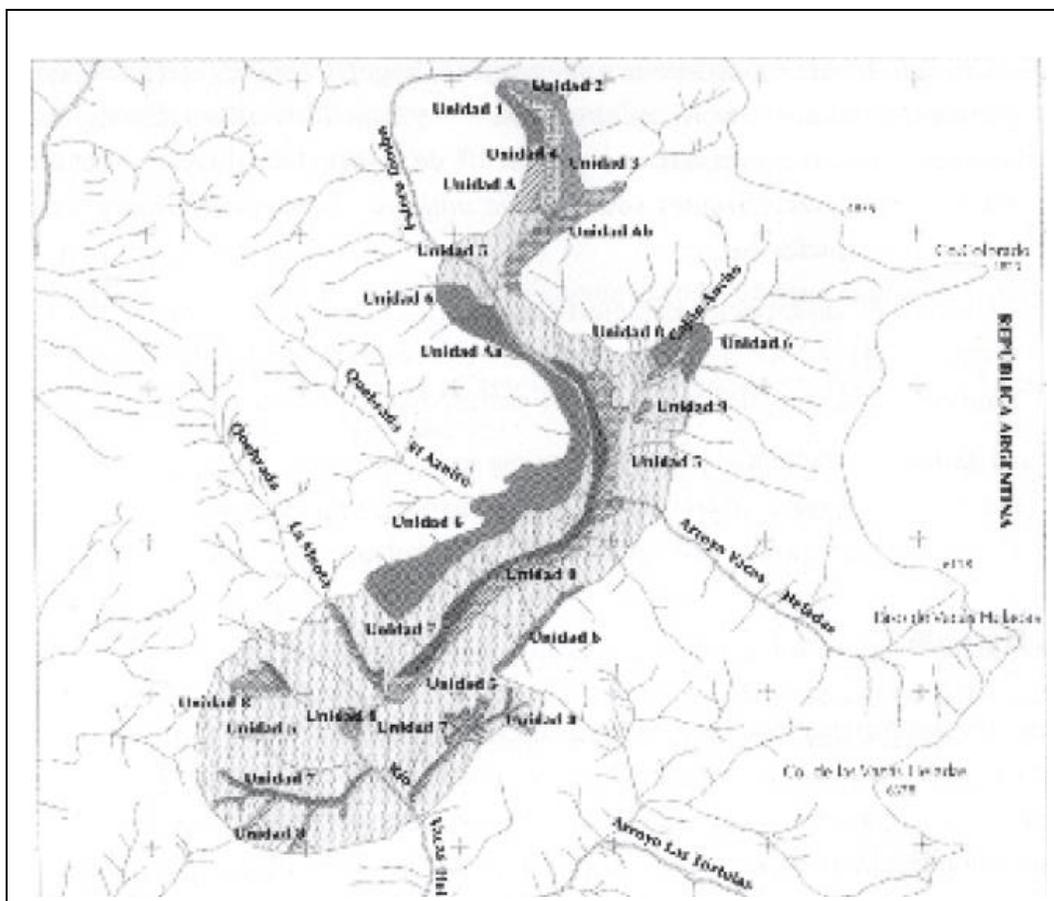


Figura 1. 4 Disposición espacial de las principales unidades de vegetación del humedal Tambo-Puquíos. Unidad A (facies Aa y Ab): muy pobre en cubierta vegetal, logra una cobertura inferior al 0,3%; el resto es roca y suelo desnudo; *Stipa atacamensis* es la única especie encontrada. Unidad 1: piso andino superior (4.220-4.250 msnm); la cobertura vegetal alcanza un promedio de 7,5%. Las especies características son *Cistanthe humilis*, *Menonvillea cuneata*, *Nototriche holocericea*, *S. atacamensis* y *Junellia uniflora*. Unidad 2: piso andino superior; la cobertura vegetal alcanza un promedio de 4,0%. Las especies características son *Chaetanthera sphaeroidalis*, *C. humilis*, *M. cuneata*, *Senecio hickeni* y *S. atacamensis*; Unidad 3: piso andino inferior (por debajo de los 4.220 msnm); posee una cobertura vegetal cercana al 10,7%. Se caracteriza por el predominio de *J. uniflora* y *Azorella cryptantha*. En algunos sitios la cobertura vegetal no supera el 2%. Unidad 4: Piso andino inferior; tiene una cobertura vegetal cercana al 15,2%. Existe predominio de *Adesmia echinus* y *J. uniflora*. Unidad 5: Piso andino inferior. Las especies características son *Adesmia subterranea* (24,5%), acompañada por *S. atacamensis* (6,8%). La cobertura vegetal alcanza un promedio de 43,8%, del cual el 27,3% corresponde a cubierta perenne. Unidad 6: piso andino inferior. Se caracteriza por la dominancia de *S. atacamensis* (11,%) y *A. subterranea* (10,5%), acompañada por *A. echinus* (1,5%). La cobertura vegetal alcanza el valor promedio de 43%. Unidad 7: es una formación azonal de pajonal seco. Corresponde a un área pantanosa de pastos altos dominada por *Puccinellia oresigena* (80%). La cubierta vegetal promedio es cercana al 87%. Unidad 8: es una formación azonal de pajonal húmedo. Corresponde a un área pantanosa de pastos altos dominada *Deschampsia caespitosa* (50%), *Deyeuxia velutina* (25,5%) y *Carex maritima* (13,5%). La cobertura vegetal tiene un valor promedio cercano al 98%. Unidad 9: es una formación azonal. Corresponde a una planicie fértil dominada por *C. maritima* (70%) y *Calandrinia compacta* (7%). La cobertura vegetal promedio es del 83%.

1.4 Literatura citada:

1. Andrade, B.; Peña, H. 1993. Chilean geomorphology and hidrology: response to global change. En: Mooney HA, Fuentes ER, Krongberg BI (eds) ***Earth System Response to Global Change***, pp. 101-113. Academic Press, San Diego, USA.
2. Andrés, J.R.; Gracia, F.J. 2000. Geomorfología litoral. ***Procesos activos, IGME***. Madrid, España, pp. 214.
3. Arroyo, M.; Armesto, J.; Squeo, F.; Gutiérrez, J. 1993. Global change: flora and vegetation of Chile. En: Mooney HA, Fuentes ER, Krongberg BI (eds) ***Earth System Response to Global Change***, pp. 239-263. Academic Press, San Diego, USA.
4. Barbier, E.; Acreman, M.; Knowler, D. 1997. Economic Valuation of Wetlands: A Guide for Policy Makers and Planners. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Bureau. Gland, Switzerland.
5. Cepeda, J.; Zuleta, C.; Osorio, R. 2000. Región de Coquimbo: Biodiversidad y Ecosistemas terrestres. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
6. Cepeda-Pizarro, J. (ed). 2004. Ecología del paisaje de la alta montaña del Valle del Elqui. Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
7. CONAF. 2010. Programa Nacional para la Conservación de Humedales insertos en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado. Santiago, Chile.

8. CONICYT. 1989. El cambio global del clima y sus eventuales efectos en Chile. Comité Nacional de Programa Internacional de la Geosfera-Biosfera (IGBP) Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT). Santiago, Chile.
9. Contreras, L. 1993. Effect of global climatic change on terrestrial mammals of Chile. En: Mooney HA, Fuentes ER, Krongberg BI (eds) ***Earth System Response to Global Change***, pp. 285-293. Academic Press, San Diego, USA.
10. Cordero, D.; Moreno-Díaz, A.; Kosmus, M. 2008. Manual para el desarrollo de mecanismos de pago/compensación de servicios ambientales. Equipo Regional de Competencia en Financiamiento Ambiental. Ecuador.
11. Cortés A.; Torres-Mura, J.; Contreras, L.; Pino, C. 1995. Ediciones Universidad de La Serena. Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
12. Davis, T.; Blasco, D.; Carbonell, M. 1996. Manual de la Convención de Ramsar : una guía a la Convención sobre los humedales de importancia internacional.. IUCN Publication. Madrid, España.
13. Goigel, M. 1989. Landscape ecology: The effect of pattern on process. ***Annual Review Ecology and Systematics*** 20: 171-197.
14. Hails, A. (ed.) 1997. Wetlands, Biodiversity and the Ramsar Convention: The role of the convention on wetlands in the conservation and wise use of biodiversity. Ramsar Convention Bureau. Suiza.
15. Johnson, L.; Gage, S. 1997. Landscape approaches to the analysis of aquatic ecosystems. ***Freshwater Biology*** 37: 113-132.

16. Mejías, R.; Segura, O. 2002. El pago de servicios ambientales en centroamérica. Documento preparado por el Centro Internacional de Política Económica para el Desarrollo Sostenible (CINPE), para el World Resources Institute (WRI). Costa Rica.
17. Ministerio de Medio Ambiente. 2011. Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andino. Santiago, Chile.
18. Mooney, H.; Arroyo, M.; Bond, W.; Canadell, J.; Hobbs, R.; Lavorel, S.; Neilson, R. 2001. Mediterranean-climate ecosystem. Ecological Studies 152. En FS Chapin III, OE Sala & E Huber-Sannwald (eds). **Global diversity in a changing environment: scenarios for the 21st century**, pp. 157-199. Springer-Verlag, New York, USA.
19. Odum, E.; Sarmiento, F. 1998. Ecología: El puente entre ciencia y Sociedad. McGraw-Hill Interamericana. México.
20. Peña, H. 1993. Efectos ambientales derivados del uso de recursos hídricos en Chile. En Espinoza G, P Pisani, LC Contreras & P Camus (eds) **Perfil Ambiental de Chile**, pp. 419-444. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Santiago, Chile.
21. RAMSAR. 2004. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 3a. edición. Ramsar Convention Bureau. Suiza.
22. SAG. 2003. Diagnóstico y monitoreo de los pastizales andinos de la IV Región de Coquimbo. Etapa Provincia de Limarí. Informe Técnico. Servicio Agrícola y Ganadero & Universidad de La Serena, Chile.

23. Squeo, F.; Veit, H.; Arancio, G.; Gutiérrez, J.; Arroyo, M.; Olivares, N. 1993. Spatial heterogeneity of high mountain vegetation in the Andean desert zone of Chile. *Mountain Research and Development* 13: 203-209.
24. Squeo, F.; Arancio, G. 1994. Línea de Base de Flora y Vegetación. Proyecto Tambo. Informe Técnico. Departamento de Biología. Universidad de La Serena. La Serena, Chile.
25. UICN. 2002. Seguimiento de las Directrices de la Convención Ramsar en la Planificación de los Humedales de Importancia Internacional en Centroamérica. San José, Costa Rica.
26. UICN. 2003. World Heritage Convention: Effectiveness 1992-2002 and Lessons for Governance. Canadá.
27. UNEP. 2010. Examen a fondo del programa de trabajo sobre la diversidad biológica de los ecosistemas de las aguas continentales. Convenio sobre diversidad biológica. Nairobi, Kenya.
28. Veit, H. 1993. Upper Quaternary landscape and climate evolution in the Norte Chico: an overview. *Mountain Research and Development* 13: 138-144.

Capítulo 2

Dinámica fluviométrica y limnológica de un cuerpo superficial de agua asociado a un prado húmedo de los Andes del norte-centro de Chile.

En cumplimiento del primer y segundo objetivo de esta tesis doctoral se trabajó este capítulo, él que se plasmó en el artículo científico ***Dinámica fluviométrica y limnológica de un cuerpo superficial de agua asociado a un prado húmedo de los Andes del norte-centro de Chile***, publicado en la revista científica ***Idesia***, revista científica que incluye estudios originales e inéditos de sus académicos y profesionales y de aquéllos pertenecientes a entidades públicas y privadas, chilenas o extranjeras, que deseen difundir sus experiencias sobre ciencias agropecuarias y disciplinas afines, tales como ciencias medioambientales, y que correspondan a temáticas relacionadas preferentemente con Biomas de desierto y agroecosistemas áridos y semiáridos del Norte de Chile, y de otros países.

El artículo señalado fue publicado en el volumen 32, Nº 2, páginas 11-19 en su número de Marzo-Mayo de 2014 de dicha revista y se presenta en el anexo 1 de esta tesis doctoral.

Respecto a lo desarrollado en este artículo, se puede señalar que a partir de una base de datos que cubrió 18 años, se analizó el comportamiento de algunos parámetros limnéticos de un cuerpo superficial de agua presente en una vega ubicada en la alta montaña de una hoya hidrográfica de los Andes del norte-centro de Chile. Se documenta la dinámica fluviométrica y la variación temporal de diversos parámetros físicos e hidroquímicos. El sistema se caracterizó por una elevada variabilidad temporal (tanto anual como mensual) de los parámetros estudiados. Esta variabilidad impidió detectar patrones temporales. El caudal más bajo mostró una clara correspondencia con la precipitación observada, no así el caudal más alto. Las características hidroquímicas del cuerpo de agua son consistentes con las características geológicas del área de estudio.

Capítulo 3

Algunas características abióticas de pozas superficiales interiores presentes en una vega altoandina del desierto transicional de Chile.

En cumplimiento del tercer y cuarto objetivo de esta tesis doctoral se trabajó este capítulo, el que se plasmó en el artículo científico ***Algunas características abióticas de pozas superficiales interiores presentes en una vega altoandina del desierto transicional de Chile***, publicado en la revista científica ***Idesia***, revista científica que incluye estudios originales e inéditos de sus académicos y profesionales y de aquéllos pertenecientes a entidades públicas y privadas, chilenas o extranjeras, que deseen difundir sus experiencias sobre ciencias agropecuarias y disciplinas afines, tales como ciencias medioambientales, y que correspondan a temáticas relacionadas preferentemente con Biomas de desierto y agroecosistemas áridos y semiáridos del Norte de Chile, y de otros países.

El artículo señalado fue publicado en el volumen 33, Nº 3, páginas 9-15, en su número de Junio-Agosto de 2015 de dicha revista y se presenta en el anexo 2 de esta tesis doctoral.

Respecto a lo desarrollado en este artículo, se puede señalar que las pozas estudiadas forman parte de una vega ubicada en el piso altoandino de la hoya hidrográfica del río Elqui. Estas resultaron ser microlimnotopos heliotópicos (homeotérmicos), mesotróficos y mesopoikilohalinos. Las pozas mostraron niveles elevados de metales disueltos, principalmente Ca (promedio: ~205 mg/l), Na (~60 mg/l), Mg (~60 mg/l) y K (~13 mg/l), y los inorgánicos no metálicos sulfato (~976 mg/l), cloruro (~34,2 mg/l), fosfato (~23 mg/l), bicarbonato (~11 mg/l) y nitrato (~3,3 mg/l). Excluyendo Hg, Se y nitrito, las pozas presentaron niveles traza de Al, As total, Cd, CN, Cu, Cr, Fe, Ba, Be, Co, Zn, Mo, Ni, Pb, Li, Ag y V. El patrón catiónico de las pozas fue $Ca > Na > Mg > K > Mn$; a su vez, el patrón aniónico fue sulfato > cloruro > fosfato > carbonato > Fl. Aunque no fue estudiado por nosotros, las características hidroquímicas de estos cuerpos de agua parecen reflejar las características del sustrato geológico de las montañas por medio del que el agua fluye hacia la vega.

Capítulo 4

Análisis de la calidad del agua de la vega Tambo-Puquíos según la normativa chilena y española.

En este capítulo se lleva a cabo un análisis de la calidad de agua de la vega Tambo Puquíos de acuerdo a las normas chilenas y españolas de calidad para aguas continentales y consumo humano, aquí se analiza el agua de dos cuerpos de agua existentes en la vega.

Primeramente se describe un marco conceptual referido a aspectos relevantes para este trabajo en lo concerniente a las normas de calidad de aguas, tanto de la legislación chilena como de la legislación española. A continuación se describen los materiales y métodos empleados para la realización de este capítulo, se describe el sitio de estudio y posteriormente se detallan los parámetros analizados en ambos cuerpos de agua, de acuerdo a la base de datos con que se cuenta. Seguidamente se presentan los resultados y discusión, inicialmente se realiza un análisis de cada cuerpo de agua según calidad de agua para consumo humano y posteriormente según calidad de agua continental, posteriormente se identifican hallazgos del análisis, para finalmente presentar las conclusiones a base del análisis anteriormente mencionado.

4.1 Marco conceptual

A continuación se presentan los aspectos más relevantes considerados para este trabajo, respecto a las normas de calidad de agua de Chile y España en lo que se refiere a agua para consumo humano y aguas continentales o riego.

4.1.1 Aspectos normativos chilenos en calidad de agua

El 14 de septiembre de 1992 el presidente de la República de Chile en mensaje público indica la iniciación del proyecto de Ley de Bases del Medio Ambiente.

Este proyecto de ley se plasma con el fin de mejorar la legislación chilena de ese momento, la que había sido dictada en forma sectorial y compartimentalizada, sin una visión global e integradora. Así mismo, no se había hecho cargo de las relaciones de interacción e interdependencia que se dan entre los diferentes componentes del ambiente. También, la legislación chilena había carecido de principios generales y objetivos predefinidos a los cuales responder dentro de una política ambiental (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 1994).

A) Ley N° 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Modificada por la Ley N° 20.417)

El 09 de marzo de 1994, se publicó en el Diario Oficial de Chile N° 34.808 de Chile la Ley N° 19.300 que establece las Bases Generales del Medio Ambiente de Chile. En diciembre de 2011 se actualiza la Ley N° 19.300, versión elaborada por la División Jurídica del Ministerio del Medio Ambiente, luego de que fuera dictada la Ley N° 20.417, que crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación y la Superintendencia del Medio Ambiente, publicada en el Diario Oficial de Chile N° 39.570 el 26 de enero de 2010 .

A modo general, la ley de bases del medio ambiente dentro de sus disposiciones generales establece en el **Artículo 1°**: *El derecho a vivir en un medio ambiente*

libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental se regularán por las disposiciones de esta ley, sin perjuicio de lo que otras normas legales establezcan sobre la materia.

En esta ley se establecen las bases para la normativa de calidad de las diversas componentes medioambientales de los ecosistemas bióticos y abióticos (agua, aire, suelo, biota, etc.). Las normas de calidad ambiental en general, y de aguas en particular, están asociadas a un objetivo de protección del recurso, por lo cual conceptualmente corresponden a normas de calidad ambiental primarias o secundarias (Fávero *et al.*, 1998). La primera referencia de la ley respecto a las normas de calidad primarias y secundarias se encuentra en el Artículo 2º, donde se establecen las definiciones, como se detalla a continuación:

Norma Primaria de Calidad Ambiental: *aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población;*

Norma Secundaria de Calidad Ambiental: *aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza;*

Consiguientemente, la otra sección que se refiere a las normas de calidad de las componentes ambientales, se encuentra en el Artículo 32, pronunciando lo competente a la promulgación de las normas de calidad, según se detalla a continuación:

Mediante decreto supremo, que llevará las firmas del Ministro del Medio Ambiente y del Ministro de Salud, se promulgarán las normas primarias de calidad ambiental. Estas normas serán de aplicación general en todo el territorio de la República y definirán los niveles que originan situaciones de emergencia. El Ministerio de Salud podrá solicitar fundadamente al Ministerio del Medio Ambiente la dictación de una norma primaria de calidad, la que deberá dictarse dentro de un plazo que no podrá exceder de cinco años, a menos que dentro de tal plazo indique las razones técnicas para no acoger la solicitud.

Mediante decreto supremo que llevará las firmas del Ministro del Medio Ambiente y del ministro competente según la materia de que se trate, se promulgarán las normas secundarias de calidad ambiental.

Actualmente en Chile se han promulgado diversidad normas de calidad secundaria para varios ríos del territorio, como por ejemplo Maipo, Mataquito, Aconcagua, etc., aun así la mayoría de los ríos de Chile continua sin tener normas de calidad secundaria que las controlen, las cuales siguen en elaboración, están como proyecto o aún no se han elaborado.

B) Normas Chilenas de calidad oficiales del sector sanitario, aplicables a aguas superficiales (30 junio 2015):

Según la información de la Superintendencia de Servicios Sanitarios de Chile, existen diversas normas de calidad de agua. A continuación en la **Tabla 4.1** se presentan las normas de tipo general, y las referidas a agua potable.

Tabla 4. 1. Listado de Normas chilenas (NCh) de calidad de agua.

Normativa	Número	Año	Título
Generales			
NCh	1	2011	Normas Chilenas NCh - Definiciones y procedimientos para su estudio y mantención
NCh	2	2006	Guía para la estructuración y redacción de normas chilenas
NCh	11	2008	Documentación - Presentación de informes científicos y técnicos
NCh	19	1979	Prevención de riesgos, identificación de sistemas de tuberías
NCh	43	1961	Selección de muestras al azar.
NCh	44	1978	Inspección por atributos - Tablas y procedimientos de muestreo.
NCh	349	1955	Prescripción de seguridad en excavaciones
NCh	436	2000	Prevención de accidentes del trabajo - Disposiciones generales.
NCh	2237	1999	Procedimientos de muestreo para inspección por atributos - Planes de muestreo indexados por nivel de calidad aceptable (AQL) para la inspección lote por lote
NCh	2880	2004	Compost - Clasificación y requisitos
NCh	17025	2005	Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
Agua Potable Ensayos Requisitos			
NCh	400	1988	Sulfatos de aluminio sintético para tratamiento de agua- Muestreo y métodos de análisis
NCh	401	1951	Grava y arena para filtros de agua potable
NCh	409/1	2005	Agua potable - parte1 : Requisitos
NCh	409/2	2004	Agua potable - parte2 : Muestreo
NCh	423	1970	Agua - Determinación del hierro.
NCh	424	1991	Agua - Determinación del carácter incrustante o agresivo
NCh	425	1971	Agua - Ensayo - Determinación del arsénico
NCh	426	1963	Agua para análisis
NCh	426/2	1997	Agua grado reactivo para análisis - Especificaciones - Parte 2: Análisis físico-químico y microbiológico.
NCh	691	1998	Agua potable-Conducción, regulación y distribución-Requisitos
NCh	692	2000	Agua potable. Plantas elevadoras. Especificaciones generales
NCh	711	1971	Arquitectura y Construcción- designación gráfica de elementos para instalaciones sanitarias
NCh	777/1	2008	Agua potable - Fuentes de abastecimiento y obras de captación - Parte 1: Captación de aguas superficiales

Tabla 4.1 (continuación). Listado de Normas chilenas (NCh) de calidad de agua.

NCh	777/2	2000	Agua potable - Fuentes de abastecimiento y obras de captación - Parte 2: Captación de aguas subterráneas
NCh	1061	1975	Cloro líquido. Carga, recepción y descarga. Condiciones de seguridad en carros estanques de ferrocarril.
NCh	1086	1986	Sulfato de aluminio sintético para tratamiento del agua - Especificaciones.
NCh	1104	1998	Ingeniería sanitaria- Presentación y contenido de proyectos de sistemas de agua potable y alcantarillado
NCh	1194/II	1976	Cloro líquido. Métodos de ensayo.
NCh	1333	1987	Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.
NCh	1365	1978	Agua potable - Plantas de tratamiento - Terminología.
NCh	1366	1979	Agua Potable - Plantas de tratamiento - Generalidades.
NCh	1367	1978	Agua potable - Plantas de tratamiento - Desarenadores y sedimentadores simples (sin coagulación previa).
NCh	1620/1	1984	Agua potable - Determinación de bacterias coliformes totales. Parte 1: Método de los tubos múltiples (NMP).
NCh	1620/2	1984	Agua potable - Determinación de bacterias coliformes totales. Parte 2: Método de filtración por membrana.
NCh	1801	1980	Agua - Determinación de plomo - Método colorimétrico
NCh	1802	1980	Agua - Determinación de cromo - Método colorimétrico.
NCh	1803	1980	Agua - Determinación de cadmio - Método colorimétrico con Ditizona.
NCh	1804	1980	Agua - Determinación de estaño orgánico como estaño. Método colofimétrico.
NCh	1878	1981	Agua - Determinación de metales (Cd, Ca, Co, Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, Ag, Pb y Zn), por espectrofotometría de absorción atómica - Método directo.
NCh	1879	1981	Agua - Determinación de metales (Cd, Cr, Pb) por espectrofotometría de absorción atómica - Método indirecto.
NCh	1880	1981	Agua - Pretratamiento de muestras para análisis de metales.

Tabla 4.1 (continuación). Listado de Normas chilenas (NCh) de calidad de agua.

NCh	1938/1	1985	Artefactos de producción instantánea de agua caliente para usos sanitarios que utilizan combustibles gaseosos (calefones) - Parte 1: requisitos generales de fabricación.
NCh	1938/2	1985	Artefactos de producción Instantánea de agua caliente para usos sanitarios que utilizan combustibles gaseosos (calefones) - Parte 2: Métodos de ensayo.
NCh	2043	1998	Aguas - Métodos de determinación simultánea de bacterias coliformes totales y <i>Escherichia coli</i> mediante la técnica del sustrato cromogénico.
NCh	2485	2000	Instalaciones domiciliarias de agua potable - Diseño, cálculo y requisitos de las redes interiores
NCh	2972	2008	Aguas - Determinación simultánea de bacterias coliformes totales y <i>Escherichia coli</i> mediante método de filtración por membrana con m-Colibblue
NCh	3098	2008	Sulfato férrico para tratamiento del agua - Requisitos y métodos de análisis

Fuente: Sitio web de Servicios Sanitarios, Chile.

Así dentro de la lista de normas mencionadas en la **Tabla 4.1**, la que fija estándares secundarios para calidad de aguas continentales, es la Norma Chilena Oficial 1333 (dada su definición en la ley de Bases del Medio Ambiente). Así mismo, la Norma Chilena 409 sobre Agua Potable puede considerarse como la norma primaria de calidad de agua (Jaksic *et al.*, 1993).

C) Norma Chilena 409 (NCh 409). Agua potable. Requisitos

En 2005 se hace oficial la segunda versión de la NCh409. Esta norma anula y reemplaza a la NCh 409 oficial de 1984, declarada Oficial de la República por Decreto N°11, de fecha 16 de enero de 1984, del Ministerio de Salud Pública, publicado en el Diario Oficial de Chile N° 31.813 del 03 de marzo de 1984.

Esta norma fue aprobada por el Consejo del Instituto Nacional de Normalización de Chile, en sesión efectuada el 26 de julio de 2005. Así mismo fue declarada Oficial en la República de Chile por Decreto Exento N°446, de fecha 16 de junio de

2006, del Ministerio de Salud, publicado en el Diario Oficial de Chile N° 38.498 del 27 de junio de 2006. Finalmente fue corregida y reimpressa en 2006 (Instituto Nacional de Normalización, 1984).

Esta norma establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional.

A continuación se detallan los aspectos más relevantes de la norma, en lo que respecta a este trabajo (Instituto Nacional de Normalización, 1984).

Criterios para elementos o sustancias químicas de importancia para la salud humana

El agua potable no debe contener elementos o sustancias químicas en concentraciones totales mayores que las indicadas en **Tablas 4.2 y 4.3**, referentes al contenido máximo de elementos o sustancias químicas de importancia para la salud humana presentes en el agua potable.

Tabla 4. 2 Elementos esenciales de NCh409

Elemento	Expresado como elementos totales	Límite máximo mg/l
Cobre	Cu	2,0
Cromo total	Cr	0,005
Fluoruro	F	1,5
Hierro	Fe	0,3
Manganeso	Mn	0,1
Magnesio	Mg	125,0
Selenio	Se	0,01
Zinc	Zn	3,0

Tabla 4. 3 Elementos o sustancias no esenciales en la NCh409

Elemento o sustancia	Expresado como elementos o sustancias totales	Límite máximo mg/l
Arsénico	As	0,01
Cadmio	Cd	0,01
Cianuro	CN ⁻	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Nitrato	NO ⁻³	50
Nitrito	NO ⁻²	3
Razón nitrato + nitrito ⁽¹⁾	1)	1
Plomo	Pb	0,05

⁽¹⁾ Suma de las razones entre la concentración media de cada uno y su respectivo límite máximo.

Requisitos de calidad para parámetros organolépticos

El agua potable debe cumplir con los requisitos indicados en **Tabla 4.4**.

Tabla 4. 4 Parámetros relativos a características organolépticas

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo
Físicos:			
Color verdadero	-	Unidad Pt-Co	20
Olor	-	-	inodora
Sabor	-	-	insípida
Inorgánicos:			
Amoniaco	NH ₃	mg/l	1,5
Cloruro	Cl ⁻	mg/l	400
pH	-	-	6,5 <pH< 8,5
Sulfato	SO ⁻² ₄	mg/l	500
Sólidos disueltos totales	-	mg/l	1500
Orgánicos:			
Compuestos fenólicos	Fenol	µg/l	2

D) Norma Chilena 1333 (NCh 1333). Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.

La NCh 1333 fue aprobada por el Consejo del Instituto Nacional de Normalización en sesión efectuada el 07 de abril de 1978. Seguidamente fue declarada Oficial de la República de Chile por Decreto N° 867 de fecha 15 de junio de 1978 del Ministerio de Obras Públicas, publicado en el Diario Oficial de Chile N° 30.107, del 05 de julio de 1978.

En 1987 la norma fue modificada, la modificación fue aprobada por el Consejo del Instituto Nacional de Normalización, en sesión efectuada el 06 de mayo de 1987. Esta modificación fue declarada Oficial de la República de Chile, por Decreto N° 105, de fecha 08 de mayo de 1987, del Ministerio de Obras Públicas y publicada en el Diario Oficial de Chile N° 32.776 de fecha 22 de mayo de 1987.

Esta norma fija criterios a la calidad del agua de acuerdo a requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos, según el uso determinado.

A continuación se detallan los aspectos más relevantes de la norma, en lo que respecta a este trabajo (Instituto Nacional de Normalización, 1978).

Alcance y campo de aplicación

Esta norma establece los requisitos de calidad del agua de acuerdo a su uso.

Esta norma se debe aplicar a las aguas destinadas a los usos siguientes:

- a) agua para consumo humano;
- b) agua para la bebida de animales;
- c) riego;

- d) recreación y estética;
 - d.1) estética;
 - d.2) recreación con contacto directo;
 - d.3) recreación sin contacto directo; y
- e) vida acuática.

Requisitos del agua para consumo humano

Debe cumplir con la norma NCh409.

Requisitos del agua para la bebida de animales

Debe cumplir con la norma NCh409. La Autoridad Competente debe determinar casos especiales.

Requisitos del agua para riego. Requisitos químicos

El agua para riego debe tener un pH comprendido entre 5,5 y 9,0.

En la **Tabla 4.5** se dan los valores máximos permisibles de algunos elementos químicos en agua de riego.

Tabla 4. 5 Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego.

Elemento	Unidad	Límite máximo
Aluminio (Al)	mg/l	5,00
Arsénico (As)	mg/l	0,10
Bario (Ba)	mg/l	4,00
Berilio (Be)	mg/l	0,10
Boro (B)	mg/l	0,75
Cadmio (Cd)	mg/l	0,010
Cianuro (CN ⁻)	mg/l	0,20
Cloruro (Cl ⁻)	mg/l	200
Cobalto (Co)	mg/l	0,050
Cobre (Cu)	mg/l	0,20
Cromo (Cr)	mg/l	0,10
Fluoruro (F ⁻)	mg/l	1,00
Hierro (Fe)	mg/l	5,00
Litio (Li)	mg/l	2,50
Manganeso (Mn)	mg/l	0,20
Mercurio (Hg)	mg/l	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/l	0,010
Níquel (Ni)	mg/l	0,20
Plata (Ag)	mg/l	0,20
Plomo (Pb)	mg/l	5,00
Selenio (Se)	mg/l	0,020
Sodio porcentual (Na)	%	35,00
Sulfato (SO ₄ ⁼)	mg/l	250,00
Vanadio (V)	mg/l	0,10
Zinc (Zn)	mg/l	2,0

Conductividad específica y sólidos disueltos totales

En la **Tabla 4.6** se da una clasificación de aguas para riego de acuerdo a sus condiciones de salinidad, en base a las características de conductividad específica y concentración de sólidos disueltos totales.

Tabla 4. 6 Clasificación, según su salinidad, de las aguas para riego

Clasificación	Conductividad específica, c, μ mhos/cm a 25°C	Sólidos disueltos totales, s, mg/l a 105°C
Agua con la cual generalmente no se observan efectos perjudiciales	$c \leq 750$	$s \leq 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < c \leq 1500$	$500 < s \leq 1000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita métodos de manejo cuidadosos	$1500 < c \leq 3000$	$1000 < c \leq 2000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3000 < c \leq 7500$	$2000 < c \leq 5000$

Los valores de conductividad específica de un curso o masa de agua en particular no deben ser incrementados más allá de los límites que la Autoridad Competente determine, de acuerdo con el tipo de cultivo, manejo del agua y calidad excepcional del suelo, de modo de no afectar la vida silvestre.

4.1.2 Aspectos normativos españoles de calidad de agua

Según la información del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, la legislación que rige la calidad de las aguas continentales es el Real Decreto 60 de 2011.

Así mismo, según la información del Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad de España, la legislación que rige la calidad del agua para consumo humano es el Real Decreto 140 de 2003.

Ambos Reales Decretos, junto con sus aspectos más importantes para este trabajo, se describen a continuación.

A) Real Decreto 60/2011 (RD60), de 21 de enero, sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas.

El 16 de diciembre de 2008 se aprobó la Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a las normas de calidad ambiental (NCA) en el ámbito de la política de aguas. Su objeto es establecer NCA para las sustancias prioritarias y para otros contaminantes, con el objetivo de conseguir un buen estado químico de las aguas superficiales (Diario Oficial de la Comunidad Europea, Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del consejo de 16 de diciembre de 2008).

El 21 de enero de 2011 se establece en España el RD60, éste tiene por objeto establecer NCA para las sustancias prioritarias y para otros contaminantes de riesgo en el ámbito europeo; y para las sustancias preferentes de riesgo en el ámbito estatal. Asimismo, incorpora las especificaciones técnicas del análisis químico y del seguimiento del estado de las aguas, y fija el procedimiento para calcular las NCA de los contaminantes con objeto de conseguir un buen estado de las aguas (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 2011).

A continuación en las **Tablas 4.7 y 4.8** se detallan algunos de los valores máximos establecidos por este real decreto, los que se fijan en los anexos 1 y 2 de éste.

Tabla 4. 7 Anexo I del RD 60. Normas de Calidad Ambiental para sustancias prioritarias y para otros contaminantes. Apartado A. Normas de Calidad Ambiental (NCA).

MA: media anual; CMA: concentración máxima admisible; Unidad: [$\mu\text{g/l}$].

Nombre de la sustancia	NCA-MA(b) Aguas superficiales continentales(c)	NCA-CMA(d) Aguas superficiales continentales(c)
* Cadmio y sus compuestos (en función de las clases de dureza del agua)(f)	$\leq 0,08$ (Clase 1) $0,08$ (Clase 2) $0,09$ (Clase 3) $0,15$ (Clase 4) $0,25$ (Clase 5)	$\leq 0,45$ (Clase 1) $0,45$ (Clase 2) $0,6$ (Clase 3) $0,9$ (Clase 4) $1,5$ (Clase 5)
Plomo y sus compuestos	7,2	no aplicable
* Mercurio y sus compuestos	0,05(i)	0,07
Níquel y sus compuestos	20	no aplicable

* *Identificada como sustancia peligrosa prioritaria.*

^(b) *Este parámetro es la norma de calidad ambiental expresada como valor medio anual (NCA-MA). Salvo que se especifique otra cosa, se aplica a la concentración total de todos los isómeros.*

^(c) *Las aguas superficiales continentales incluyen los ríos y lagos y las masas de agua artificiales o muy modificadas conexas.*

^(d) *Este parámetro es la norma de calidad ambiental expresada como concentración máxima admisible (NCA-CMA). Cuando en NCA-CMA se indica «no aplicable», se considera que los valores NCA-MA protegen contra los picos de contaminación a corto plazo en el caso de los vertidos continuos, ya que son significativamente inferiores a los valores calculados sobre la base de la toxicidad aguda.*

^(f) *Por lo que respecta al cadmio y sus compuestos (número 6), los valores de la NCA varían en función de la dureza del agua con arreglo a cinco categorías (Clase 1: $< 40 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$, Clase 2: de 40 a $< 50 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$, Clase 3: de 50 a $< 100 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$, Clase 4: de 100 a $< 200 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$ y Clase 5: $\geq 200 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$).*

⁽ⁱ⁾ *Si el órgano competente de cada Demarcación Hidrográfica no aplica la NCA en la biota, introducirá una NCA más estricta para las aguas a fin de alcanzar los mismos niveles de protección que la NCA para la biota que Figuran en el artículo 7, apartado 1 del presente real decreto. El Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino notificará a la Comisión y a los demás Estados miembros, a través*

del Comité a que se refiere el artículo 21 de la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, las razones y el fundamento que les han llevado a adoptar este planteamiento, la NCA alternativa establecida para las aguas, incluidos los datos y la metodología a partir de los cuales se ha obtenido la NCA alternativa, y las categorías de aguas superficiales a las que se aplicarán.

Tabla 4. 8 Anexo II del RD 60. Normas de Calidad Ambiental para sustancias preferentes. Apartado A. Normas de Calidad Ambiental (NCA).

MA: media anual; Unidad: [$\mu\text{g/l}$].

Nombre de la sustancia	NCA-MA(b) Aguas superficiales continentales(c)	NCA-MA(b) Otras aguas superficiales
Arsénico	50	25
Cobre(d)	Dureza del agua (mg/L CaCO_3)	NCA-MA
	$\text{CaCO}_3 \leq 10$	5
	$10 < \text{CaCO}_3 \leq 50$	22
	$50 < \text{CaCO}_3 \leq 100$	40
	$\text{CaCO}_3 > 100$	120
Cromo VI	5	5
Cromo	50	no aplicable
Selenio	1	10
Zinc(d)	Dureza del agua (mg/L CaCO_3)	NCA-MA
	$\text{CaCO}_3 \leq 10$	30
	$10 < \text{CaCO}_3 \leq 50$	200
	$50 < \text{CaCO}_3 \leq 100$	300
	$\text{CaCO}_3 > 100$	500
Cianuros totales	40	no aplicable
Fluoruros	170	no aplicable
	0	

(b) Este parámetro es la norma de calidad ambiental expresada como valor medio anual (NCA-MA).

(c) Las aguas superficiales continentales incluyen ríos y lagos y las masas de agua artificiales o muy modificadas conexas.

(d) Por lo que respecta a estas sustancias, los valores de la NCA en aguas superficiales continentales varían en función de la dureza del agua con arreglo a cuatro categorías.

B) REAL DECRETO 140/2003 (RD 140), de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

Dada la importancia de la protección de la salud de los consumidores para la salud humana y acorde a La publicación de la Directiva 98/83/CE, de 3 de noviembre de 1998, se hizo necesario el establecimiento a escala nacional (España) de criterios de calidad del agua de consumo humano (Diario Oficial de la Comunidad Europea. Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998).

Estos criterios se aplicarán a todas aquellas aguas que, independientemente de su origen y del tratamiento de potabilización que reciban, se utilicen en la industria alimentaria o se suministren a través de redes de distribución pública o privada, depósitos o cisternas.

Se fijan parámetros y valores paramétricos a cumplir en el punto donde se pone el agua de consumo humano a disposición del consumidor. Estos valores se basan principalmente en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y en motivos de salud pública aplicándose, en algunos casos, el principio de precaución para asegurar un alto nivel de protección de la salud de la población (Ministerio de la Presidencia, España. Boletín Oficial del Estado número 45. Viernes 21 de febrero 2003)

A continuación en las **Tablas 4.9 y 4.10** se detallan algunos de los valores máximos establecidos por este real decreto, los que se fijan en el anexo 1 de éste.

Tabla 4. 9 Anexo I del RD 140. Parámetros y valores paramétricos. B1.Parámetros químicos.

Parámetro	Valor paramétrico	
Antimonio....Hasta el 31/12/2003....	5,0	µg/l
ArsénicoHasta el 31/12/2003 . . .	10,0	µg/l
Boro	1,0	mg/l
Cadmio	5.0	µg/l
Cianuro	50	µg/l
Cobre	2,0	mg/l
Cromo	1.5	mg/l
Fluoruro	1.0	µg/l
Mercurio	20	µg/l
Níquel Hasta el 31/12/2003 . . .	50	µg/l
Nitrato	50	µg/l
Nitritos:		
Selenio.....	10	µg/l

Tabla 4. 10 Anexo I del RD 140. Parámetros y valores paramétricos. C.Parámetros indicadores

Parámetro	Valor paramétrico	
Aluminio	200	µg/l
Cloruro	1,0	mg/l
Conductividad	250	mg/l
Hierro	15	mg/l
Manganeso	50	µg/l
pH:		
Valor paramétrico mínimo	6,5	Unidades de pH
Valor paramétrico máximo	9,5	Unidades de pH
Sodio	200	mg/l
Sulfato	250	mg/l

4.2 Materiales métodos

4.2.1 Sitio de estudio

El presente estudio se realizó en un cuerpo de agua de turbera localmente denominado vega Tambo-Puquíos (VTP en adelante), ubicado en la sección de alta andina de la cuenca del río Elqui (**Figura 4.1**). La VTP se encuentra en un estrecho valle, a 3.850-4000 msnm. Tiene una extensión de ± 6 km y una superficie de ± 10 km². Deriva su agua de pequeños arroyos y riachuelos que bajan la pendiente desde las montañas aledañas, a partir de su propia capa de nieve formada durante el invierno y del agua subterránea. La VTP es plana en la mayoría de los sectores, con un patrón topográfico micro de la vegetación formada por cojines y montículos. En otros sectores, es estrecha y discontinua. Los hábitats acuáticos son un arroyo (el arroyo Tambo), agua ligada a su matriz de turba y el suelo mineral subyacente, y una serie de estanques pequeños y de poca profundidad, la mayoría de ellos temporales. Descripciones detalladas de esta micro- cuenca y de la VTP se encuentran en Cepeda-Pizarro (2013). En la **Figura 4.2** se puede apreciar una vista general de la VTP. Los cuerpos de agua analizados en la VTP fueron el estero Tambo, que corre por el bode oeste de la VTP, y una serie de pozas superficiales interiores presentes en la vega Puquíos.

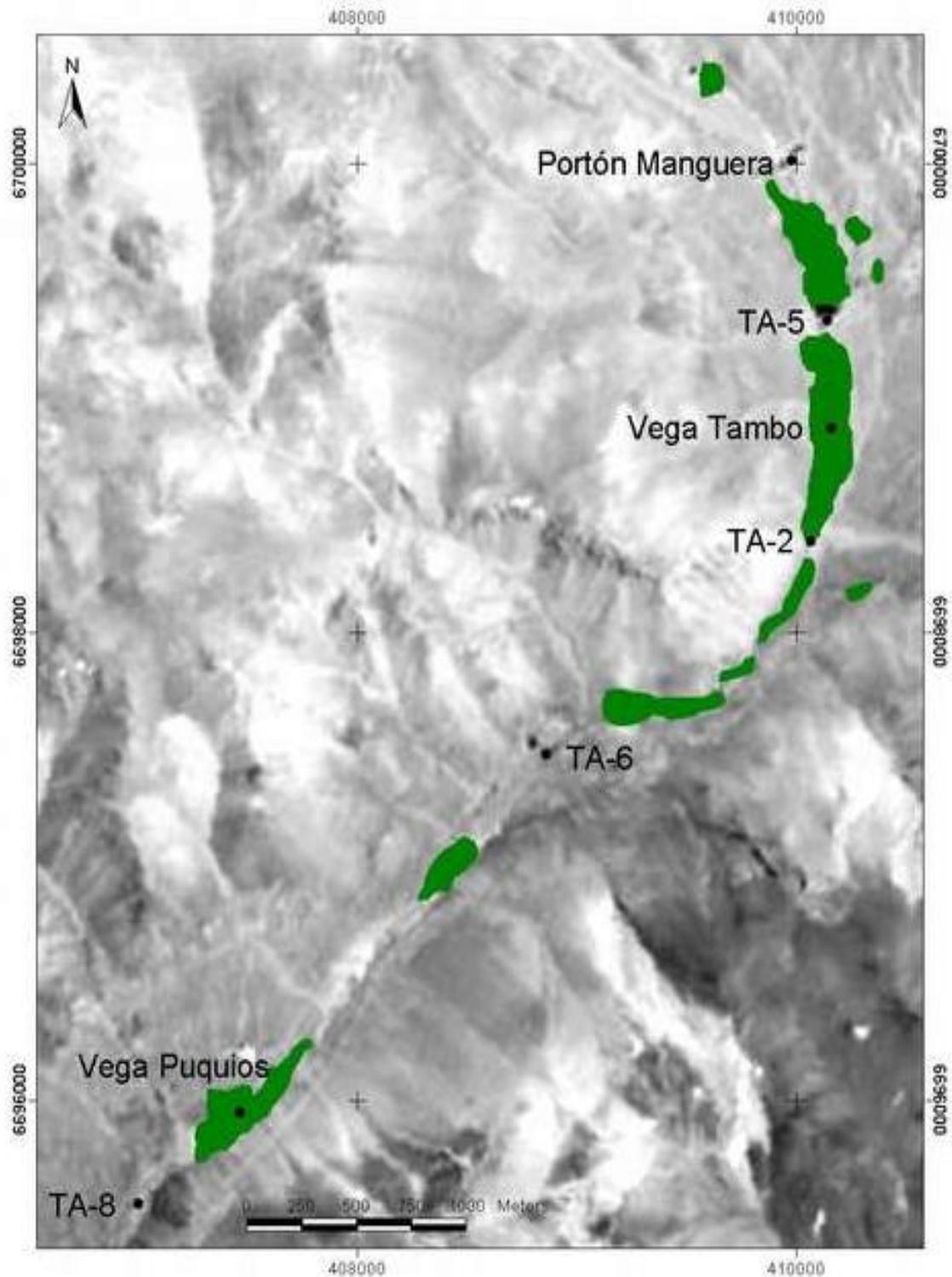


Figura 4. 1 Fisiografía del área de la VTP (3850-4000 msnm). Imagen Aster del 4 de febrero de 2003. TA: estaciones de bombeo de agua (CMEI) (Gentileza de FA Squeo).



Figura 4. 2 Vista general de la vega estudiada (VTP, 3.940 a 3.850 msnm).

4.2.2 Parámetros examinados

La información base para llevar a cabo el análisis del estero Tambo y las pozas interiores superficiales de la vega Puquíos fue proporcionada por la Oficina de Asuntos Ambientales de la ex Compañía Minera El Indio (Barrick, Chile), cuyo acceso fue recientemente liberado de la condición de uso restringido y privado. Se analizó el monitoreo realizado en la VTP, específicamente el estero Tambo (**Figura 4.3**) y 4 pozas de poca profundidad en la vega Puquíos, área aproximada de 0.3 a 0.5 m (**Figura 4.4**). Para el análisis del estero Tambo se usó la información del período de 1982 a 1999, donde los parámetros analizados fueron: pH, residuos sólidos en suspensión (RSF), Fe, Mn, Cu, As total, FI y Sulfato. Para el análisis de las pozas en Puquíos se consideró el valor promedio anual, de este modo por un lado se usó la base de datos del año 2000, donde los parámetros analizados fueron: As, Al, B, Cl, CN, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Na, Sólidos totales disueltos (STD), así mismo se usó la base de datos de 1998 a 2000, donde los parámetros a analizar fueron: FI, pH, NO₃, conductividad eléctrica (CE) y Sulfato (éstos dos últimos sin registro para el

año 2000). En la **Tabla 4.11** se presenta la base de datos de la vega Tambo y en la **Tabla 4.12** se presenta la base de datos de la vega Puquíos.

Cabe señalar que la base de datos usada fue generada por una empresa contratista especializada (SITAC, 2001), ésta realizó la toma de muestras y los análisis respectivos, según las normas y técnicas estándares establecidas para ello y descritas en APHA *et al.* (1981), bajo la supervisión de la Comisión Nacional de Medio Ambiente de Chile (CONAMA) y la Dirección General de Aguas de Chile (DGA).



Figura 4. 3 Vista de Estero Tambo (3.940 msnm).



Figura 4. 4 Vista de las pozas superficiales en la vega Puquíos (3.850 msnm).

Tabla 4. 11 Valores de algunos parámetros descriptivos del agua del sistema léntico de la Vega Tambo, obtenidos a los 3.940 msnm. Valores en (mg/l), excepto pH.

Año	As	Cu	Fe	Fl	Mn	pH	RSF	Sulfato
1982	1,2	0,2	13,0	-	3,0	6,1	1350	500
1983	0,9	0,1	22,0	-	2,9	6,8	1100	600
1984	0,8	0,1	13,0	-	3,1	6,3	1200	650
1985	0,9	0,1	19,0	-	3,0	6,4	1300	750
1986	0,9	0,3	20,0	-	4,6	6,4	1350	800
1987	1,1	0,5	18,0	-	3,0	6,0	1200	700
1988	1,0	0,1	20,0	-	2,8	6,5	1100	650
1989	1,7	0,6	22,0	-	4,3	5,1	1500	850
1990	1,2	0,2	5,0	-	4,3	4,7	1650	900
1991	1,4	0,3	25,0	-	4,2	5,4	1500	850
1992	1,1	0,1	12,0	-	3,0	5,6	1200	700
1993	1,0	0,1	11,0	0,35	3,5	5,7	1650	750
1994	1,0	0,3	26,0	0,35	3,6	5,4	1500	800
1995	1,4	0,2	21,0	0,45	4,3	5,3	1700	950
1996	1,5	0,1	9,0	0,75	4,2	5,4	2200	1200
1997	1,4	0,2	15,0	0,65	4,0	5,4	1800	1100
1998	1,2	0,08	10,0	0,25	4,7	6,5	1200	800
1999	0,7	0,08	6,0	0,55	2,9	6,0	1700	1000

Tabla 4. 12 Promedios anuales (\pm DS) de parámetros descriptivos del agua del sistema léntico de la Vega Puquíos. Valores en (mg/l), excepto CE, pH y Na (%).

Parámetro	1998		1999		2000	
	Promedio (\pm DS)		Promedio (\pm DS)		Promedio (\pm DS)	
pH a 22,5°C	8,2	0,5	8,2	0,4	8,9	0,3
As	-	-	-	-	0,3	0,1
Al	-	-	-	-	0,5	0
B	-	-	-	-	1,9	0,1
Cl	-	-	-	-	34,2	6,5
CN	-	-	-	-	0,1	0
Cr	-	-	-	-	0,1	0
Mg	-	-	-	-	59,7	1,4
Mn	-	-	-	-	2,4	3,0
Fl	1,1	0,1	1,2	0,2	1,7	2,0
Fe	-	-	-	-	0,3	0,3
Ni	-	-	-	-	0,1	0
Na	-	-	-	-	159,5	12,0
Na Porcentual	-	-	-	-	47,5	1,2
STD	-	-	-	-	-	-
Sulfato	940,2	78,5	1013,2	32,9	973	19,8
NO ₃	5,1	1,0	1,4	0,1	-	-
CE	1,7	0,2	1,7	0,1	-	-

4.3 Resultados y discusión

En esta sección se lleva a cabo un análisis del agua en sistemas de turbera, específicamente en el estero Tambo y las pozas interiores de la vega Puquíos, respecto a la calidad de los parámetros, según la base de datos estudiada.

Ambos cuerpos de agua son comparados primeramente con lo establecido en la norma chilena para agua potable (NCh409) y para riego (NCh1333), y posteriormente con lo establecido en la norma española de agua potable (RD140) y la norma española de agua continental (RD60). Finalmente, según lo anteriormente realizado, se presentan los hallazgos detectados producto del análisis efectuado.

4.3.1 Análisis del agua del estero Tambo, respecto a la norma chilena y española.

El agua del estero Tambo, respecto a la norma chilena de riego (NCh1333) y la norma chilena de agua potable (NCh409) presenta las siguientes características:

- pH se encuentra en su mayoría en rango en la NC1333 a excepción de 1989, 1990 y 1991, en la NCh409 se encuentra fuera de rango en su mayoría, a excepción de 1983, 1988 y 1998 (**Figura 4.5**).
- RSF según la NCh1333 no cumple con los requisitos de aguas dulces destinadas para la vida acuática (**Figura 4.6**).
- Fe se encuentra en su mayoría fuera de la NCh1333, a excepción de 1990, en la NCh409 no cumple los límites de la norma para ninguna de sus mediciones (**Figura 4.7**).

- Mn en la NCh1333 y NCh409 no cumple en ninguna de sus mediciones (**Figura 4.8**).
- Cu en la NCh1333 es muy variable, de 1982 a 1985 cumple, en 1986 y 1987 no cumple, en 1988 cumple, en 1989 no cumple, en 1990 cumple, en 1991 no cumple, en 1992 y 1993 cumple, en 1994 no cumple, de 1995 a 1999 cumple, en la NC409 no cumple en ninguna de sus mediciones (**Figura 4.9**).
- As se encuentra fuera del rango de cumplimiento en la NCh1333 y NCh409 en todas las mediciones (**Figura 4.10**).
- Fl se encuentra en el rango de cumplimiento en la NCh1333 y NCh409 en todas sus mediciones (**Figura 4.11**).
- Sulfato en la NCh1333 se encuentra fuera del rango de cumplimiento en todas sus mediciones, en la NCh409 no cumple en su mayoría, a excepción de 1982 (**Figura 4.12**).

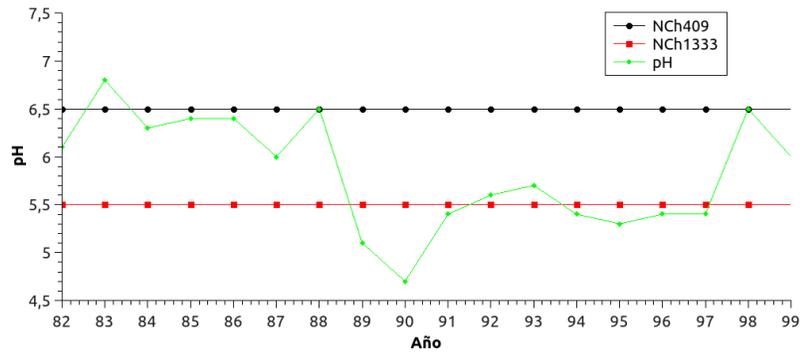


Figura 4. 5 Variabilidad anual de pH promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.

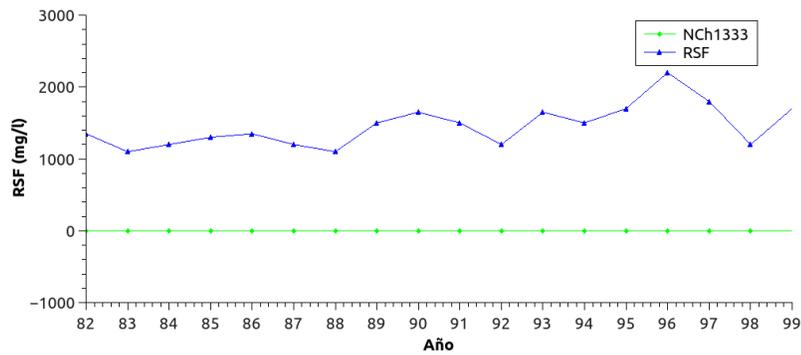


Figura 4. 6 Variabilidad anual de RSF promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.

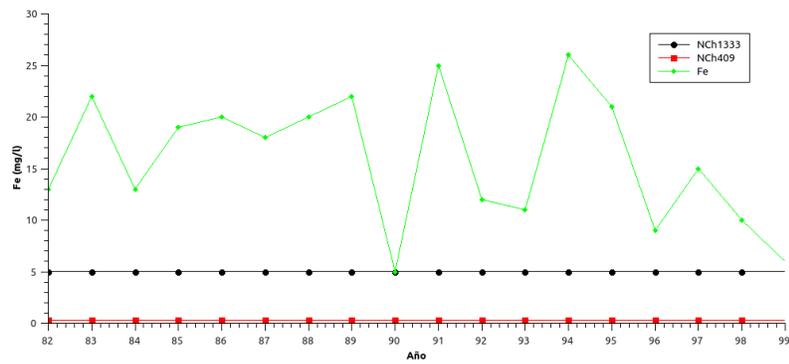


Figura 4. 7 Variabilidad anual de Fe promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.

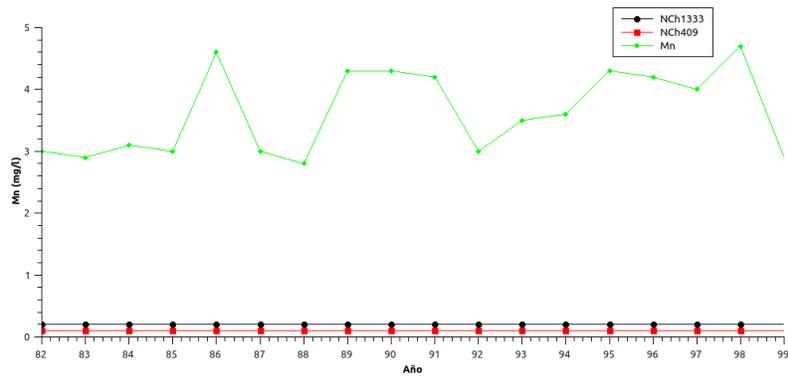


Figura 4. 8. Variabilidad anual de Mn promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.

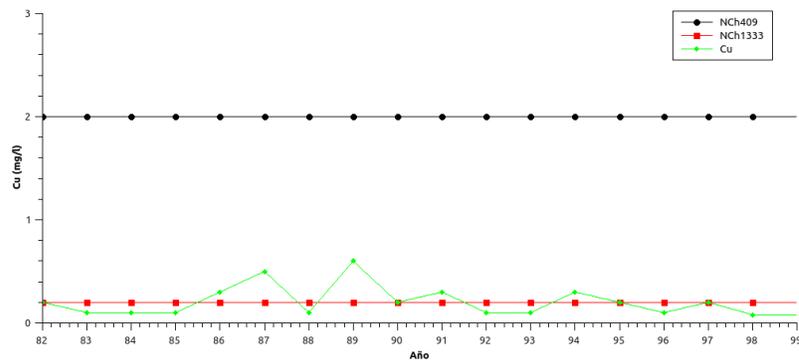


Figura 4. 9. Variabilidad anual de Cu promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.

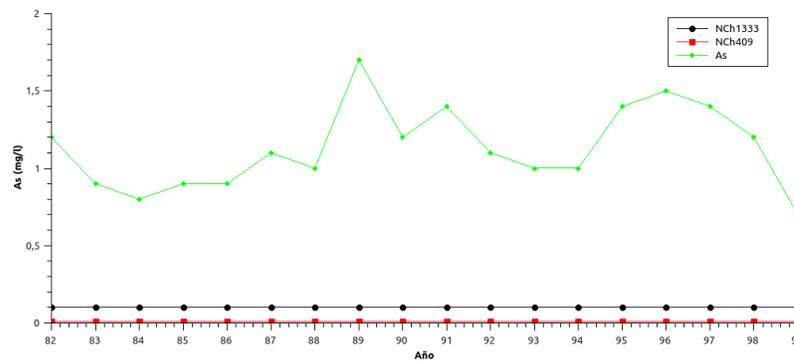


Figura 4. 10. Variabilidad anual de As promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.

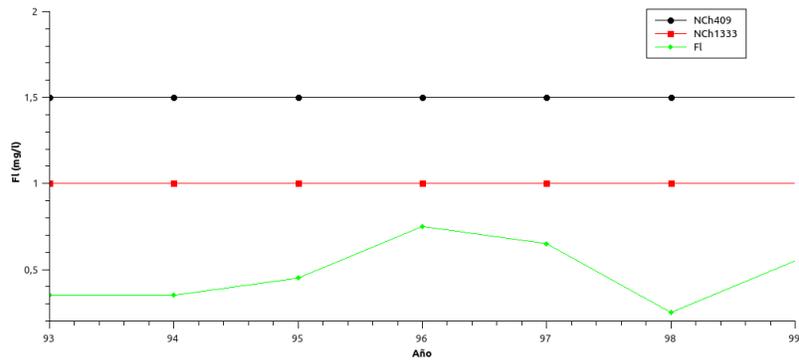


Figura 4. 11. Variabilidad anual de FI promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1993 a 1999.

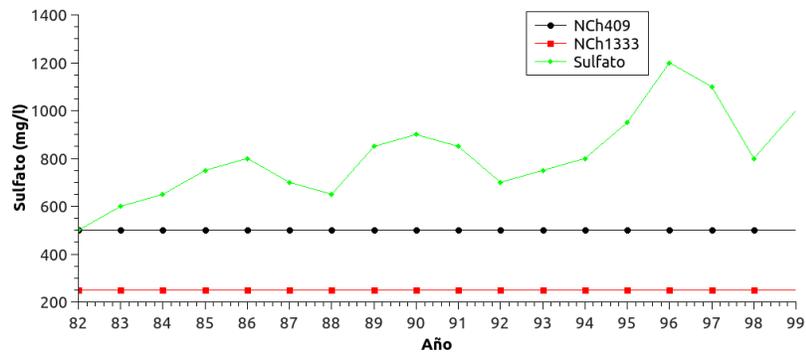


Figura 4. 12. Variabilidad anual de Sulfato promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1982 a 1999.

El agua del estero Tambo, respecto al Real Decreto Español de aguas continentales (RD60) y Real Decreto de consumo humano (RD140) presenta las siguientes características:

- As se encuentra fuera de rango en RD140 y RD60 en todas sus mediciones (**Figura 4.13**).
- Cu se encuentra dentro del rango respecto a RD140 en todas las mediciones, en el RD60 cumple para la mitad de los registros (hay 4 rangos de límites máximos de Cu para este decreto, según registros de 1999, la dureza de Tambo es >100, por lo que su límite de Cu en RD60 es 0,12 mg/l), es decir está dentro de rango en 1983 a 1985, 1988, 1992, 1993, 1996, 1998 y 1999 (**Figura 4.14**).
- FI en el RD140 no cumple en todas las mediciones, en RD60 cumple en todas las mediciones (**Figura 4.15**).
- pH en el RD 140 está fuera de rango la mayoría de las veces, a excepción de 1983, 1985, 1986, 1988 y 1998 (**Figura 4.16**).
- Fe en el RD140 no cumple los límites en todas las mediciones (**Figura 4.17**).
- Mn en RD140 no cumple los límites en todas sus mediciones (**Figura 4.18**).
- Sulfato en RD140 no cumple los límites en todas sus mediciones (**Figura 4.19**).

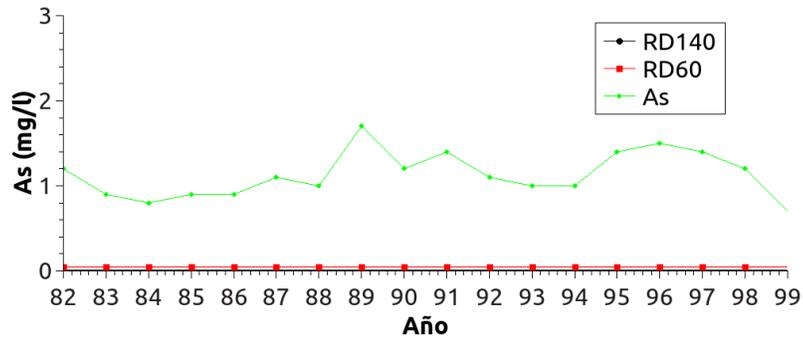


Figura 4. 13 Variabilidad anual de As promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.

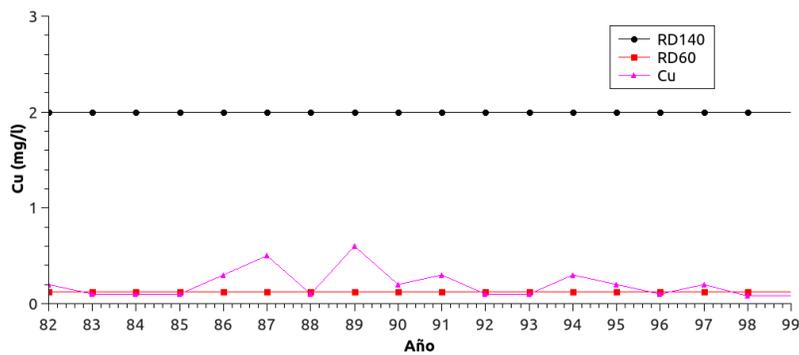


Figura 4. 14. Variabilidad anual de Cu promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999. Nota: hay 4 rangos de límites máximo de Cu para este decreto, según registros de 1999, la dureza de Tambo es >100, por lo que su límite de Cu en RD60 es 0,12 mg/l.

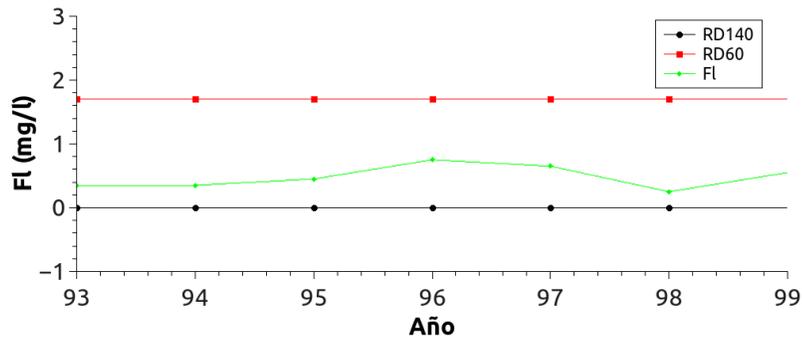


Figura 4. 15. Variabilidad anual de FI promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1993 a 1999.

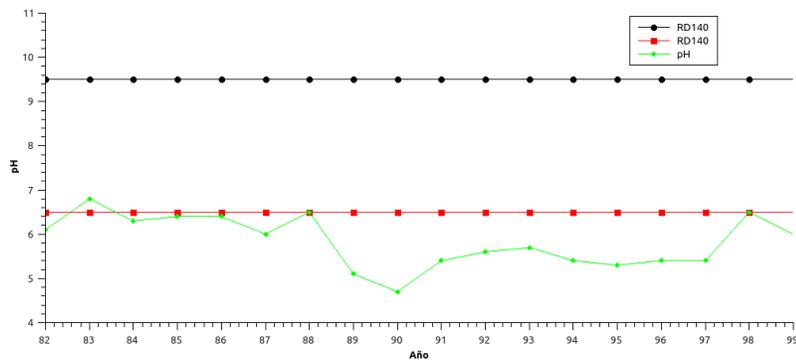


Figura 4. 16. Variabilidad anual de pH promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.

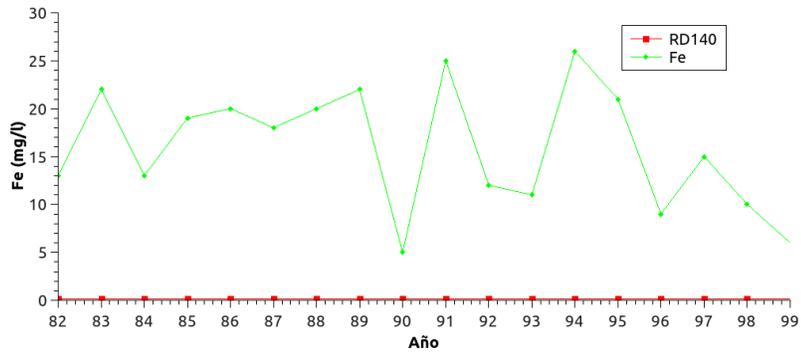


Figura 4. 17. Variabilidad anual de Fe promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.

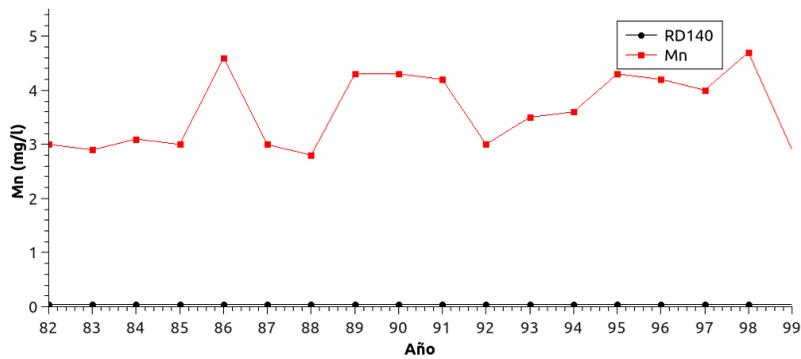


Figura 4. 18. Variabilidad anual de Mn promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.

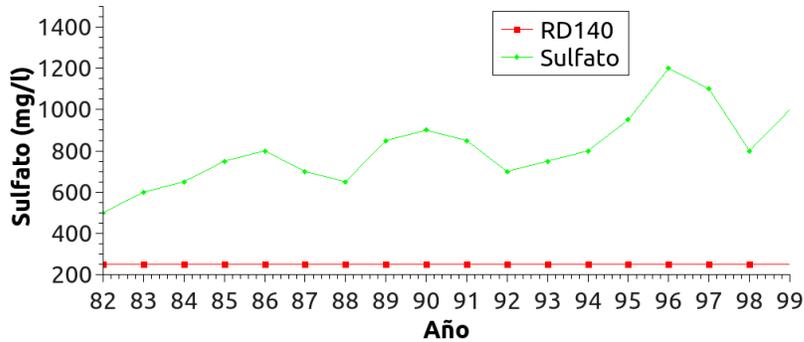


Figura 4. 19. Variabilidad anual de Sulfato promedio del agua superficial de Tambo comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1982 a 1999.

4.3.2 Análisis del agua de las pozas interiores de la vega Puquíos, respecto a la norma chilena y española.

El agua de las pozas de la vega Puquíos, respecto a la norma chilena de riego (NCh1333) y la norma chilena de agua potable (NCh409) presenta las siguientes características:

- pH cumple la NCh1333 a excepción del año 2000, en la NCh409 cumple en todas las mediciones (**Figura 4.20**).
- CE en la NCh1333 cumple en todas sus mediciones, por lo que el agua se clasificaría como agua con la cual generalmente no se observarían efectos perjudiciales (**Figura 4.21**).

- FI en la NCh1333 no cumple con los límites en ninguna de sus mediciones, en la NCh409 cumple a excepción del año 2000 (**Figura 4.22**).
- Sulfato en la NCh1333 y NCh409 no cumple con los límites en ninguna de las mediciones (**Figura 4.23**).
- NO₃ en la NCh409 cumple con el límite de la norma en todas las mediciones (**Figura 4.24**).
- As respecto a la NCh1333 y NCh409 no cumple con el límite de la norma.
- B en la NCh1333 no cumple con el límite de la norma, en la NCh409 cumple con el límite de la norma.
- CN en la NCh1333 cumple con los límites de la norma, en la NCh409 no cumple con el límite de la norma.
- Cr en la NCh1333 cumple con el límite de la norma, en la NCh409 no cumple con el límite de la norma.
- Mn en la NCh1333 y NCh409 no cumple con el límite de la norma.
- Na en la NCh1333 cumple con la norma, en la NCh409 (Na porcentual) cumple con el límite de la norma.
- Para el nivel de STD, según el rango en que se encuentra en la NCh1333, define un agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos, en la NCh 409 cumple con el límite de la norma.
- Cl en la NCh1333 y NCh409 cumple con el límite de la norma.
- Mg en la NCh409 cumple con el límite de la norma.

- Fe en la NCh409 cumple con el límite de la norma.

Los parámetros con datos de un solo año que superan al menos una norma se detallan en la **Tabla 4.13** (As, B, CN, Cr, Mn, Na, STD, Cl, Mg, Fe).

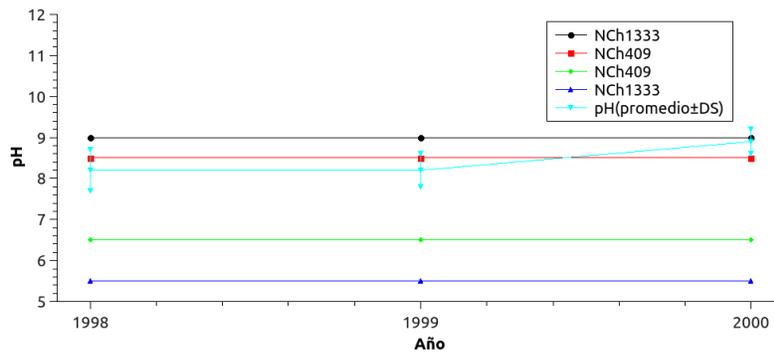


Figura 4. 20. Variabilidad anual de pH promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 2000.

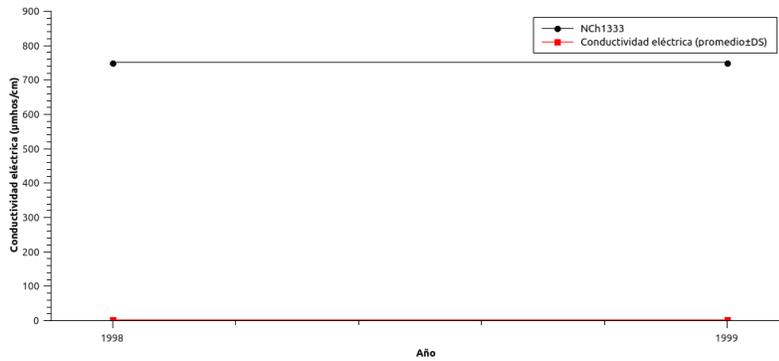


Figura 4. 21. Variabilidad anual de CE promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 1999.

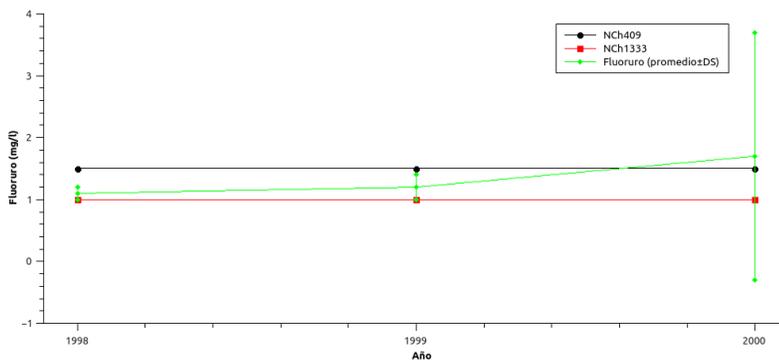


Figura 4. 22. Variabilidad anual de FI promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 2000.

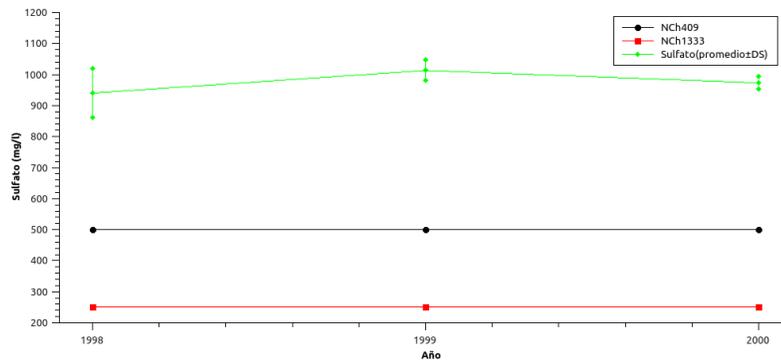


Figura 4. 23. Variabilidad anual de Sulfato promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 2000.

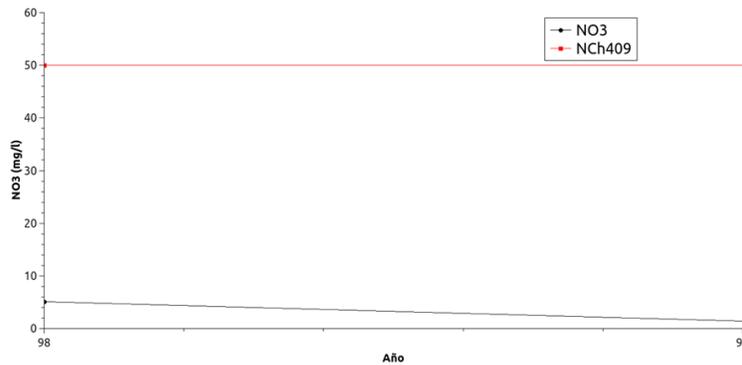


Figura 4. 24. Variabilidad anual de NO₃ promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa chilena. Serie de tiempo 1998 a 1999.

Tabla 4. 13. Parámetros de Puquíos que superan al menos una de las normas chilenas (año 2000).

Parámetro	Promedio (mg/l, año 2000)	NCh409 (máximo en mg/l)	NCh1333 (máximo en mg/l)	Comentario
As	0,3	0,01	0,1	Supera ambas normas
B	1,9	NA	0,75	Supera la NCh1333
CN	0,1	0,05	0,2	Supera la NCh 409
Cr	0,1	0,05	0,1	Supera la NCh 409
Mn	2,4	0,1	0,2	Supera ambas normas
Na porcentual	47,5	NA	35	Supera la NCh 1333
STD	1229,5	NA	1 000 < s ≤ 2 000	Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos

El agua de las pozas de la vega Puquíos, respecto al Real Decreto Español de aguas continentales (RD60) y Real Decreto de consumo humano (RD140) presenta las siguientes características:

- FI en RD140 y RD60 cumple con el límite del real decreto en ninguna de su mediciones (**Figura 4.25**).
- pH en RD140 cumple en todas las mediciones, en RD60 no cumple con el límite en ninguna de sus mediciones (**Figura 4.26**).

- Sulfato en RD140 no cumple con el límite en ninguna de sus mediciones (**Figura 4.27**).
- NO₃ en RD140 no cumple con el límite en ninguna de sus mediciones (**Figura 4.28**).
- As en RD60 y RD140 no cumple con el límite. CN en RD60 y RD140 no cumple con el límite.
- Cr en RD60 y RD140 no cumple con el límite.
- Ni en RD60 y RD140 no cumple con el límite.
- Al en RD60 cumple con el límite, en RD140 no cumple con el límite.
- B en RD60 cumple con el límite, en RD140 no cumple con el límite.
- Mn en RD60 cumple con el límite, en RD140 no cumple con el límite.
- Fe en RD60 cumple con el límite, en RD140 no cumple con el límite.
- Cl en el RD140 cumple con el límite de este decreto.
- Na en el RD140 cumple con el límite establecido.
- CE en el RD140 cumple con el límite.

Los parámetros con datos de un solo año que superan el RD60 se presentan en la **Tabla 4.14**, a su vez los que superan el RD140 se presentan en la **Tabla 4.15** (As, CN, Cr, Ni, Al, B, Mn, Fe, Cl, Na y CE).

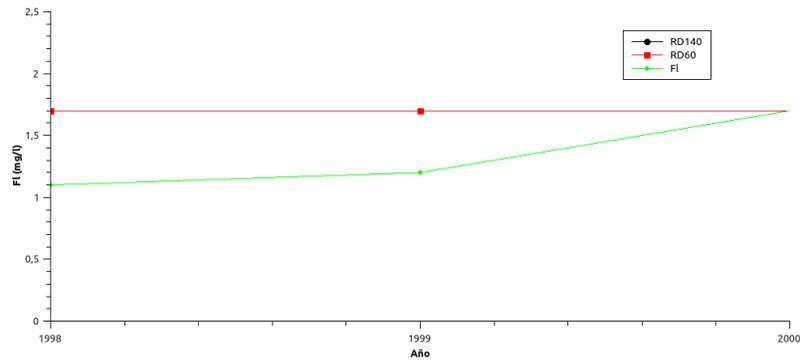


Figura 4. 25. Variabilidad anual de FI promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1998 a 2000.

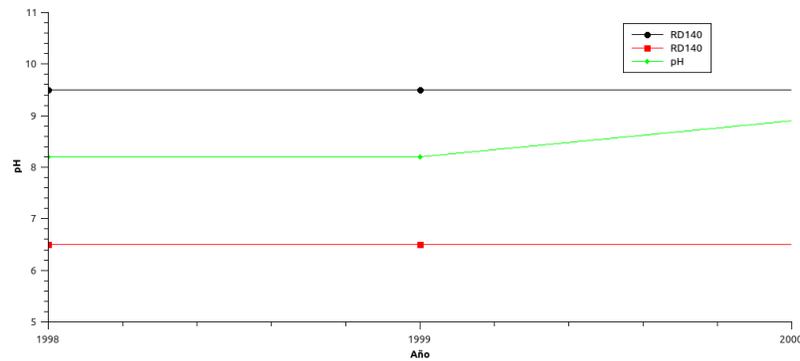


Figura 4. 26. Variabilidad anual de pH promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1998 a 2000.

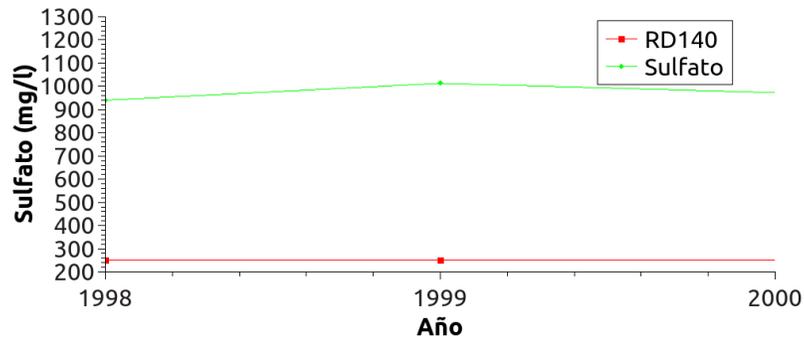


Figura 4. 27. Variabilidad anual de Sulfato promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1998 a 2000.

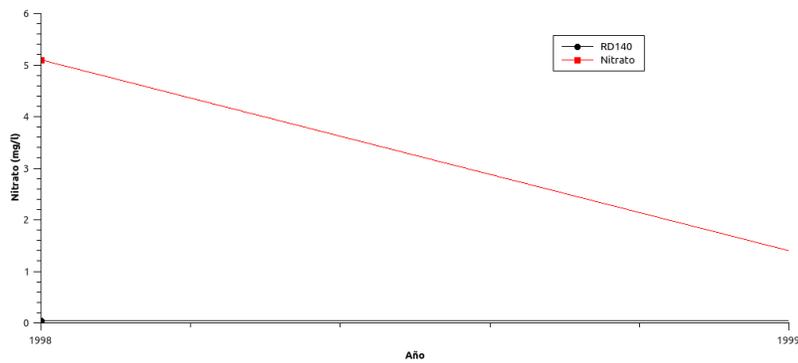


Figura 4. 28. Variabilidad anual de NO_3 promedio del agua superficial de Puquíos comparada con la normativa española. Serie de tiempo 1998 a 1999.

Tabla 4. 14. Parámetros de las pozas de la vega Puquíos que superan el RD60 (año 2000).

Parámetro	Promedio (mg/l, año 2000)	RD60 (mg/l)
As	0,3	0,05
CN	0,1	0,04
Cr	0,1	0,05
Ni	0,1	0,02

Tabla 4. 15. Parámetros de Puquíos que superan el RD140 (año 2000).

Parámetros	Promedio (mg/l, año 2000)	RD140 (mg/l)
As	0,3	0,01
Al	0,5	0,2
B	1,9	0,001
CN	0,1	0,05
Cr	0,1	0,05
Mn	2,4	0,05
Fe	0,3	0,2
Ni	0,1	0,02

4.3.3 Detección de hallazgos

Para poder detectar hallazgos producto del análisis realizado en la sección anterior, se definieron distintos criterios de cumplimiento, lo que se detallan en la **Tabla 4.16**. Estos criterios fueron implementados en el cumplimiento del total de cada parámetro, tomando como universo el valor del parámetro en cada año de medición, a su vez también fueron implementados en el análisis anual, tomando como universo todos los parámetros en conjunto. La clasificación de la calidad del agua de Tambo y Puquíos, según el criterio mencionado, se presenta en las **Tablas 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20**.

La detección de hallazgos referida se presenta para la calidad de agua potable de Tambo, la calidad de agua natural de Tambo, la calidad de agua potable de Puquíos y la calidad de agua natural de Puquíos. Finalmente se lleva a cabo una comparación de la calidad del agua entre ambas vegas (Tambo y Puquíos), primeramente esta comparación se realiza de acuerdo a la calidad del agua potable y posteriormente la comparación se realiza de acuerdo a la calidad del agua natural.

Tabla 4. 16. Criterio de cumplimiento de la normativa de calidad de agua, tanto para agua potable como para agua natural, según normativa chilena y española.

Cumplimiento de la norma	0% de las muestras	<50% muestras	>50% muestras	100% muestras
Criterios de cumplimiento	No cumple (NC)	No cumple parcialmente (NCP)	Cumple parcialmente (CP)	Cumple (C)

Tabla 4. 17. Clasificación de la calidad del agua potable para los parámetros medidos en Tambo.

Parámetro	NCh409	RD140
pH	NCP	NCP
RSF	NA ⁽¹⁾	NA ⁽¹⁾
Fe	NC	NC
Mn	NC	NC
Cu	NC	C
As	NC	NC
Fl	C	NC
Sulfato	NCP	NCP

⁽¹⁾ No aplica, ya que la norma no contempla el parámetro.

Tabla 4. 18. Clasificación de la calidad del agua natural para los parámetros medidos en Tambo.

Parámetro	NCh1333	RD60
pH	CP	NA ⁽¹⁾
RSF	NC	NA ⁽¹⁾
Fe	NCP	NA ⁽¹⁾
Mn	NC	NA ⁽¹⁾
Cu	CP	CP
As	NC	NC
Fl	C	C
Sulfato	NC	NA ⁽¹⁾

⁽¹⁾ No aplica, ya que la norma no contempla el parámetro.

Tabla 4. 19. Clasificación de la calidad del agua potable para los parámetros medidos en Puquíos.

Parámetro	NCh409	RD140
pH	C	C
Fl	CP	C
Sulfato	NC	NC
As	NC	NC
B	C	NC
CN	NC	NC
Cr	NC	NC
Mn	NC	NC
Na	C	C
STD	C	NA ⁽¹⁾
Cl	C	C
Mg	C	NC
Fe	C	NC
NO ₃	C	NA ⁽¹⁾
CE	NA ⁽¹⁾	C
Al	NA ⁽¹⁾	NC
Ni	NA ⁽¹⁾	NC

⁽¹⁾ No aplica, ya que la norma no contempla el parámetro.

Tabla 4. 20. Clasificación de la calidad del agua natural para los parámetros medidos en Puquíos.

Parámetro	NCh409	RD140
pH	C	C
Fl	NC	C
Sulfato	NC	NA ⁽¹⁾
As	NC	NC
B	NC	C
CN	C	NC
Cr	C	NC
Mn	NC	C
Na	C	NA ⁽¹⁾
STD	C	NA ⁽¹⁾
Cl	C	NA ⁽¹⁾
Mg	C	NA ⁽¹⁾
Fe	C	C
CE	C	NA ⁽¹⁾
Ni	NA ⁽¹⁾	NC
Al	NA ⁽¹⁾	C

(1) No aplica, ya que la norma no contempla el parámetro.

A continuación se presentan los hallazgos detectados, de acuerdo a lo explicado anteriormente.

Calidad de agua potable en Tambo:

A continuación se detallan los hallazgos detectados producto del análisis realizado a la calidad del agua de Tambo respecto a los valores máximos establecidos por la NCh409 y el RD140:

1. Hay total discrepancia en la calidad del agua acorde a lo establecido por la norma chilena en comparación con lo establecido por la norma española en dos parámetros, el Cu en la NCh409 no cumple (NC) para ninguna medición y RD140 cumple (C) en todas las mediciones, lo mismo sucede

para el FI, ya que respecto a la NCh409 cumple (C) para todas sus mediciones y para el RD140 no cumple (NC) en todas sus mediciones.

2. Hay total concordancia en la calidad del agua acorde a lo establecido por la norma chilena en comparación con lo establecido por la norma española en tres parámetros, Fe, Mn y As no cumplen (NC) ninguna de las normas en todas sus mediciones.
3. El agua de Tambo no tiene calidad de agua potable en ningún año, según el criterio de cumplimiento definido, desde 1982 a 1999 la calidad del agua no cumple parcialmente (NCP) ambas normas.
4. No se aprecia una tendencia en el aumento o disminución por años, según cumplimiento de NCh409.
5. En cumplimiento de RD140 se aprecia un aumento de cumplimiento entre 1983 y 1988, así también se aprecia una tendencia al bajo cumplimiento entre 1989 y 1997.

Calidad de agua natural (riego y continental) en Tambo:

A continuación se detallan los hallazgos detectados producto del análisis realizado a la calidad del agua de Tambo respecto a los valores máximos establecidos por la NCh1333 y el RD60:

1. Hay cinco parámetros que no pueden ser comparados: pH, RSF, Fe, Mn y Sulfato no están presentes en la normativa española, si en la chilena.
2. Hay total concordancia en la calidad del agua acorde a lo establecido por la norma chilena en comparación con lo establecido por la norma española en

tres parámetros, FI no cumple (NC) ninguna de las normas en todas sus mediciones, As y RSF no cumplen (NC) ambas normas en ninguna de sus mediciones.

3. El agua de Tambo no tiene calidad de agua natural (riego y continental) en ningún año, según el criterio de cumplimiento definido, desde 1982 a 1999 la calidad del agua no cumple parcialmente (NCP) ambas normas.
4. No se aprecia una tendencia de aumentos o disminuciones por años, según cumplimiento de NCh1333 y RD60.

Calidad de agua potable en Puquíos:

A continuación se detallan los hallazgos detectados producto del análisis realizado a la calidad del agua de Puquíos respecto a los valores máximos establecidos por la NCh409 y el RD140:

1. Hay total concordancia en la calidad del agua acorde a lo establecido por la norma chilena en comparación con lo establecido por la norma española en cinco parámetros, Sulfato, As, CN, Cr y Mn no cumplen totalmente (NC) ambas normas en ninguna de las mediciones.
2. Hay total discrepancia en la calidad del agua acorde a lo establecido por la norma chilena en comparación con lo establecido por la norma española en tres parámetros, B, Mg y Fe en la NCh409 cumple (N) para las mediciones, por el contrario en el RD 140 no cumple (NC) en sus mediciones.
3. Hay cinco parámetros que no pueden ser comparados, ya que están ausentes en alguna de las 2 normas (en el RD140: STD y NO₃; en la NCh409 CE y AI).

4. Respecto a lo potable del agua, de acuerdo al total de las muestras hay una diferencia entre potabilidad, según NC409 Puquíos no sería potable parcialmente, mientras que según RD140 sería potable parcialmente.
5. Se aprecia una discrepancia en ambas normas respecto a la calidad del agua de Puquíos, según el criterio de cumplimiento definido, según la NC409 Puquíos no sería potable parcialmente (NCP), mientras que según RD140 sería potable parcialmente (CP).

Calidad de agua natural (riego y continental) en Puquíos

A continuación se detallan los hallazgos detectados producto del análisis realizado a la calidad del agua de Puquíos respecto a los valores máximos establecidos por la NCh1333 y el RD60:

1. Hay total concordancia en la calidad del agua acorde a lo establecido por la norma chilena en comparación con lo establecido por la norma española en tres parámetros, pH y Fe cumplen (C) ambas normas en las mediciones, mientras que As no cumple (NC) ambas normas en sus mediciones.
2. Hay total discrepancia en la calidad del agua acorde a lo establecido por la norma chilena en comparación con lo establecido por la norma española en cinco parámetros, F1, B y Mn cumplen (C) el RD60 y no cumplen (NC) la NCh1333 en sus mediciones, por otro lado CN y Cr cumplen (C) la NCh1333 y no cumplen (NC) el RD60 en sus mediciones.
3. Hay 8 parámetros que no pueden ser comparados ya que están ausentes en una de las normas (en RD60: Sulfato, Na, STD, Cl, Mg y CE, en NCh1333 Ni y Al).

4. Respecto a la calidad del agua natural (riego y continental), de acuerdo al análisis del total de las muestras hay una similitud en el cumplimiento, según ambas normas el agua de Puquíos cumple parcialmente (CP) su condición de agua natural (riego y continental).

Comparación de potabilidad entre Tambo y Puquíos:

Al comparar la calidad del agua potable de Tambo y Puquíos, según la norma chilena y la norma española, se detectaron los siguientes hallazgos:

1. Hay similitud en el cumplimiento de As y Mn para Tambo y Puquíos, ambos cuerpos están sobre la norma española y chilena para esos parámetros.
2. En el cumplimiento total de parámetros se aprecia una clara discrepancia entre ambos cuerpos de agua, en el caso de Puquíos se cumple la norma chilena y española en pH, Na y Cl, en el caso de Tambo no hay cumplimiento de la norma española y chilena en ningún parámetro.
3. Según el análisis total de Tambo, este cuerpo de agua sería no potable para la norma chilena y el decreto español, en el caso de Puquíos éste sería no potable para la norma chilena. La gran diferencia se produce en el análisis de la potabilidad de Puquíos según el decreto español, según éste último Puquíos sería parcialmente potable, ya que cumpliría la potabilidad en el 65% de las muestras.

Comparación de calidad de agua natural (riego y continental) entre Tambo y Puquíos:

Al comparar la calidad del agua natural (riego y continental) de Tambo y Puquíos, según la norma chilena y la norma española, se detectaron los siguientes hallazgos:

1. Hay similitud en el cumplimiento de FI y As para Tambo y Puquíos, la calidad de agua natural de ambos cuerpos de agua están sobre la norma española y chilena sólo para el As, por otro lado Tambo y Puquíos cumplen la norma española y chilena sólo para el FI.
2. Respecto a la calidad total de ambos cuerpos de agua, respecto al agua natural y considerando la normativa chilena y española, se puede decir que la calidad de Puquíos es superior a la de Tambo. Tambo no tiene calidad para riego ni continental según el cumplimiento de la norma chilena y española, en cambio Puquíos cumple parcialmente los requisitos de calidad de riego (NCh1333) y calidad como agua continental (RD60), cumpliendo la norma chilena en el 61% de las muestras y cumpliendo el decreto español en el 71% de las muestras.

4.4 Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones de este capítulo, las que se refieren a la comparación de la calidad del agua entre las pozas interiores superficiales de la vega Puquíos versus la calidad del agua del estero Tambo, donde se toman tres aspectos de comparación: calidad de agua potable, calidad de agua natural y calidad global.

- 1) Respecto a la comparación de agua potable efectuada entre la norma chilena y española sobre estos cuerpos de agua, se aprecia un criterio diferente de calidad y elaboración de las normas, si bien ambas normas apuntan por ejemplo a la calidad del agua potable, las diferencias radican en límites de diferentes valores e inexistencia de parámetros en una de las dos normas, lo que las hace en algunos casos incomparables y en otros casos divergentes en el análisis de algunos parámetros (e.g., Cu en la calidad del agua del estero Tambo cumple en el RD140 y no cumple en la NCh409). Lo anterior se podría deber a los objetivos de calidad perseguidos por ambos países para la salud de la población y/o al origen de elaboración de las normas.
- 2) Respecto a la comparación de agua natural efectuada entre la norma chilena y española sobre estos cuerpos de agua, se aprecia un criterio diferente de calidad y elaboración de las normas, si bien ambas normas apuntan por ejemplo a la calidad del agua natural, las diferencias radican en límites de diferentes valores e inexistencia de parámetros en una de las dos normas, esto último se marca claramente en el caso del agua natural del estero Tambo donde no se pudieron comparar 6 de 8 parámetros. Lo anterior hace ambas normas en algunos casos incomparables y en otros casos divergentes en el análisis de algunos parámetros (e.g., B en las pozas de Puquíos cumple el RD60 y no cumple la NCh1333). Esto último se podría deber a los objetivos de calidad perseguidos por ambos países para

el medio ambiente, al origen de elaboración de las normas y/o a las características propias de cada lugar, específicamente del sustrato geológico que sustenta las aguas naturales que drenan.

- 3) El agua de las pozas de Puquíos resultó ser de mejor calidad que el agua del estero Tambo, una vez comparada la calidad de éstas con las normas de agua potable y natural (chilena y española). Este comportamiento muestra un mejoramiento de la calidad aguas abajo, la vega Tambo está a los 3.940 msnm y la vega Puquíos está a los 3.930 msnm. La menor calidad del estero Tambo podría estar influenciado en parte por la actividad minera (Cepeda *et al.*, 2014) que se realizaba al momento del monitoreo, la que según los datos obtenidos desde el Atlas de Faenas Mineras de Coquimbo (SERNAGEOMIN, 2011) se localiza aguas arriba de Tambo, a los 4.197 msnm. A su vez se puede deducir que el mejoramiento de la calidad de agua en el sistema léntico de Puquíos se puede deber a la capacidad depuradora de la VTP (Pérez-Olmedilla *et al.*, 2000), tratamiento natural que realizaría la vega, en donde el nivel de los parámetros de salida serían menores a los de entrada (Johnston, 1991).

4.5 Literatura citada:

1. APHA; AWWA; WPCF. 1981. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association American (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF). 16th edition. Washington D.C.
2. Edificio del Congreso Nacional de Chile. 1994. Historia de la Ley N° 19.300 Bases del Medio Ambiente. 09 de marzo. Santiago, Chile.
3. Cepeda-Pizarro, J. 2013. Variabilidad temporal de algunos parámetros físicos e hidroquímicos de un prado húmedo altoandino del norte- centro de Chile. *Idesia*, 31: 89-97.
4. Cepeda, J.; Armijo, A. 2014. Dinámica fluviométrica y limnológica de un cuerpo superficial de agua asociado a un prado húmedo de los Andes del norte-centro de Chile. *Idesia*, 32: 11-19.
5. Diario Oficial de la Comunidad Europea. 2008. Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2008 relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas, por la que se modifican y derogan ulteriormente las Directivas 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE y 86/280/CEE del Consejo, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE. Consejo de la Unión Europea. Luxemburgo.
6. Diario Oficial de la Comunidad Europea. 1998. Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Consejo de la Unión Europea. Luxemburgo.

7. Diario Oficial de la República de Chile. 1978. Diario Oficial numero 30.107, N°159.972 (M.R). 05 de julio de 1978. Santiago, Chile.
8. Diario Oficial de la República de Chile. 1984. Diario Oficial numero 31.813, año N°159.969 (M.R). 3 de marzo de 1984. Santiago, Chile.
9. Diario Oficial de la República de Chile. 1987. Diario Oficial numero 32.776, N°159.969 (M.R). 22 de mayo de 1987. Santiago, Chile.
10. Diario Oficial de la República de Chile. 1994. Diario Oficial numero 34.808, N°320.108 (M.R). 09 de marzo de 1994. Santiago, Chile.
11. Diario Oficial de la República de Chile. 2006. Diario Oficial numero 38.498, N°320.108 (M.R). 27 de junio de 2006. Santiago, Chile.
12. Diario Oficial de la República de Chile. 2010. Diario Oficial numero 39.570, N°320.108 (M.R). 26 de enero de 2010. Santiago, Chile.
13. Fávero, G.; Katz, R. 1998. El uso de Normas de Calidad y de Emisión en la Gestión de los Recursos Hídricos. Centro de Estudios Públicos. Santiago, Chile.
14. Instituto Nacional de Normalización. 1978. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos (Informe Técnico). Norma chilena oficial (NCH 1333, oficio 1978, modificada 1987). Normas chilenas. Catálogo 2012. Instituto Nacional de Normalización (INN).Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
15. Instituto Nacional de Normalización. 1984. «Norma Chilena Oficial NCh 409/1: Agua potable - Parte 1: Requisitos». Santiago, Chile.

16. Jaksic, F.; Ojeda, F. 1993. Estándares Secundarios De Calidad Ambiental. Medio Ambiente en Desarrollo. Centro de Estudios Publicos. p. 389-423. Santiago, Chile.
17. Johnston, C. 1991. Sediment and Nutrient Retention by Freshwater wetlands: Effects on Surface Water Quality. ***Critical Reviews in Environmental Control***, 21 (5, 6): 491-565.
18. Ministerio de la Presidencia de España. 2003. Boletín Oficial del Estado número 45. Viernes 21 de febrero. REAL DECRETO 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Madrid, España.
19. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino de España. 2011. Boletín Oficial del Estado. Sábado 22 de enero. Real Decreto 60/2011, de 21 de enero, sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas. Madrid, España.
20. Ministerio de Obras Públicas de Chile. 1978. Decreto exento N° 867. Publicado en el Diario Oficial de 15.06.78. Santiago 15 de junio de 1978. Santiago, Chile.
21. Ministerio de Obras Públicas de Chile. 1987. Decreto exento N° 105. Publicado en el Diario Oficial de 08.05.87. Santiago 08 de mayo de 1987. Santiago, Chile.
22. Ministerio de Salud de Chile, Subsecretaria de Salud Pública. 2006. Decreto exento N° 446. Publicado en el Diario Oficial de 27.06.06. Santiago 16 de junio de 2006. Santiago, Chile.
23. Ministerio de Salud de Chile, Subsecretaria de Salud Pública. 2006. Decreto exento N° 446. Publicado en el Diario Oficial de 27.06.06. Santiago 16 de junio de 2006. Santiago, Chile.

24. Ministerio de Salud de Chile, Subsecretaría de Salud Pública. 1984. Decreto exento N° 11. Publicado en el Diario Oficial de 16.01.84. Santiago 16 de enero de 1984. Santiago, Chile.
25. Pérez-Olmedilla, M.; Sanchez-Carrillo, S.; Rojo, C. 2000. Función depuradora de los humedales II: Una revisión bibliográfica sobre el papel del sedimento. ***Humedales Mediterráneos***, 1: 123-130.
26. SERNAGEOMIN. 2011. Atlas de Faenas Mineras, Región de Coquimbo. Ministerio de Minería. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
27. SITAC. 2001. Programa de control de calidad de agua. Cuenca del Río Elqui. IV Región de Coquimbo. Compañía Minera El Indio (Informes Técnicos Anuales período 1983-2000). Santiago, Chile.

Conclusiones

Conclusiones.

A continuación se presentan las conclusiones de esta tesis doctoral. Primeramente se presentan las conclusiones respecto al análisis del agua en el estero Tambo, recogidas del segundo capítulo de este trabajo y en cumplimiento al primer y segundo objetivos de esta tesis, a continuación se presentan las conclusiones del análisis del agua en las pozas interiores de la vega Puquíos, recogidas del tercer capítulo de este trabajo y en cumplimiento del tercer y cuarto objetivo de esta tesis, seguidamente se presentan las conclusiones del análisis de la calidad del agua en la vega Tambo-Puquíos, recogidas del cuarto capítulo de este trabajo y en cumplimiento del quinto objetivo de esta tesis, aquí se concluye respecto a la calidad del agua en el estero Tambo, la calidad del agua en las pozas interiores de la vega Puquíos y posteriormente comparando la calidad del estero Tambo versus la calidad de las pozas interiores de la vega Puquíos. Finalmente se presentan las conclusiones referidas a las futuras líneas de investigación.

Respecto al análisis de las características del agua realizado en el estero

Tambo:

- 1) El estero Tambo resultó ser un cuerpo de agua permanente. En sus aguas se registró la presencia de metales, componentes no metálicos inorgánicos y elementos traza propios del sustrato geológico de las montañas andinas circundantes. Las características físicas y químicas medidas mostraron una elevada variabilidad temporal en torno a los niveles promedio, aparentemente en concordancia con el patrón pluviométrico del área, según lo observado en ecosistemas fluviales de climas áridos y semiáridos de otras latitudes. Algunos parámetros mostraron una conducta errática, probablemente debida a la influencia de la actividad minera que se realiza en las inmediaciones del estero. No se detectaron patrones estacionales en el comportamiento de los parámetros monitoreados, como era esperado según las características del clima mediterráneo imperante en la zona. Contribuyeron a ello, aparentemente, tanto las fluctuaciones naturales de las características físicas y químicas del cuerpo de agua como los impactos sobre estas que recibe de la actividad minera circundante.

Respecto al análisis de las características del agua realizado en las pozas de la vega Puquíos:

- 1) Las pozas estudiadas están localizadas en algún lugar entre agua dulce y pozas verdaderamente salinas. Su calidad del agua es muy cercana al límite inferior para el agua salobre. Debido a su condición alcalina, son insensibles a la acidificación. Las pozas muestran una clara transición de norte a sur en comparación con los altos prados alpinos del centro de Chile y con pozas del norte de Chile. En comparación con los datos reportados en la literatura para aguas dulces lénticas naturales, las pozas de estudio son muy ricas en fosfato y contenido de sulfato, altas en fluoruro, Na, Fe, K, Mg, cloruro y contenido de nitrato, y bajas en bicarbonato y CN. En

comparación con las pozas del norte de Chile, a excepción de sulfato son más bajas en el contenido de la mayoría de metales disueltos, no metales inorgánicos y elementos traza. Al parecer, la química del agua de estas pozas se relaciona con el entorno geológico de las montañas de los alrededores.

Respecto al análisis de la calidad del agua en la Vega Tambo-Puquíos:

- 1) En la comparación de agua potable efectuada entre la norma chilena y española sobre estos cuerpos de agua, se aprecia un criterio diferente de calidad y elaboración de las normas, si bien ambas normas apuntan por ejemplo a la calidad del agua potable, las diferencias radican en límites de diferentes valores e inexistencia de parámetros en una de las dos normas, lo que las hace en algunos casos incomparables y en otros casos divergentes en el análisis de algunos parámetros (e.g., Cu en la calidad del agua del estero Tambo cumple en el RD140 y no cumple en la NCh409). Lo anterior se podría deber a los objetivos de calidad perseguidos por ambos países para la salud de la población y/o al origen de elaboración de las normas.
- 2) En la comparación de agua natural efectuada entre la norma chilena y española sobre estos cuerpos de agua, se aprecia un criterio diferente de calidad y elaboración de las normas, si bien ambas normas apuntan por ejemplo a la calidad del agua natural, las diferencias radican en límites de diferentes valores e inexistencia de parámetros en una de las dos normas, esto último se marca claramente en el caso del agua natural del estero Tambo donde no se pudieron comparar 6 de 8 parámetros. Lo anterior hace ambas normas en algunos casos incomparables y en otros casos divergentes en el análisis de algunos parámetros (e.g., B en las pozas de Puquíos cumple el RD60 y no cumple la NCh1333). Esto último se podría deber a los objetivos de calidad perseguidos por ambos países para el

medio ambiente, al origen de elaboración de las normas y/o a las características propias de cada lugar, específicamente del sustrato geológico que sustenta las aguas naturales que drenan.

- 3) El agua de las pozas de Puquíos resultó ser de mejor calidad que el agua del estero Tambo, una vez comparada la calidad de éstas con las normas de agua potable y natural (chilena y española). Este comportamiento muestra un mejoramiento de la calidad aguas abajo, la vega Tambo está a los 3940 msnm y la vega Puquíos está a los 3.930 msnm. La menor calidad del estero Tambo podría estar influenciado en parte por la actividad minera (Cepeda *et al.*, 2014) que se realizaba al momento del monitoreo, la que según los datos obtenidos desde el Atlas de Faenas Mineras de Coquimbo (SERNAGEOMIN, 2011) se localiza aguas arriba de Tambo, a los 4.197 msnm. A su vez se puede deducir que el mejoramiento de la calidad de agua en el sistema léntico de Puquíos se puede deber a la capacidad depuradora de la VTP (Pérez-Olmedilla *et al.*, 2000), tratamiento natural que realizaría la vega, en donde el nivel de los parámetros de salida serían menores a los de entrada (Johnston, 1991).

Futuras líneas de investigación:

El análisis de los ecosistemas altiplánicos, específicamente el análisis del agua de éstos, es un tema recientemente investigado y con información limitada. Un ejemplo claro de esto son las bases de datos de calidad de agua, las cuales se reducen a algunas investigaciones, con datos puntuales o de algunos meses, y a información de programas de monitoreo de compañías mineras desarrollados durante varios años, pero que no son accesibles por tener carácter de confidencial. De este modo el espectro de futuras investigaciones se abre la oportunidad de levantar mayor cantidad y calidad de información en estos ecosistemas y a obtener las bases de datos de las compañías mineras, una vez se

inicien los planes de cierre de muchas faenas localizadas en diversos sectores del altiplano chileno.

ANEXOS

Anexo 1.

Artículo:

Dinámica fluviométrica y limnológica de un cuerpo superficial de agua asociado a un prado húmedo de los Andes del norte-centro de Chile.

Dinámica fluviométrica y limnológica de un cuerpo superficial de agua asociado a un prado húmedo de los Andes del norte-centro de Chile

Stream-flow and limnological dynamics of a surface body-water associated with a wet-pasture of the Andes of north-central Chile

Jorge Cepeda-Pizarro^{1*}, Alfonso Antonio Armijo León²

RESUMEN

A partir de una base de datos que cubrió 18 años, se analizó el comportamiento de algunos parámetros limnéticos de un cuerpo superficial de agua presente en una vega ubicada en la alta montaña de una hoya hidrográfica de los Andes del norte-centro de Chile. Se documenta la dinámica fluviométrica y la variación temporal de diversos parámetros físicos e hidroquímicos. El sistema se caracterizó por una elevada variabilidad temporal (tanto anual como mensual) de los parámetros estudiados. Esta variabilidad impidió detectar patrones temporales. El caudal más bajo mostró una clara correspondencia con la precipitación observada, no así el caudal más alto. Las características hidroquímicas del cuerpo de agua son consistentes con las características geológicas del área de estudio.

Palabras clave: limnología andina, Andes desérticos, ecosistemas de montaña, vegas andinas, ríos andinos.

ABSTRACT

By using an 18-years database, it was analyzed the behavior of a series of limnological parameters of a surface water body found in a wet-pasture located in the high mountain area of a river basin of north-central Chile. It is documented its stream-flow dynamics and the temporal variation of diverse physical and hydrochemical parameters. The system is characterized by a high temporal variability (both annually and monthly) of the parameters studied. This variability prevented to observe temporal patterns. Unlike the highest stream flow, the lowest flow showed a clear correspondence with the observed precipitation. The hydrochemical characteristics of the water body are consistent with the geological substrate of the study area.

Key words: Andean limnology, desert Andes, alpine ecosystems, high-land wet-pastures, Andean streams.

Introducción

En aquellos lugares de los Andes del norte-centro de Chile donde las quebradas se ensanchan y la rapidez del flujo de las aguas freáticas y superficiales disminuye, se forman las vegas andinas (Cooper *et al.*, 2010; Squeo *et al.*, 2006). El sustrato geológico por donde fluyen las aguas que mantienen las condiciones hídricas de estos sistemas y las características climáticas determinan las condiciones físicas y químicas de estas como reservorios de agua, recursos forrajeros, vida silvestre y diversidad biológica (Ginocchio *et al.*, 2008). En este trabajo se describe y caracteriza la dinámica fluviométrica, hidrofísica e hidroquímica

del estero Tambo, cuerpo de agua que forma parte de la vega Tambo-Puquíos, unidad de paisaje de la alta montaña andina del norte-centro de Chile. Específicamente, los objetivos del trabajo fueron: 1) caracterizar la dinámica fluviométrica del estero Tambo y 2) documentar la variabilidad altitudinal y temporal de algunos de sus parámetros físicos y químicos.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

Las características climáticas del área de estudio se describen en Cepeda y Novoa (2006). El trabajo

¹ Departamento de Biología. Universidad de La Serena, Chile.

² Departamento de Ingeniería de Procesos. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España.

* Autor para correspondencia: jcepeda@userena.cl

se realizó en la vega “Tambo-Puquíos” (VTP en adelante), la que forma parte de la microcuenca del río del Toro, en la alta montaña de la hoya hidrográfica del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile). Descripciones detalladas de esta microcuenca y de la VTP se encuentran en Cepeda-Pizarro (2013). El estero de interés, estero Tambo (ET en adelante), corre por el borde oeste de VTP.

Parámetros examinados

La mayoría de los parámetros considerados en el estudio están incluidos en las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales y superficiales chilenas, detalladas en CONAMA (2000). La información base fue proporcionada por la Oficina de Asuntos Ambientales de la ex Compañía Minera El Indio (Barrick, Chile), cuyo acceso fue recientemente liberado de la condición de uso restringido y privado. Para la descripción y caracterización fluviométrica de ET se emplearon registros mensuales del período 1983-1999, obtenidos de una estación fluviométrica estándar ubicada a 3.940 m s n m. Para la descripción y caracterización de la variabilidad temporal de los parámetros físicos e hidroquímicos se usó información del período 1982-1999, obtenida a los 3.940 m s n m. Para este fin se consideraron los siguientes parámetros, codificados

según el uso estándar (APHA *et al.*, 1981): pH, RSF, Fe, Mn, Cu, As total, Fl y sulfato. Para la descripción y caracterización de la variabilidad altitudinal se usaron datos obtenidos en estaciones instaladas a 3.920, 3.940 y 3.970 m s n m, registrados en el verano de 1999. Para este objetivo los parámetros físicos examinados fueron conductividad eléctrica, dureza total, sólidos en suspensión y sólidos totales (105 °C); a su vez, los parámetros hidroquímicos examinados fueron pH, acidez titulable, alcalinidad, Ag, Al, As total, Ca, Cd, CN total, Cu, Cr, Fe, Fl, Hg, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn, bicarbonato, fosfato, sulfato, nitrato y nitrito. Debido al número de parámetros medidos, no hubo réplica altitudinal de los análisis químicos.

Una empresa contratista especializada (SITAC, 2001) realizó la toma de muestras y los análisis respectivos, según las normas y técnicas estándares establecidas para ello y descritas en APHA *et al.* (1981), bajo la supervisión de CONAMA y DGA.

Resultados y Discusión

Dinámica fluviométrica del estero Tambo

Ya que durante el período analizado no se observaron flujos nulos, se infiere que el régimen del estero Tambo es de tipo permanente, aunque muy variable tanto mensual como anualmente (Tabla 1, Figura 1). El promedio anual del flujo superficial varió entre 40 y 300 l/s (años 1995 y 1983, respectivamente); con variabilidad más alta a caudal mayor. Los caudales más bajos mostraron

Tabla 1. Promedio mensual, estacional y anual del caudal superficial (l/s) del estero Tambo. Altitud: 3.940 m s n m. Serie de tiempo: 1983-1999.

Parámetro	Media±DE
1. Mes	
Enero	22,4 ± 322,2
Febrero	86,4 ± 75,0
Marzo	72,1 ± 65,3
Abril	61,9 ± 30,1
Mayo	59,9 ± 25,8
Junio	49,1 ± 15,6
Julio	48,4 ± 18,1
Agosto	62,7 ± 26,0
Septiembre	89,7 ± 48,0
Octubre	84,3 ± 52,0
Noviembre	151,7 ± 212,3
Diciembre	210,5 ± 219,8
2. Estación	
Verano	127,7 ± 145,6
Otoño	56,0 ± 7,4
Invierno	67,0 ± 15,5
Primavera	148,8 ± 94,8
3. Año	130,6 ± 117,0

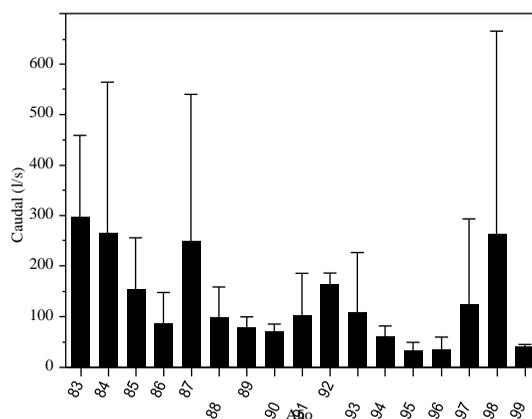


Figura 1. Variabilidad temporal del promedio del caudal superficial (l/s, ± DE) del estero Tambo. Altitud: 3940 m s n m. Serie de tiempo: 1983-1999.

correspondencia con la precipitación registrada; esta correspondencia no se evidenció claramente en el caso de los caudales más altos (Figura 1). El promedio mensual osciló en torno a ~131 l/s. Se mantuvo dentro de un margen relativamente estrecho entre enero (22,4 l/s) y octubre (84,3 l/s), para aumentar bruscamente en noviembre (151,7 l/s) y diciembre (210,5 l/s). Primavera y verano fueron las estaciones con los flujos más altos; lo contrario fue registrado en otoño e invierno (Tabla 1). Este comportamiento es consistente con observaciones realizadas en otras hoyas hidrográficas del desierto transicional de Chile (Vicuña *et al.*, 2011). La correspondencia entre la precipitación observada durante el período estudiado y el caudal superficial sugiere que el caudal mínimo se obtendría con precipitaciones inferiores al 40% del promedio anual (es decir, <81 mm/año). Según Zavala (2006, 2009), en consideración a que los caudales de deshielo y de acumulación de nieve tienden a ser similares durante los años secos, los caudales medios mensuales del estero Tambo asociados a probabilidades de excedencia alta (>70%) no difieren mayormente entre sí. Esta situación ocurre porque los caudales de los años secos se originan principalmente en flujos bajos (p. e., aporte de acuíferos). En oposición, los caudales medios mensuales asociados a probabilidades de excedencia baja (<40%) (p. e., años ENSO) presentan diferencias importantes entre caudales de deshielo y caudales de acumulación de nieve. Esto debido a la contribución del deshielo, fenómeno que ocurre en estas latitudes más intensamente durante el período octubre-marzo que durante el período abril-septiembre.

Dinámica de las características físicas y químicas del flujo superficial del estero Tambo

Altitudinalmente algunas características del agua superficial del estero Tambo difirieron marcadamente. Por ejemplo, la conductividad eléctrica, dureza y acidez titulable y los niveles de Ca, Fe, FI y Mn fueron más altos a los 3.920 m s n m; por el contrario, a esa altitud se registró un valor anormalmente bajo de pH (Tabla 2). Lo anterior probablemente debido a la contribución de las quebradas aportantes ubicadas a mayor altitud y/o a la actividad minera realizada en las cercanías (Oyarzún *et al.*, 2006). En sus aspectos más destacados, el análisis de la serie 1982-1999 mostró valores anuales inferiores a 7,0 para el caso del pH; el nivel de RSF tomó

Tabla 2. Variabilidad altitudinal de parámetros físicos y químicos del agua superficial del estero Tambo. Cifras en mg/l; excepto pH y conductividad (mmhos/cm, a 25 °C).

Parámetro	Altitud (m s n m)		
	3.920	3.940	3.970
Físicos			
Conductividad	1.540,0	439,6	436,8
Dureza	535,4	122,3	176,7
Sólidos en suspensión	48,1	28,6	79,8
Sólidos totales (a 105 °C)	ND	370,0	507,2
Químicos			
pH	3,7	7,2	7,2
Acidez (titulable)	198,7	4,6	6,9
Alcalinidad	ND	22,6	22,0
Ag	0,02	0,02	0,02
Al	0,5	0,4	2,2
As total	0,04	0,1	0,1
Bicarbonato	ND	27,2	26,8
Ca	111,6	29,3	27,9
Cd	0,01	<0,01	<0,01
CN (total)	0,1	0,1	0,1
Cu	0,03	0,1	0,03
Cr	0,02	<0,01	<0,01
Fe	64,5	0,5	0,4
Fl	8,7	0,6	0,7
Fosfato	1,6	1,6	3,4
Hg	<0,01	<0,01	<0,01
K	ND	4,9	ND
Mg	ND	8,3	ND
Mn	12,7	0,2	0,2
Ni	0,1	0,1	<0,01
Nitrato	0,3	0,3	13,6
Nitrito	0,02	0,01	0,01
Pb	0,02	0,02	0,05
Sulfato	ND	900,0	ND

ND: no determinado.

valores entre 1.085,5 y 2.196,7 mg/l y el nivel de sulfato varió entre 477,7 y 1173,7 mg/l. El nivel anual de Fe mostró valores erráticos (muy altos) en otoño (84,5 mg/l) e invierno (53,0 mg/l). Los otros componentes mostraron rangos de valores más estrechos (Tabla 3). El comportamiento anual y mensual de los parámetros examinados se grafica en las Figs. 2 a 9. En general, la variabilidad asociada a los promedios mensuales fue alta, particularmente en los casos de RSF (Figura 2a), pH (Figura 3a), Fe (Figura 4a) y As total (Figura 8a). Una situación similar se registró con los promedios anuales, particularmente en el caso del Fe (Figura 4b). Esta variabilidad impidió detectar diferencias asociadas a años o a estaciones. Valores anómalos se registraron con el pH (Figura 3b, año 1990, valor muy bajo en comparación al resto de la serie) y con el Fe

Tabla 3. Rangos estacionales y anuales de parámetros químicos del estero Tambo. Altitud: 3.940 m s n m. Serie de tiempo: 1982-1999. Cifras en mg/l; excepto pH.

Parámetro	Estación	Rango
pH	Verano	4,8-7,3
	Otoño	4,7-6,5
	Invierno	4,7-6,7
	Primavera	4,7-7,2
	Anual	4,8-6,8
RSF	Verano	824,7-2015,0
	Otoño	1066,7-2250,0
	Invierno	1253,0-2306,7
	Primavera	721,3-2516,7
	Anual	1085,5-2196,7
Fe	Verano	5,9-29,0
	Otoño	6,5-84,5
	Invierno	5,3-53,0
	Primavera	37,4-7,2
	Anual	6,7-25,6
Mn	Verano	1,8-4,7
	Otoño	2,7-6,1
	Invierno	2,5-7,0
	Primavera	1,7-4,5
	Anual	2,8-4,5
Cu	Verano	0,1-2,0
	Otoño	0,1-1,5
	Invierno	0,1-0,5
	Primavera	0,1-0,3
	Anual	0,1-0,6
As total	Verano	0,03-0,6
	Otoño	0,2-0,8
	Invierno	0,3-0,7
	Primavera	0,3-1,0
	Anual	0,3-0,7
Fl	Verano	0,6-3,0
	Otoño	0,8-2,8
	Invierno	0,5-2,2
	Primavera	0,3-1,6
	Anual	0,7-1,7
sulfato	Verano	443,0-1065,0
	Otoño	?-1236,7
	Invierno	508,9-1292,5
	Primavera	416,3-1310,0
	Anual	477,7-1173,7

(Figura 4b, situación similar a la anterior) y con el Cu (Figura 6b, años 1987 y 1989, valores muy altos en relación al resto de la serie).

Tipificación del agua superficial del estero Tambo

Las aguas del estero Tambo corresponden a aguas muy duras (3.920 m s n m) y a duras a moderadamente duras para los pisos superiores. El contenido de sólidos suspendidos supera el valor

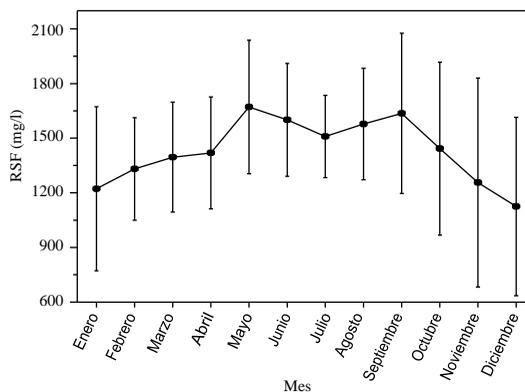


Figura 2a. Variabilidad mensual del nivel promedio de RSF (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: 1982-1999.

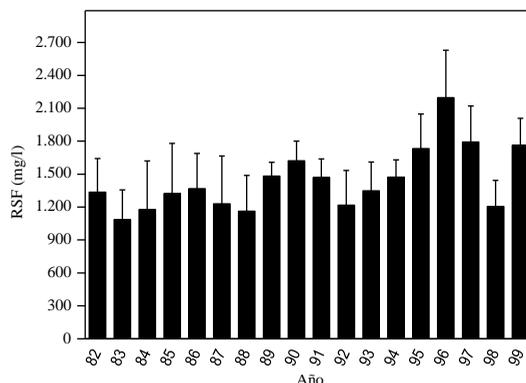


Figura 2b. Variabilidad anual del nivel promedio de RSF (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

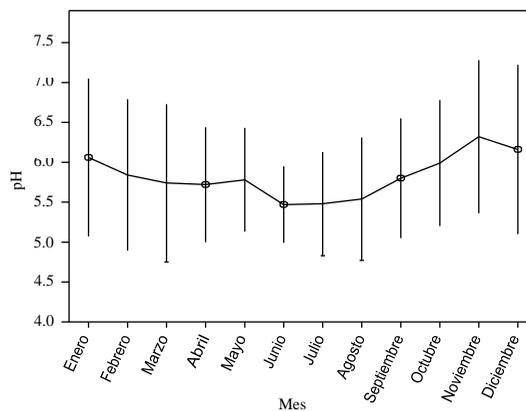


Figura 3a. Variabilidad mensual del pH promedio (\pm DE) del agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

límite superior establecido para la vida acuática en la normativa estadounidense (Chapman, 1996), encontrándose en el rango inferior del tipo aguas

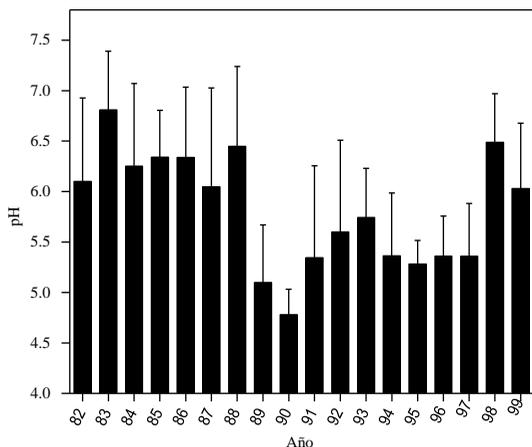


Figura 3b. Variabilidad anual del pH promedio (± DE) del agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

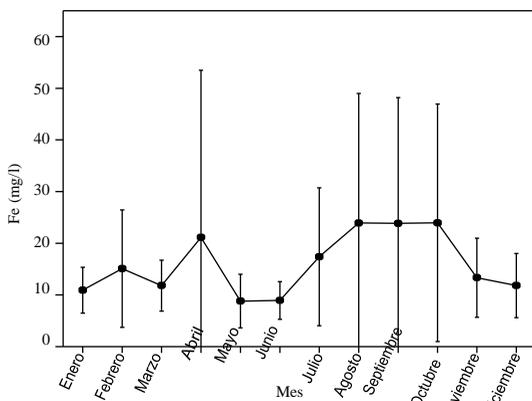


Fig.4a. Variabilidad mensual del nivel promedio de Fe (mg/l, ± DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

salobres (Arribas *et al.*, 2009). Desde el punto de vista de la clase de hábitat acuático (CONAMA, 2000), el estero Tambo clasifica en clase 1 (estación 3.940 m s n m) y clase 3 (estaciones 3.970 m s n m y 3.940 m s n m). Para RSF, las aguas corresponden a las clases 0 y 1 (CONAMA, 2000). Considerando como criterio a la conductividad eléctrica, las aguas de las secciones superiores del tramo estudiado se comportan como aguas dulces, con valores <1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y ligeramente subsalinas en la sección inferior (~1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Los valores de pH se hallan dentro del rango informado para aguas naturales (6,5-8,0). Si se considera el valor promedio del pH, la clase de calidad de agua del estero Tambo es 4 (CONAMA, 2000), concordando con lo reportado por DGA (2004) para el nivel altitudinal de 2.520 m s n m.

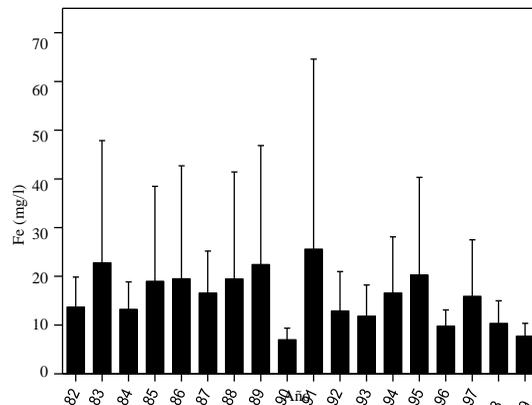


Figura 4b. Variabilidad anual de la concentración promedio de Fe (mg/l, ± DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

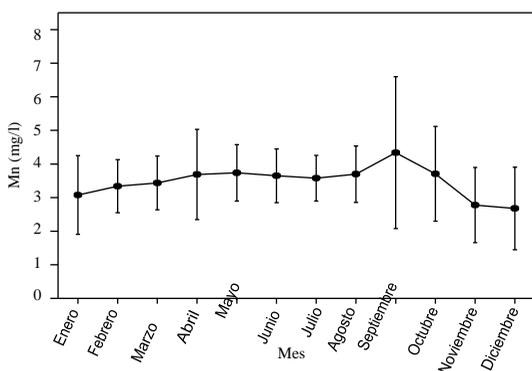


Figura 5a. Variabilidad mensual del nivel promedio de Mn (mg/l, ± DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

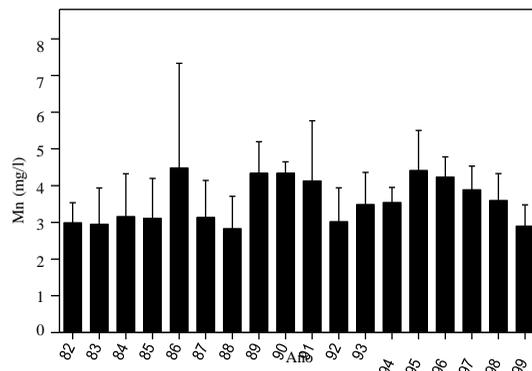


Figura 5b. Variabilidad anual de la concentración promedio de Mn (mg/l, ± DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

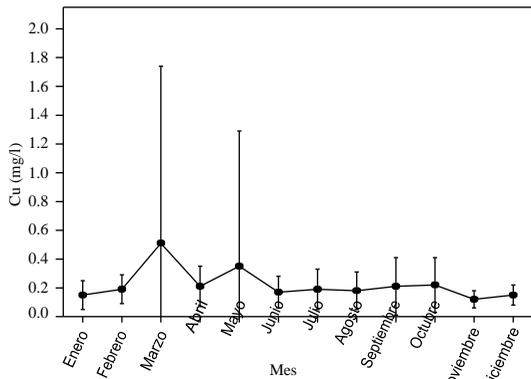


Figura 6a Variabilidad mensual del nivel promedio de Cu (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

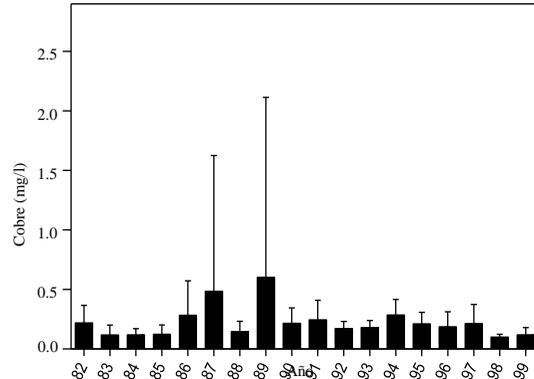


Figura 6b. Variabilidad anual del contenido promedio de Cu (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

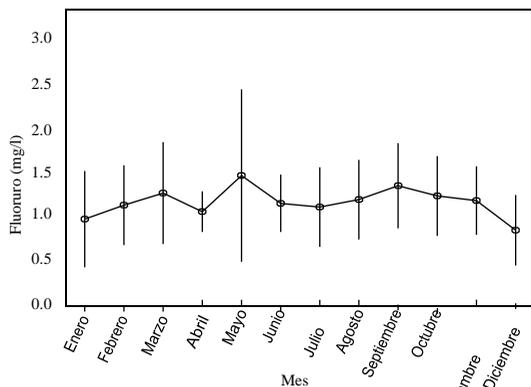


Figura 7a. Variabilidad mensual del nivel promedio de Fluoruro (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

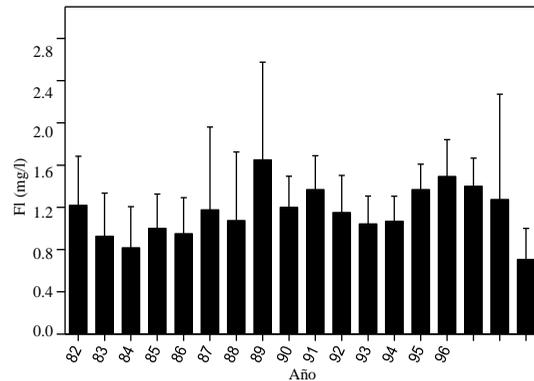


Figura 7b. Variabilidad anual del nivel promedio de As total (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

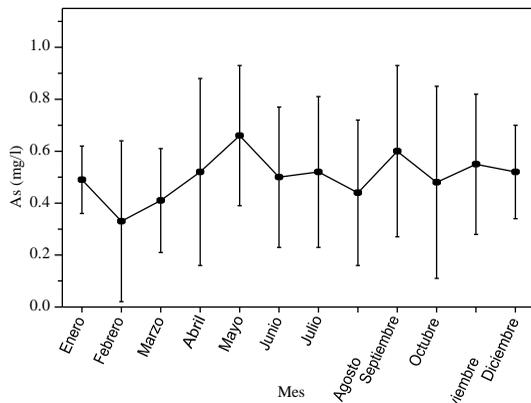


Figura 8a. Variabilidad mensual del nivel promedio de As (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

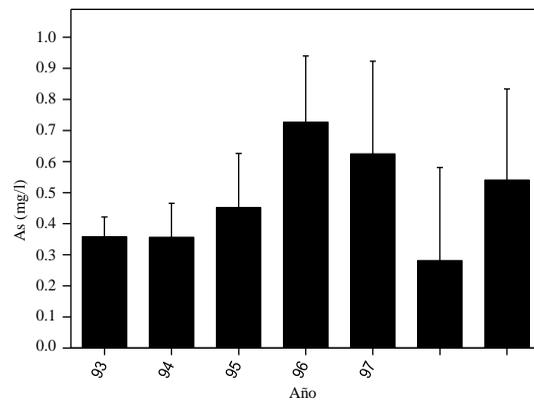


Figura 8b. Variabilidad anual de la concentración promedio de FI (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

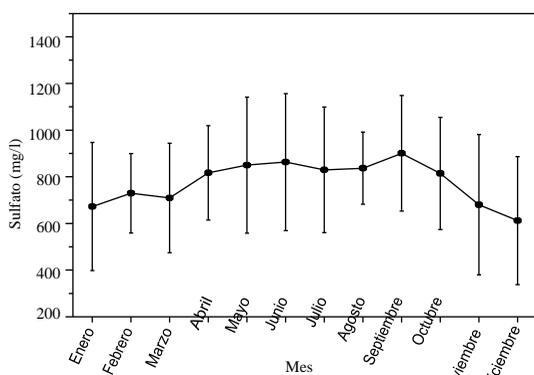


Figura 9a. Variabilidad mensual del nivel promedio de sulfato (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

La alcalinidad promedio es ligeramente superior al límite mínimo establecido en la NCh 1333-78 para la vida acuática (INN, 1978). Respecto del contenido de sulfato, las aguas estudiadas se encuentran en las clases 2 y 3 (CONAMA, 2000). El índice Mg/Ca fue $\sim 0,28$, un valor algo inferior al reportado para aguas continentales (Chapman, 1996). Si se considera el nivel de FI, las aguas del estero Tambo son categoría 1 y 2 (CONAMA, 2000). El nivel de K no presenta situación especial. El promedio mensual de Fe superó ampliamente lo establecido para aguas clase 3 (CONAMA, 2000). Los componentes trazas que se encontraron en concentraciones $>0,1$ mg/l (Chapman, 1996) fueron Al, As total, Cu y Mn. A continuación, en paréntesis, se indica la clase de hábitat por constituyente traza, según CONAMA (2000): Al y Pb (clase 2), Zn (clases 1 y 2), As, Cu, Mn y CN (superan la norma). Componentes con promedios $<0,1$ mg/l fueron Ni, Ag, Cd, Cr y Hg. En paréntesis se indica la clase de hábitat por constituyente traza $<0,1$ mg/l según CONAMA (2000): Ni (entre clases 1 y 2), Cd (clase 2), Cr (entre clases 1 y 2) y Hg (supera la norma). Los elevados niveles de As total han sido declarados naturales (DGA, 2004), a pesar de cierta controversia al respecto (Oyarzún *et al.*, 2006). Las características arriba descritas explican la pobreza de la biota acuática registrada en sus aguas (Cepeda *et al.*, 2006).

La variabilidad asociada a los niveles medios de los parámetros estudiados en este trabajo concuerda con lo observado en ecosistemas fluviales de climas áridos de otras latitudes, argumentándose como causa principal de ella al patrón pluviométrico

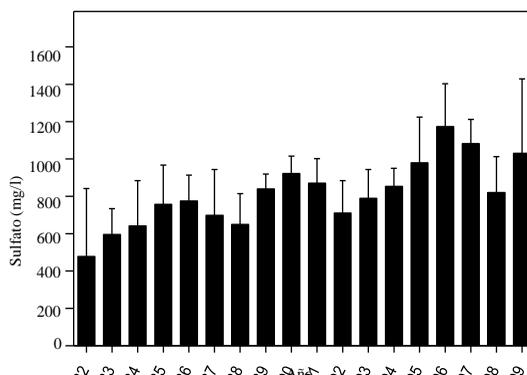


Figura 9b. Variabilidad anual de la concentración de sulfato promedio (mg/l, \pm DE) en el agua superficial del estero Tambo. Serie de tiempo: como en Figura 2a.

(Vidal-Abarca *et al.*, 2004; Millán *et al.*, 2011). Por otro lado, para el caso de ecosistemas de montaña, algunos autores (p. e., Queirolo *et al.*, 2000; Pittaluga y Suvires, 2006) han enfatizado la importancia de las características mineralógicas del sustrato por donde drena el agua; influencia que ocurriría en el área de estudio, según ha sido documentado por Strauch *et al.* (2006).

En el norte de Chile, por causas tanto naturales como antrópicas, el agua está siendo un recurso cada vez más escaso. En esta región las cuencas proveedoras de agua son andinas. Por ejemplo, $>85\%$ del agua que recibe el piso costero de la hoya hidrográfica del río Elqui corresponde a nieve acumulada en los pisos andinos (Zavala, 2009). Además de proveer agua, estas cuencas acogen a sistemas naturales que, en un medio árido, constituyen islas (p. e., bofedales, vegas) que concentran recursos biológicos y patrimoniales de interés para diferentes actores sociales (Osorio *et al.*, 2006). Además de la presencia de agua, estas cuencas y la montaña circundante contienen recursos minerales que las hacen atractivas para una minería intensiva (Oyarzún *et al.*, 2006). Todo lo anterior contribuye a generar un escenario de conflictos ambientales potenciales cuya atención y toma de decisiones demandan poseer el adecuado conocimiento de ellas. Este trabajo estuvo orientado en esa dirección.

Conclusiones

El estero Tambo resultó ser un cuerpo de agua permanente. En sus aguas se registró la presencia de

metales, componentes no metálicos inorgánicos y elementos traça propios del sustrato geológico de las montañas andinas circundantes. Las características físicas y químicas medidas mostraron una elevada variabilidad temporal en torno a los niveles promedio, aparentemente en concordancia con el patrón pluviométrico del área, según lo observado en ecosistemas fluviales de climas áridos y semiáridos de otras latitudes. Algunos parámetros mostraron una conducta errática, probablemente debida a la influencia de la actividad minera que se realiza en las inmediaciones del estero. No se detectaron patrones estacionales en el comportamiento de los parámetros monitoreados, como era esperado según las características del clima mediterráneo imperante

en la zona. Contribuyeron a ello, aparentemente, tanto las fluctuaciones naturales de las características físicas y químicas del cuerpo de agua como los impactos sobre estas que recibe de la actividad minera circundante.

Agradecimientos

Esta publicación fue financiada por la Dirección de Investigación de la Universidad de La Serena (La Serena, Chile) por medio del proyecto CD-01020795 a J. Cepeda P. Agradecemos el acceso a la base de datos del programa de monitoreo de calidad de aguas de la ex-Compañía Minera El Indio (alta montaña del valle de Elqui, Chile).

Literatura Citada

- APHA; AWWA; WPCF.
1981. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association American (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF). 16th edition. Washington D.C.
- Arribas, P.; Gutiérrez-Cánovas, C.; Abellán, P.; Sánchez-Fernández, D.; Picazo, F.; Velasco, J.; Millán, A.
2009. Tipificación de los ríos salinos ibéricos. *Ecosistemas*, 18: 1-13.
- Cepeda-Pizarro, J.
2013. Variabilidad temporal de algunos parámetros físicos e hidroquímicos de un prado húmedo altoandino del norte-centro de Chile. *Idesia*, 31: 89-97.
- Cepeda P., J.; Novoa, J.
2006. La cordillera alto andina del Valle del Elqui. En: *Geoecología de los Andes desérticos. La alta montaña del valle del Elqui*. Cepeda P., J. (ed.). Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile, pp. 39-66.
- Cepeda P., J.; Squeo P., F.; Cortés M., A.; Oyarzún M., J.; Zavala Z., H.
2006. La biota del humedal Tambo-Puquíos. En: *Geoecología de los Andes desérticos. La alta montaña del valle del Elqui*. Cepeda P., J. (ed.). Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile, pp. 243-283.
- CONAMA.
2000. Guía para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas (Informe Técnico). Comisión Nacional del Medio Ambiente. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- Cooper, D.J.; Wolf, E.C.; Colson, C.; Vering, W.; Granda, A.; Meyer, M.
2010. Alpine peatlands of the Andes, Cajamarca, Peru. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 42: 19-33.
- Chapman, D. (ed.).
1996. Water quality assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd Edition. UNESCO/WHO/UNEP. E & FN Spon, an imprint of Chapman and Hall. Cambridge University Press. Great Britain.
- DGA.
2004. Diagnóstico y clasificación de los cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Elqui (Informe Técnico). Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- Giocchioso, R.; Hepp, J.; Bustamante, E.; Silva, Y.; De La Fuente, L.M.; Casale, J.F.; De La Harpe, J.P.; Urrestarazu, P.; Anic, V.; Montenegro, G.
2008. Importance of water quality on plant abundance and diversity in high-alpine meadows of the Yerba Loca Natural Sanctuary at the Andes of north-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81: 469-488.
- INN.
1978. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos (Informe Técnico). Norma chilena oficial (NCH 1333, oficio 1978, modificada 1987). Normas chilenas. Catálogo 2012. Instituto Nacional de Normalización (INN). Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- Millán, A.; Velasco, J.; Gutiérrez-Cánovas, C.; Arribas, P.; Picazo, F.; Sánchez-Fernández, D.; Abellán, P.
2011. Mediterranean saline streams in the southeast Spain: What do we know? *Journal of Arid Environments*, 75: 1352-1359.
- Pittaluga, M.A.; Suvires, G.M.
2006. Chemical composition and water quality of the Castaño river, Calingasta, San Juan Province, Argentina. *Multequina*, 15: 17-26.
- Osorio B., R.; Cabezas C., R.; Reyes S., H.; Álvarez L., P.; Koné, T.
2006. Humedales altoandinos de la IV Región. En: *Geoecología de los Andes desérticos. La alta montaña del valle del Elqui*. J. Cepeda P. (ed.). Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile, pp. 153-239.
- Oyarzún, R.; Guevara, S.; Oyarzún, J.; Lillo, J.; Maturana, H.; Higuera, P.
2006. The As-contaminated Elqui river basin: a long lasting perspective (1975-1995) covering the initiation and development of Au-Cu-As mining in the high Andes of

- northern Chile. *Environmental Geochemistry and Health*, 28: 431-443.
- Queirolo, F.; Stegen, S.; Mondaca, J.; Cortés, R.; Rojas, R.; Contreras, C.; Muñoz, L.; Schwuger, M.J.; Ostapczuk, P.
2000. Total arsenic, lead, Cadmium, copper, and zinc in some salt rivers in the northern Andes of Antofagasta, Chile. *Science of the Total Environment*, 255: 85-95.
- SITAC.
2001. Programa de control de calidad de agua. Cuenca del Río Elqui. IV Región de Coquimbo. Compañía Minera El Indio (Informes Técnicos Anuales período 1983-2000). Santiago, Chile.
- Squeo, F.; Warner, B.G.; Aravena, R.; Espinoza, D.
2006. Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural* 79, 245-255.
- Strauch, G.; Oyarzún, J.; Fiebig-Wittmaack, M.; González, E.; Weise, S.M.
2006. Contributions of the different water sources to the Elqui river runoff (northern Chile) evaluated by H/O isotopes. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 42: 303-322.
- Vidal-Abarca, M.R.; Gómez, R.; Suárez, M.L.
2004. Los ríos de las regiones semiáridas. *Ecosistemas*, 13: 16-28.
- Vicuña, S.; Garreaud, R.D.; McPhee, J.
2011. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 105: 469-488.
- Zavala, H.
2006. Hidrología del humedal Tambo-Puquíos. En: Geocología de los Andes desérticos. La alta montaña del valle del Elqui. J. Cepeda P. (ed.). Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile, pp. 285-322.
- Zavala, H.
2009. Hidrología de la cuenca del río Elqui. En: Los sistemas naturales de la cuenca del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): vulnerabilidad y cambio del clima. J. Cepeda P. (ed.): Ediciones Universidad de La Serena La Serena, Chile, pp. 59-156.

ANEXOS

Anexo 2.

Artículo:

Some abiotic characteristics of shallow ponds included in an Andean peatland of the transitional desert of Chile.

A. INVESTIGACIONES

Some abiotic characteristics of shallow ponds included in an Andean peatland of the transitional desert of Chile

Algunas características abióticas de pozas superficiales interiores presentes en una vega altoandina del desierto transicional de Chile

J. Cepeda-Pizarro^{1*}, Alfonso A. Armijo L.², Sebastián O. Pérez B.²

ABSTRACT

The study ponds are part of a peatland located in the Elqui river basin of the Andes. They turned out to be heliotropic (homoeothermic), mesotrophic and mesopoikilohaline microlimnotopes. The ponds showed high content of dissolved metals, mainly Ca (mean ~205 mg/l), Na (~60 mg/l), Mg (~60 mg/l) and K (~13 mg/l), and the inorganic non-metals sulfate (~976 mg/l), chloride (~34.2 mg/l), phosphate (~23 mg/l), bicarbonate (~11 mg/l) and nitrate (~3.3 mg/l). Excluding Hg, Se and nitrite, trace elements were represented by Al, As, Cd, CN, Cu, Cr, Fe, Ba, Be, Co, Zn, Mo, Ni, Pb, Li, Ag, and V. The cationic pattern of ponds was Ca > Na > Mg > K > Mn; whereas the anionic pattern was sulfate > chloride > phosphate > carbonate > F. Although we did not study, the hydrochemical characteristics of these water bodies seem to reflect the characteristics of the geological substrate of the mountains through which the water drains into the peatland.

Key words: Andean hydrochemistry, Andean wetlands, desert ponds, temporary ponds, saline ponds.

RESUMEN

Las pozas estudiadas forman parte de una vega ubicada en el piso altoandino de la hoya hidrográfica del río Elqui. Estas resultaron ser microlimnotopos heliotópicos (homeotérmicos), mesotróficos y mesopoikilohalinos. Las pozas mostraron niveles elevados de metales disueltos, principalmente Ca (promedio: ~205 mg/l), Na (~60 mg/l), Mg (~60 mg/l) y K (~13 mg/l), y los inorgánicos no metálicos sulfato (~976 mg/l), cloruro (~34,2 mg/l), fosfato (~23 mg/l), bicarbonato (~11 mg/l) y nitrato (~3,3 mg/l). Excluyendo Hg, Se y nitrito, las pozas presentaron niveles traza de Al, As total, Cd, CN, Cu, Cr, Fe, Ba, Be, Co, Zn, Mo, Ni, Pb, Li, Ag y V. El patrón catiónico de las pozas fue Ca > Na > Mg > K > Mn; a su vez, el patrón aniónico fue sulfato > cloruro > fosfato > carbonato > F. Aunque no fue estudiado por nosotros, las características hidroquímicas de estos cuerpos de agua parecen reflejar las características del sustrato geológico de las montañas por medio del que el agua fluye hacia la vega.

Palabras clave: hidroquímica andina, humedales andinos, charcas desérticas, charcas temporales, charcas salinas.

Introduction

The geological and geomorphologic heterogeneity of the highlands of the transitional desert of Chile create a mosaic of environmental conditions in which habitats with highly contrasting features develop. For instance, peatlands originate in areas where water accumulates or emerges to the surface (Squeo *et al.*, 2006). Contrasting with the arid surroundings, these landscape units provide good living conditions for animal and plant

communities (Cepeda-Pizarro *et al.*, 2006). Because of this, peatlands of the Andes transitional desert are considered spots of biodiversity. Nowadays, the possible effects of climate change and stress due to heavy water consumption by mining and the local human population have raised public concern about the well-being of these landscape units (Contreras, 2002; Souvignet *et al.*, 2012).

A diverse array of environmental conditions of the highlands of the transitional desert are the main local factors shaping these peatlands as habitats

¹ Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad de La Serena. Casilla 599, La Serena, Chile.

² Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (España). Juan de Quesada N° 30. Las Palmas de Gran Canaria, España.

* Corresponding author: jcepeda@userena.cl

Fecha de Recepción: 12 Enero, 2015.

Fecha de Aceptación: 4 Junio, 2015.

(Squeo *et al.*, 2006). Ponds, both permanent and temporary, are characteristic landscape components of these peatlands (Coronel *et al.*, 2004). Given that they offer an array of microhabitats susceptible of being colonized and exploited by a diversity of small organisms, mainly insects in their larval stages (Cepeda-Pizarro & Pola, 2013), these aquatic habitats can contribute disproportionately to regional diversity (Williams, 1999). Nevertheless, water quality is a matter of adaptation and survival for this type of organism (Coronel *et al.*, 2007). Although some information is available about the physical and chemical characteristics of ponds in the northern Andes (e.g., López *et al.*, 1999; Risacher *et al.* 2002, 2003), little is known about the abiotic conditions of ponds located in the Andean transitional desert. Consequently, the aims of this study were to (1) describe the ponds in terms of their main physical and chemical attributes, and (2) compare their characteristics with those of ponds found in the Andes further north.

Materials and Methods

Study site and ponds

The present study was conducted in a peatland locally referred to as “vega Tambo-Puquíos” (VTP

hereafter), located in the high-Andean section of the Elqui river basin (Figure 1). The VTP is located in a narrow valley, at 3850-4000 mamsl. It has an extension of ~6 km and a surface area of ~10 km². It derives its water from small arroyos and rivulets that flow down slope from the surrounding mountains, from its own snow cover formed during winter and from subterranean water. The VTP is flat in most sectors, with a micro-topographic pattern of vegetation formed by hassocks and hummocks. In other sectors, it is narrow and discontinuous. The aquatic habitats are a rivulet (the Tambo rivulet), water linked to its peat matrix and the underlying mineral soil, and a series of small and shallow ponds, most of them temporary (PQP henceforth).

Physical and chemical analysis

The study is based on the analysis of four PQPs (Figure 2). They had a surface area ranging from 50 to 1250 m² and a depth of 0.3 to 0.5 m (Figure 3). The physical parameters examined were total hardness, electrical conductivity, turbidity, alkalinity, total dissolved solids, total suspended solids and total solids. The chemical parameters were pH, dissolved metals, inorganic nonmetallic ions and the following trace-elements: Al, total As, Ba, Cu, B, Cd, Co, Cr, Fe, Pb, Li, Ni, Zn, and CN. Monitoring of these

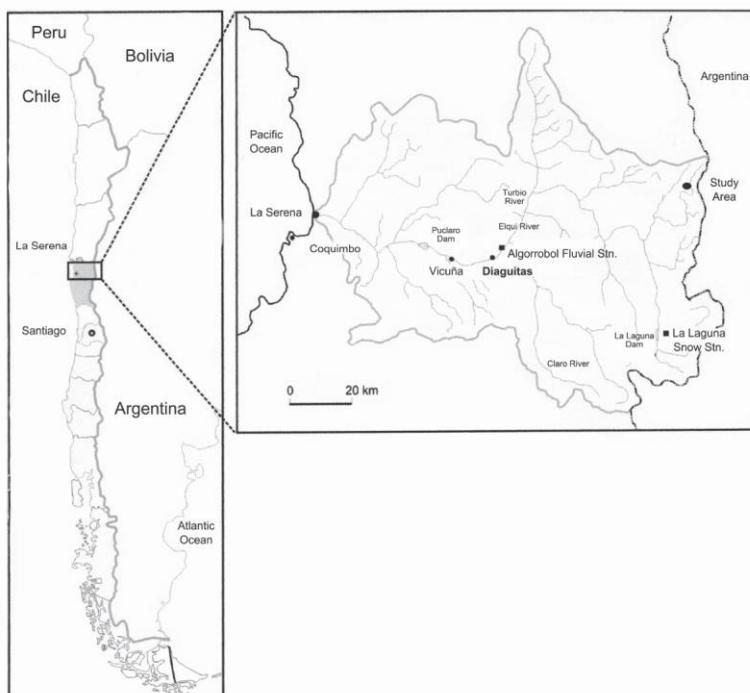


Figure 1. Geographic location of study area in the Elqui river basin (Chile).



Figura 2. General view of study peatland (Tambo-Puquios peatland, 3850 mamsl). The dark parches are shallow ponds included in it. The clear spots in the peatland and its margins are sulfate crusts.



Figura 3. A close up of study pond N° 1, with sulfate deposits on its margins.

parameters was done in accordance with Chilean environmental regulations (CONAMA, 2000). Water sampling was performed during three consecutive summers (January or February). The samples were taken from the surface (0.0-0.2 m). Both sampling and chemical analyses were conducted out by a specialized contractor (SITAC, 2001). The analytical chemical techniques were standard and are fully described in APHA *et al.* (1985). The comparisons with ponds found in the Andes further north were based on published data.

Results and Discussion

In general, the water of the PQPs was hard (mean ~ 834.0 mg/l CaCO_3 equivalent) and transparent (~ 9.0 NTU), with a rather small fraction of total suspended solids (7%) and electrical conductivity of ~ 1678.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On average the pond water was slightly alkaline (i. e. pH ~ 8.5 ; ~ 131.0 mg CaCO_3/l), with a dissolved O_2 content of ~ 10.0 mg/l (Table 1). The dominant metal ions were Ca, Na, Mg, and K. The dominant inorganic non-metals ions were sulfate,

chloride, phosphate, and bicarbonate. The content of sulfate + Ca accounted for 96% of total dissolved solids. The surveillance detected the presence of Al, total As, Ba, Be, B, Cd, Co, total Cr, Fe, Pb, Li, total Mn, Mo, Ni, Ag, V, and Zn; but no Hg, Se or nitrite. The sequence of content of these trace-elements was $B > Li > Al = Ba > As = Fe > Cr = Ni > Co > Pb > Cu > Cd = Zn > CN$ (Tables 2, 3).

Table 1. Mean (\pm se; n=4) of some physical and chemical parameters of shallow ponds of the Andes transitional desert of Chile.

Parameter*	mean \pm se
1. Physical	
EC (μ S/cm at 25 °C)	1678.0 \pm 0.2
TH (mg/l CaCO ₃)	834.3 \pm 85.0
TDS (180 °C)	1229.5 \pm 0.0
TSS (105 °C)	127.7 \pm 23.1
TS (105 °C)	1806.0 \pm 134.0
TUR (ntu)	8.9 \pm 4.2
2. Chemical	
pH (at 22.5 °C)	8.5 \pm 0.5
Dissolved O ₂	9.7 \pm 0.0

*In this and following tables, numbers are expressed in mg/l except when indicated.

Table 2. Mean content (\pm se; n=4) of dissolved metals and trace elements in Andean shallow ponds of the transitional desert of Chile. Units as in Table 1.

Parameter	mean \pm se
Al	0.5 \pm 0.0
Total As	0.3 \pm 0.0
Ba	0.5 \pm 0.0
Be	0.1 \pm 0.0
B	1.9 \pm 0.0
Cd	0.01 \pm 0.0
Ca	204.8 \pm 45.7
Co	0.04 \pm 0.0
Total Cr	0.1 \pm 0.0
Cu	0.02 \pm 0.0
Fe	0.3 \pm 0.0
Pb	0.03 \pm 0.0
Li	0.8 \pm 0.0
Mg	59.7 \pm 0.0
Total Mn	2.4 \pm 0.0
Hg	0.00 \pm 0.0
Mo	0.01 \pm 0.0
Ni	0.05 \pm 0.0
K	12.8 \pm 3.6
Se	0.00 \pm 0.0
Ag	0.01 \pm 0.0
Na	159.5 \pm 0.0
Na (%)	47.5 \pm 0.0
V	0.01 \pm 0.0
Zn	0.01 \pm 0.0

Table 3. Mean content (\pm se; n=4) of inorganic non -metals in Andean shallow ponds of the transitional desert of Chile.

Parameter	mean \pm se
Alkalinity (mg CaCO ₃ /l)	130.9 \pm 19.9
Chloride (mg/l Cl ⁻)	34.2 \pm 0.0
Total CN	0.01 \pm 0.0
Fluoride (mg/l F ⁻)	1.4 \pm 0.3
Bicarbonate (mg CaCO ₃ /l)	10.9 \pm 4.6
Nitrate (mg N/l)	3.3 \pm 2.6
Nitrite (mg N/l)	0.0 \pm 0.0
Phosphate	22.4 \pm 30.9
Sulfate	975.6 \pm 36.3

A remarkable renaissance in the study of pond ecology has taken place in the last decades (Cereghino *et al.*, 2008); however, this assertion does not fully apply to mountain aquatic ecosystems. In the case of wetlands, the attention to conservation of large-scale systems has led to a general neglect of small-scale landscape elements such as pools and ponds, especially those of arid lands (Williams, 1999). From a typological viewpoint, the study ponds are heliotoxic, mesotrophic, and mesopoikilohaline microlimnotopes. Their thermal stratification is monomictic, with few degrees of temperature difference between surface and bottom (Ringuelet, 1962). Water overturn is achieved by the frequent strong winds and convective currents that occur during nocturnal cooling (Cepeda-Pizarro & Novoa, 2006). The characteristics of their water are in between those of freshwater ponds and those truly saline. The water is hard and very close to the inferior limit for brackish water.

Compared to data reported in the literature for natural lentic freshwaters (e. g., Chapman, 1996), the study ponds are very high in phosphate, Ca and sulfate content, and high in fluoride, Fe, K, Mg, Cl, nitrate and total suspended solids, but lower in bicarbonate and CN content. Clearly, these chemical characteristics constrain the existence of biota as compared to water-bodies of better quality found in close basins (Ginocchio *et al.*, 2008). Compared to data reported in the literature, the water of the study ponds is alkaline and higher in electrical conductivity, dissolved O₂ and sulfate content than the water of lentic habitats found in Chile further north; but lower in the content of dissolved metals, non-metals and trace-elements (Tables 4 through 7). In turn, salinity, as measured by TDS, is at the low margin of this range (Table 8). The greater

variability of the hydrochemical characteristics of the northern ponds compared to the ones studied in this work is clear in this table. This high intra-site variability seems to be frequent in water bodies of arid ecosystems, as previously reported from field work (e.g., López *et al.*, 1999; Risacher *et al.*, 2002, 2003; Coronel *et al.*, 2004).

The cationic pattern of the study ponds is Ca>Na>Mg>K>Mn. This pattern is different than

those recorded in highland meadows of central Chile (Ginocchio *et al.*, 2008) and in ponds of the Gorbea salt flat (Risacher *et al.*, 2002), Lllamará (Garcés *et al.* 1998) and Ignorado (Risacher *et al.*, 2002). The Mg/Ca index of the study ponds is ~0.29, a much lower value than the ones reported from more northern ponds (Garcés *et al.*, 1999; López *et al.*, 1999; Risacher *et al.*, 2002; Demergasso *et al.*, 2003). In turn, the (Mg+Ca)/(Na+K) index is close

Table 4. Mean content or range of some hydrochemical parameters of Andean ponds. Units as in former tables.

Site or location	pH	EC	Alkalinity	dO ₂	Reference
This site	8.2-8.9	1635.0	116.8-145.0	9.2-10.5	This study
High alpine meadows (Central-Chile)	5.6-7.6	380-700.0		–	Ginocchio <i>et al.</i> (2008)
Salar de Lllamará (Atacama Desert)	7.5-8.2	20-5110.0	–	–	Demargaso <i>et al.</i> (2003)
Salar de Lllamará (Atacama Desert)	7.1-8.3	–	–	–	Garcés <i>et al.</i> (1998)
Salar de Lllamará (Atacama Desert)	7.0-8.3	–	–	–	López <i>et al.</i> (1999)
Salar de Gorbea (Northern Andes of Chile)	1.3-7.2	–	–	0.32-5.8	Risacher <i>et al.</i> (2002)
Salar de Ignorado (Northern Andes of Chile)	2.7-3.9	–	–	3.8-8.6	Risacher <i>et al.</i> (2002)
Cordillera de Tunari (Bolivian Andes)	4.9-9.7	5.3-238.0	0-31.2	3.4-11.6	Coronel <i>et al.</i> (2004)

–: unavailable data.

Table 5. Range for dissolved metals in Andean ponds. Units as in former tables.

Site or location	Ca	Mg	K	Na	Mn	Reference
Tambo-Puquíos site	162.7-253.3	58.3-61.1	10.2-17.0	147.5-171.5	1.5-6.0	This study
Salar de Lllamará	741.1-1120.0	534-3063.0	534-3063	9919.7-74976.3	–	Demargaso <i>et al.</i> (2003)
Salar de Lllamará	332.6-910.0	141-1799	222-4066	7471-113473.0	–	López <i>et al.</i> (1999)
Salar de Gorbea	200.3-1050.0	9.7-27956	43-5786	253-51035	3.3-489.0	Risacher <i>et al.</i> (2002)
Salar de Ignorado	469-529	182-5761.0	86-4027	301.1-13126	2.2-93.4	Risacher <i>et al.</i> (2002)
Cordillera de Tunari	0.5-9.6	0-6.3	0.1-1.5	0.1-5.3	–	Coronel <i>et al.</i> (2004)

–: unavailable data.

Table 6. Content of dissolved inorganic nonmetals in Andean ponds*. Units as in former tables.

Site or location	Cl	SO ₄	NO ₃	PO ₄	HCO ₃	Reference
This site	27.7-40.7	940.2-1013.2	1.4-5.4	0.6-44.3	7.6-14.2	This study
Salar de Lllamará	381-2674	89-507	–	–	234-1520	Demargaso <i>et al.</i> (2003)
Salar de Lllamará	304-4021	61-603.4	–	–	1.8-4.7	López <i>et al.</i> (1999)
Salar de Gorbea	3.4-3490	5.2-893	–	–	–	Risacher <i>et al.</i> (2002)
Salar de Ignorado	4-141	28.6-683	–	–	–	Risacher <i>et al.</i> (2002)
Cordillera de Tunari	0.3-7.1	0.6-114.6	0-0.4	0.01-0.63	–	Coronel <i>et al.</i> (2004)

–: unavailable data.

Table 7. Mean or range for dissolved trace elements in Andean temporary ponds.

Site	Al	As	Ba	Cu	B	Cd	Co	Cr	Fe	Pb	Li	Ni	Zn	CN	Reference
This site	0.5	0.3	0.5	0.02	1.8-2.0	0.01	0.04								This study
Salar de Lllamará	–	–	–	–	9.7-102.0	–	–	0.1	0.3	und	0.7-0.9	0.1	0.01	0.005	López <i>et al.</i> (1999).
Salar de Gorbea	2.4-4560.0	0.4-10.5	–	–	5.4-1610	–	–	–	–	–	2.0-33.8	–	–	–	Risacher <i>et al.</i> (2002).
Salar de Ignorado	18.9-2919.0	0.4	–	–	3.2-193.5	–	–	–	0.1-145.0	–	0.34-123.3	–	0.3-52.3	–	Risacher <i>et al.</i> (2002).

–: not reported; und: undetected.

Table 8. TDS contents in some Andean ponds of northern Chile (range of altitude: 3000-3950 m asl). Units as in former tables.

Site or location	Altitude (m asl)	TDS (mg/l)
This site (pond water)	3850	1229.5
This site (peat water)	3930	471-654
Gorbea salt flat (Northern Andes of Chile)	3950	2850-297000
del Huasco salt flat (Northern Andes of Chile)	3778	108-113093
Coposa salt flat (Northern Andes of Chile)	3730	119-330671
Carcote salt flat (Northern Andes of Chile)	3690	88-335536
Ascotán salt flat (Northern Andes of Chile)	3716	89-119853
Aguas Calientes 3 salt flat (Northern Andes of Chile)	3950	2491-25150
Capur salt flat (Northern Andes of Chile)	3950	6589-221804
Aguas Calientes 4 salt flat (Northern Andes of Chile)	3665	851-341759
Pajonales salt flat (Northern Andes of Chile)	3537	11728-246674
La Azufrera salt flat (Northern Andes of Chile)	3580	548-23473
Agua Amarg asalt flat (Northern Andes of Chile)	3558	7656-196672
Aguilar salt flat (Northern Andes of Chile)	3320	177044-334882
La Isla salt flat (Northern Andes of Chile)	3950	6229-329693
Las Parinas salt flat (Northern Andes of Chile)	3987	8907-333942
Grande salt flat (Northern Andes of Chile)	3950	8277-129707
Infieles salt flat (Northern Andes of Chile)	3520	1677-318744
La Laguna saltflat (Northern Andes of Chile)	3494	3288-20430
Pedernales salt flat (Northern Andes of Chile)	3370	85-326745
Maricunga salt flat (Northern Andes of Chile)	3760	144-331453

*Sources: this study; Risacher *et al.* (2003); Echaniz *et al.* (2006).

to those found in ponds of the Gorbea and Ignorado salt flats (i.e. 0.12-1.30) (Risacher *et al.*, 2002). The anionic pattern of the study ponds is sulfate > Cl > phosphate > carbonate > F⁻, similar to that reported from ponds of the Gorbea and Ignorado salt flats (Risacher *et al.*, 2002), but different than the one observed in the Lllamará site due to the dominance of chloride in the latter (López *et al.*, 1999). In turn, the study ponds are lower in content of trace elements compared to salt flat ponds of northern Chile (Table 7), but have higher concentrations compared to natural fresh waters (e.g., Chapman, 1996).

The geochemical properties of the surrounding mountains can play an important role in defining the hydrochemical features of Andean water bodies, and thus, in the biota to be found in them (López *et al.*, 1999; Risacher *et al.*, 2002, 2003; Boschetti *et al.*, 2007; Cooper *et al.*, 2010; Alvia *et al.*, 2013). For instance, the abundance of native sulfur leads to sulfate-rich inflow waters, which in turn produce by evaporative concentration sulfate-rich ponds (see Figures 2-3). As expected, the hydrochemistry of the study ponds is responding to this pattern, as the volume of sulfur, sulfides and sulfates is considerable and hydrothermal mineralization is quite active (Veit, 1993).

Conclusions

The study ponds are somewhere in between freshwater and truly saline ponds. Their water quality is very close to the inferior limit for brackish water. Because of their alkaline condition, they are insensitive to acidification. The ponds show a clear transition from north to south compared to high alpine meadows of central Chile and with ponds from northern Chile. Compared to data reported in the literature for natural lentic freshwaters, the study ponds are very high in phosphate and sulfate content, high in fluoride, Na, Fe, K, Mg, chloride and nitrate content, and low in bicarbonate and CN. Compared to ponds from northern Chile, except for sulfate they are lower in the content of most dissolved metals, inorganic non-metals, and trace-elements. Apparently, the water chemistry of these ponds is related to the geological environment of the surrounding mountains.

Acknowledgments

This publication was funded by the Research Office of the University of La Serena, La Serena, Chile. The former El Indio Mining Company provided the database on which this study is based.

Literature Cited

- APHA; AWWA; WPCF.
1985. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Pollution Control Federation. 16th edition. Washington D.C.
- Alvial, I.E., Orth, K., Durán, B.C. Álvarez, E., Squeo, F.A.
2013. Importance of geochemical factors in determining distribution patterns of aquatic invertebrates in mountain streams south of the Atacama Desert, Chile. *Hydrobiologia*, 709: 11-25.
- Boschetti, T.; Cortecchi, G.; Barbieri, B.; Mussi, M.
2007. New and past geochemical data on fresh to brine waters of the Salar de Atacama and Andean Altiplano, northern Chile. *Geofluids*, 7: 33-50.
- Cepeda-Pizarro, J.; Squeo, F.A.; Cortés, A.; Oyarzún, J.; Zavala, H.
2006. La biota del humedal Tambo-Puquíos. In: *Geoecología de los Andes desérticos. La alta montaña del valle del Elqui*. Cepeda-Pizarro, J. (ed.). Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile, pp. 241-284.
- Cepeda-Pizarro, J.; Pola, M.
2013. Relaciones de abundancia de órdenes de Hexápodos terrestres en vegas altoandinas del desierto transicional de Chile. *Idesia*, 31: 31-39.
- Cepeda-Pizarro, J.; Novoa J., J.
2006. La cordillera alta andina del Valle del Elqui In: *Geoecología de los Andes desérticos. La alta montaña del valle del Elqui*. Cepeda-Pizarro, J. (ed.). Ediciones Universidad de La Serena. La Serena, Chile, pp. 39-66.
- Cereghino, R.; Biggs, J.; Oertli B.; Declerck, S.
2008. The ecology of European ponds: defining the characteristics of a neglected freshwater habitat. *Hydrobiologia*, 597: 1-6.
- Chapman, D. (ed.).
1996. *Water quality assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. 2nd Edition. UNESCO/WHO/UNEP. E&F Spon, an imprint of Chapman and Hall. Cambridge University Press, Great Britain.
- CONAMA.
2000. Guía para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas (Informe Técnico). Comisión Nacional del Medio Ambiente. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- Contreras, J.P.
2002. Norte de Chile: conservación de humedales altoandinos para un desarrollo productivo sustentable. *Revista Ambiente y Desarrollo*, XVIII 125-131.
- Cooper, D.J.; Wolf, E.C.; Colson, C.; Vering, W.; Granda, A.; Meyer, M.
2010. Alpine peatlands of the Andes, Cajamarca, Peru. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 42: 19-33.
- Coronel J.S.; Declerck, S.; Maldonado, M.; Ollevier, F.; Brendonck, L.
2004. Temporary shallow pools in high-andes "bofedal" peatlands: a limnological characterization at different spatial scales. *Archives des Sciences*, 57: 85-96.
- Coronel, J.S.; Declerck, S.; Brendonck, L.
2007. High-altitude peatland temporary pools in Bolivia house a high cladoceran diversity. *Wetlands*, 27: 116-174.
- Demargaso, C.; Chong, G.; Galleguillos, P.; Escudero, L.; Martínez-Alonso, M.; Esteve, I.
2003. Tapetes microbianos del Salar de Lllamará, norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76 (3), 485-499.
- Garcés, I.; Chong, G.; López, P.; Auque, L.
1998. Comportamiento geoquímico y mineralógico del Salar de Lllamará (Chile): origen de sus solutos y evolución de sus salmueras. *Boletín Sociedad Chilena de Química*; 43: 417-433.
- Ginocchio, R.; Hepp, J.; Bustamante, E.; Silva, Y.; De La Fuente, L.M.; Casale, J.F.; De La Harpe, J.P.; Urrestarazu, P.; Anic, V.; Montenegro, M.
2008. Importance of water quality on plant abundance and diversity in high-alpine meadows of the Yerba Loca Natural Sanctuary at the Andes of north-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81: 469-488.
- López, P.L.; Auqué, L.F.; Garcés, I.; Chong, G.
1999. Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Lllamará, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 26: 89-108.
- Ringuélet, R.A.
1962. *Ecología acuática continental*. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Argentina.
- Risacher, F.; Alonso, H.; Salazar, C.
2002. Hydrochemistry of two adjacent acid saline lakes in the Andes of northern Chile. *Chemical Geology*, 187: 39-57.
- Risacher, F.; Alonso, H.; Salazar, C.
2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, 63: 249-293.
- SITAC.
2001. *Programa de control de calidad de agua. Cuenca del río Elqui. IV Región de Coquimbo, Chile. Compañía Minera El Indio* (Informe Técnico Consolidado 1997-2000). Santiago, Chile.
- Souvignat, M.; Oyarzún, R.; Verbist, K.M.J., Gaese, H.; Heinrich, J.
2012. Hydro-meteorological trends in semi-arid north-central Chile (29-32° S): water resources implications for a fragile Andean region. *Hydrological Sciences Journal*, DOI: 10.1080/02626667.2012.665607.
- Squeo, F.A.; Warner, B.; Aravena, G.; Espinoza, D.
2006. Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79: 245-255.
- Veit, H.
1993. Upper quaternary landscape and climate evolution in the Norte Chico: an overview. *Mountain Research and Development*, 13: 138-144.
- Williams, D.D.
1999. Conservation of wetlands in drylands: a key global issue. *Aquat. Conserv.*, 9: 517-522.

