

CH-FC
B. Ambiental
5479
C.1



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS

DIATOMEAS DEL SECTOR GEISERES DE EL TATIO (REGION DE ANTOFAGASTA) Y SU POSIBLE USO COMO INDICADORES BIOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile
en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de
Bióloga con mención en Medio Ambiente

PAULA KARINA SEPÚLVEDA ALCAYAGA

Director de Seminario de Título: MSc. Irma Vila Pinto
Co-Director: Msc. Ximena Molina

Enero, 2012
Santiago – Chile



INFORME DE APROBACION SEMINARIO DE TITULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la Srta. Paula Sepúlveda Alcayaga.

“DIATOMEAS DEL SECTOR GEISERES DE EL TATIO (REGION DE ANTOFAGASTA) Y SU POSIBLE USO COMO INDICADORES BIOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Bióloga Ambiental.

Msc. Irma Vila P.
Director Seminario de Título

Msc. Ximena Molina
Co-Director Seminario de Título

Comisión de Evaluación

Presidente Comisión

Evaluador



Santiago de Chile, _____

BIOGRAFÍA



Paula Sepúlveda Alcayaga cursó parte de su educación básica en el Colegio Hrvatska Skola San Esteban en la ciudad de Antofagasta y su educación media en el Colegio Hispano Británico en la ciudad de Iquique, graduándose de enseñanza media en el año 2003. Al año siguiente ingresa a la carrera de Biología con Mención en Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile.

Desde su ingreso a la universidad muestra gran motivación por las materias impartidas. También se interesa por el funcionamiento de la carrera a nivel estudiantil, formando parte del centro de estudiantes como delegada de carrera durante el año 2007.

En los últimos años de la carrera se interesa por la Limnología y el manejo de recursos hídricos, integrándose al laboratorio de la profesora Irma Vila con el fin de desarrollar su seminario de título.

Paula posee más de tres años de experiencia laboral en consultoría y gestión ambiental (desde el 2008 a la fecha) y trabaja actualmente como Coordinadora de Proyectos en el área de medio ambiente de Golder Associates S.A.; siempre con el objetivo de seguir creciendo como profesional y a la vez desarrollando su seminario para obtener el título como Bióloga Ambiental.



DEDICATORIA

Dedico este seminario de título a la memoria de mi papá Marco, quien me entregó todo su amor y apoyo durante los años de estudio en la universidad y durante toda mi vida.

También deseo dedicar este seminario a la memoria de mi tía favorita Ana María y mi tata Sergio.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la tutora de este seminario de título la profesora Irma Vila por todos los conocimientos, sugerencias y motivación entregada para el desarrollo de este seminario de título. Agradezco de igual manera, a Ximena Molina quien también dirigió este seminario como co-tutora e hizo aportes importantes.

También agradezco a la comisión que revisó este seminario, presidida por David Véliz e integrada por Ricardo Serrano. A David por su eficiencia en la corrección y por su siempre buena disposición. A Ricardo, por la voluntad de integrar esta comisión y por las sugerencias hechas.

Agradezco a Claudio Quezada Romegialli por su especial aporte al desarrollo en la parte estadística de este trabajo y por su ayuda y contribución en general para el seminario. También le agradezco por estar siempre a mi lado como pareja apoyándome en mi carrera profesional, laboral y en la vida, dándome ánimo y mucho amor para seguir siempre adelante.

Quiero agradecer también a Carolina Díaz, quien me mostró la importancia de las diatomeas en los ecosistemas y me enseñó sobre ellas. También agradecerle por toda su buena voluntad, motivación y tiempo para guiarme en el inicio de este trabajo y al final con sus sugerencias.

Deseo agradecer a mi mamá Jacqueline, por darme la posibilidad de estudiar lejos de casa y por todo el amor y cuidado infinito que me ha brindado desde siempre. También por ser una excelente profesional y trabajadora y ser así una gran fuente de inspiración y admiración. Agradezco también al resto de mi familia: abuelita Lucy y mis hermanos Valeria, Fabián e Isabella por el cariño.

Finalmente quiero agradecer a mi mejor amiga de la Universidad, Misque Hoare y a toda su familia, en especial a la tía Vivi por brindarme un espacio en su familia durante mis años de estudio.



INDICE

1	Resumen	1
2	Introducción	3
2.1	Hipótesis.....	9
2.2	Objetivos	9
3	Metodología.....	9
3.1	Descripción del Área de Estudio	9
3.2	Materiales y Métodos	16
3.2.1	Variables Ambientales	16
3.2.2	Diatomeas	18
3.2.3	Relación Comunidad de Diatomeas y Ambiente.....	19
4	Resultados.....	20
4.1	Variables Ambientales.....	20
4.1.1	Mediciones <i>in situ</i>	20
4.1.2	Diagramas Maucha para Cationes y Aniones	22
4.1.3	Análisis Estadísticos de Variables Ambientales.....	25
4.2	Diatomeas	27
4.2.1	Comunidad de Diatomeas.....	27
4.2.2	Análisis Estadísticos Comunidad de Diatomeas.....	33
4.3	Relación entre Comunidad de Diatomeas y Variables Ambientales	39
5	Discusión	41
5.1	Características del Área de Estudio	41
5.2	Comunidad de Diatomeas.....	43
5.3	Relación entre Comunidad de Diatomeas y Variables Ambientales	46
6	Conclusiones	48
7	Bibliografía.....	50

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ubicación de estaciones de monitoreo	10
Tabla 2.	Variables ambientales registradas <i>in situ</i>	21
Tabla 3.	Abundancia de especies dominantes	28

Tabla 4. Índice de Shannon-Wiener	33
Tabla 5. Índice de Evenness	33
Tabla 6. Asociación de variables con ejes de ordenación CCA (r^2)	40

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista general área de estudio.....	11
Figura 2. Área de estudio (Datum: WGS 84).....	12
Figura 3. E2 Campaña 2.....	23
Figura 4. E3 Campaña 2.....	23
Figura 5. E4 Campaña 2.....	23
Figura 6. E6 Campaña 2.....	24
Figura 7. E7 Campaña 2.....	24
Figura 8. E8 Campaña 2.....	24
Figura 9. E8 Campaña 4.....	24
Figura 10. E9 Campaña 2.....	25
Figura 11. E10 Campaña 3.....	25
Figura 12. Resultados Análisis de Componentes Principales para variables ambientales	26
Figura 13. Abundancia total de especies campaña 1	29
Figura 14. Abundancia total de especies campaña 2.....	30
Figura 15. Abundancia total de especies campaña 3.....	31
Figura 16. Abundancia total de especies campaña 4.....	32
Figura 17. Resultados Análisis de Componentes Principales para especies de diatomeas	35
Figura 18. Resultados Análisis de Componentes Principales para especies de diatomeas excluyendo estaciones E6 verano y E9 otoño.....	36

Figura 19. Resultados Escalamiento No Métrico Multidimensional (MDS)	38
Figura 20. Resultados del Análisis de Correspondencia Canónica relación especies variables ambientales.....	41

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Estación de monitoreo E2	13
Fotografía 2. Estación de monitoreo E3	14
Fotografía 3. Estación de monitoreo E4	14
Fotografía 4. Estación de monitoreo E6	14
Fotografía 5. Estación de monitoreo E7	15
Fotografía 6. Estación de monitoreo E8	15
Fotografía 7. Estación de monitoreo E9	15
Fotografía 8. Estación de monitoreo E10	16

Anexo 1. Diagramas Maucha

1 Resumen

El sector de Géiseres de El Tatio se ubica en la región geográfica de la puna, por lo que posee un clima caracterizado por precipitaciones menores a 200 mm en el año concentradas durante el verano austral, determinando que la disponibilidad de agua sea uno de los factores más importantes en su dinámica ecológica. Además, la naturaleza del suelo (alto contenido salino y de minerales) y temperaturas extremas según el origen de la fuente, hacen que los sistemas acuáticos presenten condiciones extremas para la vida. Considerando lo anterior, la hipótesis del presente seminario postula que la estructura comunitaria de diatomeas se asocia fuertemente a cambios en variables físicas y químicas asociadas a la disponibilidad de agua, tanto a escala espacial como temporal. Para ello se analizaron ocho estaciones de monitoreo en cuatro campañas estacionales en el sector Géiseres de El Tatio (Región de Antofagasta, Chile) con el objetivo de proponer especies de diatomeas como organismos bioindicadores. En cada estación de muestreo y en cada campaña se registraron variables físicas y químicas y se graficaron diagramas Maucha como aproximación descriptiva de las características químicas de las estaciones de monitoreo, junto a la toma de muestras de diatomeas provenientes de perifiton. Se utilizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para observar patrones espaciales y temporales en la distribución de variables ambientales y de la comunidad de diatomeas. El PCA de las diatomeas se complementó con el índice de Bray-Curtis y análisis de agrupamiento mediante la asignación de inter-relaciones entre estaciones de monitoreo a través de un Escalamiento No Métrico Multidimensional (MDS). Para evaluar si existieron diferencias significativas en la estructura y composición de diatomeas se realizó un análisis de similitud (ANOSIM). Finalmente, se realizó un Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) con el objetivo de determinar la asociación entre las especies con las variables ambientales. Con los diagramas Maucha se observó que las estaciones E2, E3 y E4 corresponden a sistemas clorurados sódicos, las estaciones E6 y E7 a sulfatados cálcicos, E9 y E10 sulfatados sódicos y en E8 se observa una diferencia entre las distintas campañas de monitoreo respecto al anión dominante. En el PCA realizado para variables ambientales, el eje 1 explicó el 95,7% de la varianza acumulada, reflejando un gradiente de salinidad al relacionarse con E2, E3 y E4 lo cual coincidió con los diagramas Maucha. Los análisis

estadísticos realizados para las especies de diatomeas reflejaron diferencias espaciales tal como sucedió para variables ambientales. No se detectaron diferencias temporales en las distintas campañas de monitoreo tanto para variables ambientales como para la comunidad de diatomeas. Finalmente, con el CCA se explicó el 64% del total de la varianza de la relación especies-variables físicas y químicas y se observaron asociaciones entre la comunidad de diatomeas y las variables ambientales, principalmente con especies que se relacionaron fuertemente con la salinidad.

2 Introducción

Los bioindicadores son organismos cuya presencia, abundancia o estado aporta información sobre condiciones ambientales debido a que presentan un particular requerimiento en relación a las variables físicas y/o químicas (U.S. Environmental Protection Agency, 2011; Karr, 1981; CONAMA, 2010).

Los bioindicadores se utilizan para la protección y el manejo del medio ambiente, por medio de monitoreos biológicos¹ para el diagnóstico, evaluación y seguimiento de los ecosistemas (Davis, 1995); así como también la eficacia de medidas de manejo ambiental asociada a proyectos.

Una tendencia en el monitoreo biológico ha sido el desarrollo de métodos para detectar cambios en abundancia, estructura y/o diversidad en ensambles de organismos indicadores (Lane *et al.*, 2009).

En países de América Latina como Panamá, Venezuela, Brasil y Colombia se utilizan las comunidades acuáticas para la evaluación de la calidad de agua, situación que está formalizada en Estados Unidos y Europa con el desarrollo de un enfoque de "integridad biológica²" (Davis & Simon, 1995; Molina & Vila, 2006). La calidad del agua es un parámetro que refleja las condiciones del agua (características físicas, químicas y biológicas) relativas al tipo de requerimiento o uso, como por ejemplo: consumo como agua potable, para recreación, para mantener la salud del ecosistema, etc. (Diersing, 2009; Johnson *et al.*, 1997).

Específicamente en Europa, la Directiva Marco del Agua establece tipos de masas de agua superficial (ríos, lagos, aguas de transición y aguas costeras) donde además se indica la necesidad de establecer condiciones biológicas de referencia de modo de

¹ Los monitoreos biológicos o evaluaciones biológicas son una evaluación de la condición biológica de un cuerpo de agua, por medio del estudio de factores como por ejemplo presencia, número de especies de una comunidad, abundancia, entre otros (U.S. Environmental Protection Agency, 2011).

² Capacidad de soportar y mantener un equilibrio en la comunidad, de adaptación de los organismos que tienen una composición de especies, la diversidad y organización funcional comparable a la de los hábitats naturales de una región (Karr & Dudley, 1981).

definir los criterios biológicos³ para los bioindicadores en cada tipo de masa de agua superficial. Los indicadores biológicos que se establecen para cada tipo de aguas superficiales son, entre otros: composición, abundancia y biomasa del fitoplancton; composición y abundancia de flora acuática; composición y abundancia de la fauna bentónica de invertebrados; y composición, abundancia y estructura de edades de la fauna ictiológica (Parlamento Europeo y del Consejo, 2000).

En el caso de Estados Unidos, existe la ley Ley de Agua Limpia (Clean Water Act) la cual es la principal ley federal de ese país para la protección de las aguas superficiales (U.S. Environmental Protection Agency, 2008) y dirige a los estados a desarrollar criterios basados en la evaluación biológica de ecosistemas (U.S. Environmental Protection Agency, 2010). Esta ley requiere del uso de indicadores biológicos para el desarrollo e implementación de programas de protección de aguas superficiales (U.S. Environmental Protection Agency, 2011).

En Chile, el uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua no se encuentra formalizado, siendo la única aproximación la incorporación de comunidades acuáticas en los estudios de líneas de base y planes de seguimiento o monitoreos de los proyectos que ingresan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, SEIA. En el ámbito de la legislación ambiental aplicable para la protección del agua, la Norma Chilena 1333 (NCh 1333) establece los "Requisitos de calidad del agua para diferentes usos", basándose en parámetros físicos y químicos, abarcando la parte biológica sólo en base a concentración de coliformes. Por otro lado, la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, modificada por la Ley 20.417 (MINSEGPRES, 1994), establece la necesidad de elaboración de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental, donde posteriormente se genera en el año 2005 una "Guía para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas" (CONAMA, 2005) que indica en sus criterios para la elaboración de dichas normas que los bioindicadores podrán ser utilizados en las normas secundarias como herramientas complementarias para determinar los impactos producidos sobre las comunidades acuáticas. No obstante, el Anteproyecto

³ Narrativa o expresiones numéricas que describen la referencia de integridad biológica (estructura y función) de las comunidades acuáticas que habitan las aguas de un determinado uso designado para la vida acuática.

de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales de la Cuenca del Río Loa (CONAMA) menciona en su Título III Niveles de Calidad Ambiental por Áreas de Vigilancia, Artículo 6, la misma frase sin desarrollar más el tema en todo el anteproyecto.

El monitoreo exclusivamente empleando métodos físicos y químicos para calidad del agua posee desventajas, ya que sólo permiten mediciones instantáneas omitiendo eventos de plazos posteriores que pudieron haber sido críticos para la evaluación de impactos en la biota (Karr, 1981; Lobo *et al.*, 2004).

Es así como los indicadores biológicos poseen ventajas para el monitoreo y evaluación de calidad del agua: permiten detectar impactos ambientales o perturbaciones a largo plazo; reflejan la integridad biológica en general e integran los efectos de distintos agentes estresantes; proporcionan una medición ecológica de condiciones ambientales fluctuantes; es menos costoso comparado con el costo de evaluación de contaminantes químicos; y permite evaluar impactos no puntuales como la contaminación difusa (Barbour *et al.*, 1999; Lobo *et al.*, 2004; Karr, 1981).

Entre los organismos bioindicadores de calidad de agua se encuentran las microalgas, macroinvertebrados bentónicos y peces. Cada ensamble nombrado anteriormente posee ventajas específicas que deben ser consideradas según los objetivos del programa de monitoreo ha plantear (Barbour *et al.*, 1999).

Agunos ensambles de microalgas, entre ellas las diatomeas, pueden formar parte del perifiton, el cual se define como una comunidad compleja de microbiota (algas, bacterias, hongos, animales y detritus orgánico e inorgánico) que se encuentra asociada a un sustrato (Salazar, 1998). Las diatomeas son microalgas correspondientes a la clase Bacillariophyceae (reino cromista). Son algas unicelulares fotosintéticas que poseen un característico frústulo de sílice perforado. Actualmente, entre las diatomeas, se estima que hay entre 20.000 y 500.000 taxa diferentes (Díaz & Maidana, 2005).

Las ventajas del uso de perifiton son: las algas tienen altas tasas de reproducción y ciclos de vida muy cortos por lo que permiten evaluar impactos de corto plazo; como productores primarios, las algas son directamente afectadas por factores físicos y

químicos; la toma de muestras es simple y de bajo costo y genera un impacto mínimo en la biota residente; y, los ensamblajes de algas son sensibles a algunos contaminantes cuyos efectos no son visibles en otros ensamblajes acuáticos (Barbour *et al.*, 1999).

Por otro lado, Dixit & Smol (1994) postulan que el uso de diatomeas presenta ventajas para el monitoreo ambiental, pues responden a las perturbaciones ambientales, reflejando cambios a nivel de estructura y dinámica de la comunidad. Las diatomeas al ser colonizadoras exitosas, ya que presentan adaptaciones a diferentes tipos de ambientes (Díaz & Maidana, 2005), es posible encontrarlas en ambientes extremos; tanto en hielos antárticos como en surgencias termales, habitan aguas con extrema salinidad y pH; por lo cual son útiles para monitoreos de sistemas acuáticos con condiciones extremas.

Existen diversos estudios acerca de los límites de tolerancia de las especies de diatomeas ante las variables físicas y químicas, lo que permite que las diatomeas sean utilizadas para registrar cambios ambientales y relacionar estos cambios tanto a perturbaciones causadas por el hombre como por causas naturales (Patrick & Hendrickson, 1993). De esta forma, analizando los cambios en la composición y estructura de las especies que forman las comunidades es posible diagnosticar cambios en la calidad del agua ante, por ejemplo, la presencia de un contaminante (Patrick, 1973).

Para la aplicación de diatomeas como bioindicadores, el conocimiento de su diversidad permite determinar la calidad de ese ambiente, tanto por la premisa básica que considera que cuanto mayor es la diversidad algal, mejor es la calidad del sistema, como por la asociación especie-específica a rangos determinados de las variables del sistema en estudio.

En función de los requerimientos de hábitat, se han identificado significativos gradientes ambientales en el territorio nacional con diferencias latitudinales en composición y abundancia de flora diatomológica, como por ejemplo, la gran riqueza taxonómica de diatomeas en salares la cual incluye varias especies nativas endémicas (Díaz, 2008). Este gradiente en los sistemas acuáticos tiene relación directa con el clima, orografía, topografía, presencia de vegetación aledaña, salinidad y material

particulado, entre otros (Molina & Vila, 2006). Los siguientes factores tienen especial importancia en Chile para el gradiente de los sistemas acuáticos:

1. **Clima.** En especial la pluvimetría y temperatura, en las zonas áridas y semiáridas (Región de Arica y Parinacota hasta hasta Región de Atacama). Las aguas naturales presentan un contenido salino alto debido a un balance hidrológico negativo, lo cual implica tasas de evaporación y contenido de electrolitos altos que las limita para el riego, especialmene en la región árida.
2. **Conductividad.** Definida como la cantidad total de sales y tipo de ellas presentes en el agua. La composición salina de los suelos cordilleranos influye por procesos de intemperización en el contenido salino de las aguas.
3. **Material particulado.** Definida como la cantidad de sedimentos no disueltos presentes en el agua.

El área de estudio del presente seminario de título se inserta en la región geográfica del continente sudamericano conocida como altiplano y puna. El altiplano-puna se extiende desde los 15°S hasta los 28°S aproximadamente (DGA; PUC, 2008).

La puna comparte condiciones climáticas propias del altiplano chileno, el cual está caracterizado por poseer un clima seco y frío con grandes variaciones diarias en temperatura más que variaciones estacionales de la misma, con una cantidad de agua caída menor a 200 mm por año (Valero-Garcés *et al*, 1999). Las precipitaciones se concentran durante el verano austral, diciembre a marzo, lo cual se conoce como invierno altiplánico (Romero, Rivera, & Fernandez, 1997; Aceituno, 1997). Lo anterior contribuye a que los caudales de los ríos del área, formada en parte por la cuenca del río Loa la cual incluye la sub-cuenca del río Salado, sean mayores en verano (Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004).

Respecto a la precipitación, los datos aportados por la estación meteorológica El Tatio disponen de información entre 1977 y 1993 y permiten observar que éstas se concentran durante el periodo estival, alcanzando un promedio de 121,6 mm. Para el periodo de invierno, el agua caída media alcanza los 15,5 mm. La media anual es de 137,2 mm (GDN, 2007).

Respecto a la evaporación, en la zona se cuenta con una estadística de 9 años de la estación El Tatio, que indica que la evaporación total anual (medida en estanque) asciende a 1.594 mm, lo que se traduce en 4,4 mm al día (GDN, 2007). La evaporación junto a la incorporación de solutos como consecuencia de reacciones químicas de alteración de rocas es el proceso que produce la salinización de las aguas (Alonso, 1997).

Las características hidrológicas con baja disponibilidad de agua conjuntamente con la alta radiación presente en la zona de altiplano, puna y montaña conlleva a una tasa de evaporación elevada lo que junto a las características de los suelos origina algunos cuerpos de agua con alta concentración de iones (Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004). Por otro lado, las recargas de aguas subterráneas geotermales y la litología contribuyen a las altas temperaturas y al aporte de Na/HCO_3^- y $\text{Na-Ca-SO}_4^{=}$ (Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004), generando sistemas carbonatados y sulfatados.

Las cuencas altoandinas de la puna de atacama son en general del tipo endorreicas, como es el caso de la cuenca del Salar de Atacama, donde es posible encontrar en sus depresiones salares y sectores lagunares importantes, las que son irrigadas temporalmente, dando origen a vegas y bofedales que ofrecen una importante dinámica ecológica tanto desde el punto de vista de la capacidad de carga de avifauna y fauna terrestre silvestre, como para la sustentabilidad en el uso antrópico de estos significativos recursos de pastoreo y desarrollo de ganado auquénido (Romero, Rivera, & Fernandez, 1997).

Debido a que el área de estudio posee condiciones extremas características de la puna y uno de sus principales atributos es la baja disponibilidad de agua, lo cual conlleva a condiciones particulares como alta salinidad, se trabajó con diatomeas en el presente seminario ya que fue el *taxa* con mayor abundancia registrada en las campañas de monitoreo respecto al resto de *taxas* presentes en el agua (macroinvertebrados bentónicos y macrófitas).

2.1 Hipótesis

Dado que los mayores cambios ambientales de los sistemas acuáticos de la zona de Géiseres de El Tatio dependen de la disponibilidad del agua, se espera que la *estructura comunitaria de diatomeas se asocie fuertemente a cambios en variables físicas y químicas vinculadas a la disponibilidad de agua, tanto a escala espacial como temporal.*

2.2 Objetivos

Objetivo General

Evaluar la asociación de la estructura y composición de la comunidad de diatomeas en relación con variables físicas y químicas en el sistema de altura del sector Géiseres de El Tatio con el fin de proponer especies como indicadoras de calidad del agua.

Objetivos Específicos

- Analizar las variables físicas y químicas para determinar si existen diferencias entre las estaciones de monitoreo y entre las campañas estacionales.
- Analizar la composición y estructura de la comunidad de diatomeas y determinar variaciones entre las estaciones y entre las distintas campañas de monitoreo.
- Determinar si la estructura comunitaria de diatomeas posee relación con las variables físicas y químicas.
- Proponer especies indicadoras de calidad de agua en base a los objetivos anteriores.

3 Metodología

3.1 Descripción del Área de Estudio

El área de estudio corresponde al sector denominado El Tatio, ubicado en la comuna de Calama, provincia del Loa, II Región de Antofagasta, Chile. El área de estudio forma parte de la cuenca exorreica del río Loa y la cuenca endorreica Salar de Atacama.

El Tatio es un campo de géiseres ubicado en la puna chilena, a una altura de 4.200 msnm aprox. Cerca a las fumarolas, se encuentran afluentes de ríos y vegas.

En dicho sector, se establecieron 8 estaciones de monitoreo, las cuales fueron definidas en el plan de seguimiento como parte de un monitoreo biológico y de calidad de agua para un proyecto de exploración geotérmica. En la Tabla 1 se muestra la ubicación de las estaciones con sus coordenadas UTM Datum WGS 84.

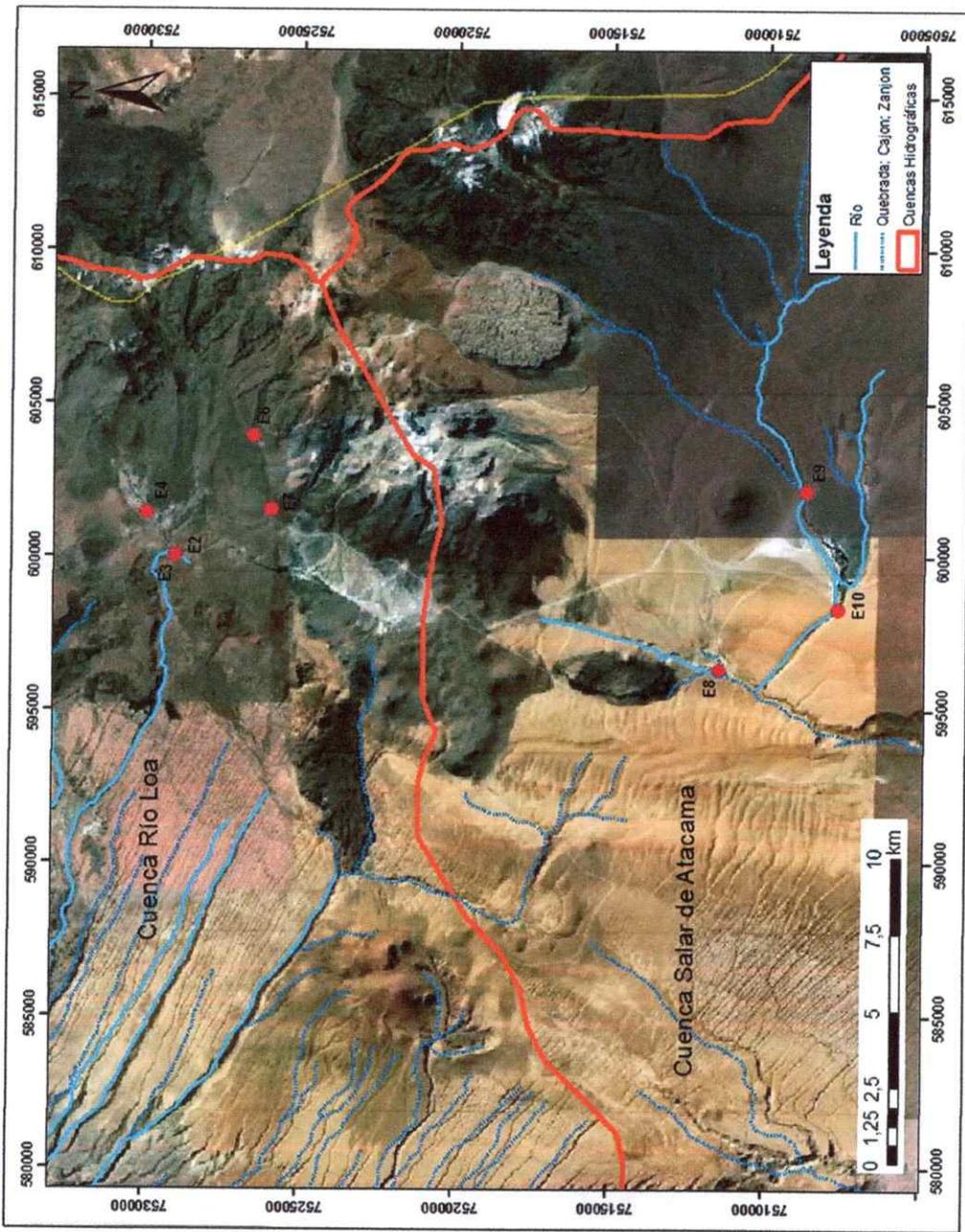
Tabla 1. Ubicación de estaciones de monitoreo

Estación	Nombre	Coordenadas UTM WGS 1984 (m)		Altitud (msnm)
		Norte	Este	
E2	Afluente norte río Salado	7529058	600386	4248
E3	Afluente sur río Salado	7529023	600385	4250
E4	La Concha	7529475	601391	4245
E6	Área de Plataforma	7526506	603998	4480
E7	Campamento CORFO	7526314	601583	4350
E8	Vega Juana - Tocarpori	7511566	596292	4202
E9	Vega Putana aguas arriba	7509247	602100	4270
E10	Vega Putana aguas abajo	7508319	598407	4271

En la Figura 1 se muestra la vista general del área de estudio, mientras que en la Figura 2 se muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo.



Figura 1. Vista general área de estudio
 Fuente: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile



Las estaciones E2 y E3 se encuentran ubicadas, respectivamente, en el afluente norte y sur del río Salado (Ver Fotografía 1 y Fotografía 2, Tabla 2).

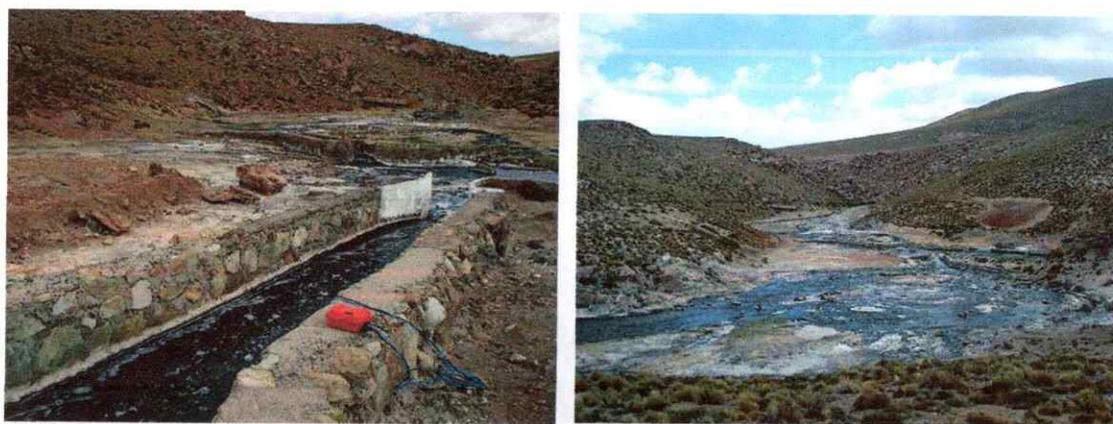
La estación E4 se localiza en el sector La Concha a 1,1 km aprox. al nor-este de las estaciones E2 y E3 (Ver Fotografía 3).

La estación E6 corresponde a una vega cercana a una plataforma existente de exploración geotérmica a 4 km aprox. al sur-este de la estación E4 (Ver Fotografía 4).

La estación E7 se localiza cerca al ex campamento CORFO (2,4 km al oeste de E6 y 3,2 km al sur de E4) (Ver Fotografía 5).

E8 se ubica en la vega Juana – Tocopuri a 15,7 km aprox. al sur de E7 (Ver Fotografía 6).

Las estaciones E9 y E10 se localizan aguas arriba y aguas abajo de la vega Putana (Ver Fotografía 7 y Fotografía 8), respectivamente; ambas estaciones se encuentran a una distancia aproximada de 5 km al sur-este de la estación E8.



Fotografía 1. Estación de monitoreo E2



Fotografía 2. Estación de monitoreo E3



Fotografía 3. Estación de monitoreo E4



Fotografía 4. Estación de monitoreo E6



Fotografía 5. Estación de monitoreo E7



Fotografía 6. Estación de monitoreo E8



Fotografía 7. Estación de monitoreo E9



Fotografía 8. Estación de monitoreo E10

3.2 Materiales y Métodos

3.2.1 Variables Ambientales

3.2.1.1 Determinación de Variables Físicas y Químicas

Se realizaron cuatro campañas de monitoreo de calidad de agua durante el año 2008 y comienzos del 2009, las cuales corresponden al periodo de otoño (abril 2008), invierno (julio 2008), primavera (octubre 2008) y verano (enero 2009).

En cada campaña de monitoreo, se registraron variables físicas y químicas en ocho estaciones de monitoreo. La toma de muestras de agua se realizó en frascos plásticos etiquetados y preservadas de acuerdo al analito correspondiente (NCh-ISO 411/2 Of. 96), y transportadas al laboratorio (NCh 411/3. Of. 96).

Las siguientes variables fueron medidas *in situ* de acuerdo a las siguientes metodologías:

- pH: Potenciométrico. pHmetro/termómetro/ORP de terreno marca Hanna modelo Combo
- Conductividad eléctrica: Potenciométrico. Conductivimetro marca Hach modelo CO 150
- Oxígeno disuelto: Oxigenómetro de terreno marca YSI modelo 95/10

- Temperatura: Potenciométrico. pHmetro/termómetro/ORP de terreno marca Hanna modelo Combo

Las variables químicas fueron medidas en el Laboratorio Químico de Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) de acuerdo a las siguientes metodologías:

- Calcio (Ca^{2+}), Potasio (K^+), Sodio (Na^+), Magnesio (Mg^{2+}) [mg/L]: 4110 Determinación de ANIONES por cromatografía iónica.
- Cloruro (Cl^-) [mg/L]: Método Argentométrico. SISS 2ª versión 2007
- Sulfatos (SO_4^{2-}) [mg/L]: Método gravimétrico con secado de residuo. SISS 2ª versión 2007.
- Fluoruro (F^-) [mg/L]: Método electrodo específico. SISS 2ª versión 2007
- Zinc (Zn^{2+}), Manganeseo (Mn^{2+}), Boro (B), Hierro (Fe^{2+}), Azufre (S^{2-}) y Arsénico (As^{3-}) [$\mu\text{g/L}$]: 3125 B. Plasma Acoplado por Inducción/Método de Espectrometría de Masas (ICP/MS).

Las variables químicas se colectaron y determinaron como parte de un monitoreo de calidad de agua en el marco del SEIA realizado para un proyecto en el sector.

3.2.1.2 Representación a Través de Diagramas Maucha

Se realizaron diagramas Maucha con los cationes y aniones para describir las características químicas de las estaciones de muestreo (Wetzel, 2001). Estos diagramas describen cualitativamente los sistemas acuáticos mostrando las proporciones de cationes y aniones.

3.2.1.3 Análisis Estadísticos de Variables Ambientales

Se realizaron análisis estadísticos exploratorios, utilizando el Análisis de Componentes Principales (PCA) para las variables ambientales con el objetivo de observar patrones espaciales y temporales en su distribución. Se utilizó el programa computacional CANOCO 4.5.

El PCA es un método lineal y es utilizado cuando existen respuestas lineales (correlación lineal) entre las variables (Leps & Smilauer, 2003; Legendre & Legendre, 1998, ter Braak, 1994).

3.2.2 Diatomeas

3.2.2.1 Toma de Muestras e Identificación

Para las diatomeas del perifiton, se obtuvieron muestras de raspado de sustrato con un saca testigos con área conocida de diversos hábitat epipéllicos (sobre sustrato rocoso) y epifíticos (sobre macrófitas).

Las muestras se recolectaron en frascos plásticos fijados con lugol al 4 % debidamente etiquetados y se mantuvieron en un lugar oscuro y fresco durante el transporte y almacenamiento hacia el laboratorio para su identificación posterior.

Para su identificación y cuantificación, se obtuvieron alícuotas y se examinaron bajo microscopio. Las muestras fueron pre-tratadas, lo cual consiste en concentrar la muestra, digerir la materia orgánica y realizar las preparaciones microscópicas. A las muestras colectadas se les realizó un tratamiento químico para obtener suspensiones de frústulos y valvas de diatomeas y eliminar los carbonatos cálcicos y la materia orgánica. Las preparaciones finales fueron montadas en resina. De cada preparación, se realizó el recuento de los individuos mediante el método de transecto expresados en abundancia (cel/mm³).

La determinación taxonómica se realizó capturando imágenes digitales que se analizaron con el software KS-100 (Zeiss) que permite medir y contar las estructuras de los ejemplares.

La identificación taxonómica de las diatomeas provenientes del perifiton se realizó mediante claves taxonómicas (Parra, 1982-1983; Parra & Bicudo, 1996; Rivera *et al.*, 1982; Díaz & Maidana, 2005). Conjuntamente se determinó la riqueza específica de la comunidad (Hauer & Lamberty, 1996).

Finalmente, se utilizaron los índices de diversidad: Shannon-Wiener y Evenness como indicadores.

3.2.2.2 Diatomeas como Bioindicadores

Se realizó una revisión bibliográfica de las bases de datos mundiales de diatomeas con el objetivo de encontrar rangos de tolerancia y hábitats de las especies registradas en

los monitoreos. Lo anterior obedece a que no existen bases de datos de diatomeas del sector (puna) donde se ubica el área de estudio.

3.2.2.3 Análisis Estadísticos Comunidad de Diatomeas

Se realizó un PCA con el objetivo de observar patrones espaciales y temporales en la distribución de las especies de diatomeas registradas. Se observó una notoria separación de dos estaciones de monitoreo, las cuales explicaron la mayor parte de la varianza (Ver Figura 17). Dado lo anterior se optó por realizar nuevamente el PCA pero excluyendo las dos estaciones señaladas (Ver Figura 18).

Como no se observaron patrones claros en la distribución de las especies de diatomeas y de manera de complementar los análisis anteriores, se utilizó el índice de Bray-Curtis (Bray & Curtis, 1957) como coeficiente para medir similitud en la composición de especies entre estaciones de monitoreo. Luego, las estaciones de monitoreo se clasificaron en grupos por medio de un análisis de agrupamiento (Clarke, 1993) mediante la asignación de inter-relaciones entre estaciones de muestreo a través de un Escalamiento No Métrico Multidimensional (MDS) (Kruskal & Wish, 1978; Clarke, 1993).

Para evaluar si existieron diferencias significativas en la estructura y composición de diatomeas se realizó un análisis de similitud (ANOSIM) (Clarke, 1993) de dos vías cruzado y sin réplicas, utilizando las estaciones de muestreo y campañas de monitoreo como factores.

Para el análisis de agrupamiento, MDS y ANOSIM se utilizó el programa PRIMER (Clarke & Gorley, 2006).

3.2.3 Relación Comunidad de Diatomeas y Ambiente

Con el objetivo de determinar la asociación entre las especies con las variables ambientales, se hizo un Análisis de Correspondencia Canónica (Ter Braak, 1986) utilizando un test de Monte Carlo con 1000 permutaciones para determinar la significancia estadística. Se utilizó el programa CANOCO 4.5 (Ter Braak & Smilauer, 2005).

4 Resultados

4.1 Variables Ambientales

4.1.1 Mediciones *in situ*

A continuación se describen los resultados de las mediciones realizadas *in situ* para variables físicas y químicas. Los resultados de los analitos químicos determinados en laboratorio se interpretan e incluyen directamente en los análisis estadísticos mostrados en la sección 4.1.3 Análisis Estadísticos de Variables Ambientales y 4.3 Relación entre Comunidad de Diatomeas y Variables Ambientales.

Observando la Tabla 2, se desprende a grandes rasgos, de forma cualitativa, que existen grandes diferencias en las características de las estaciones de muestreo. Las estaciones E2, E3 y E6 son las que presentan las temperaturas más altas (sobre 20° C), mientras que el resto de estaciones posee temperaturas bajo los 20° C, siendo algunas estaciones incluso más frías con temperaturas entre 0 y 1° C.

También se distinguen diferencias en la conductividad (CE), donde se aprecia que las estaciones E2 y E4 alcanzan los valores más alto (mayor a 10 mS/cm). Respecto al pH, de igual forma se advierten aguas de características ácidas y neutras, en particular la estación E6 en las campañas de invierno, primavera y verano ($\text{pH} < 4$).

Tabla 2. Variables ambientales registradas *in situ*

	Estación	CE [mS/cm]	pH	T [C]	OD [mg/L]
Campaña 1	E02	12,15	7,89	20,1	5,4
	E03	5,05	7,8	34,7	4,1
	E04	17,94	7,16	7,2	8,3
	E06	0,44	7,57	33,2	3,7
	E07	0,39	7,72	0,6	8,9
	E08	0,53	6,57	8,2	7,7
	E09	1,17	7,75	9,6	6,9
	E10	1,4	7	0,4	5,5
Campaña 2	E02	11	7,16	17,3	6,2
	E03	4,86	7,9	30	5,3
	E04	16,68	7,94	12	7
	E06	0,58	3,6	34,7	3,7
	E07	0,36	8,8	0,4	9,8
	E08	6,64	6,64	11	8,4
	E09	8,02	8,02	7,9	7
	E10	1,38	7	0,4	4,1
Campaña 3	E02	11,99	7,71	21,9	7
	E03	5,16	7,72	34,9	6,3
	E04	17,64	6,96	13,4	6,5
	E06	0,65	3,69	31,8	4,8
	E07	0,45	7,03	0,1	8,1
	E08	0,53	7,25	18,3	13,7
	E09	1,13	8,34	12,5	7,8
	E10	1,27	7,81	6,8	8,4
Campaña 4	E02	11,76	7,5	18,7	6,4
	E03	5,61	7,46	34,5	4,1
	E04	18,34	7,16	16,9	6,3
	E06	0,81	3,25	37,5	4,6
	E07	0,44	8,31	10,6	8,5
	E08	0,54	6,75	7,4	6,3
	E09	1,2	7,68	10,9	6
	E10	1,38	7,3	4,3	9,9

Específicamente, las estaciones E2 y E3 poseen temperaturas de 20 y 34° C aprox., respectivamente, y un pH cercano a 7 (Tabla 2).

La temperatura en E4 fluctúa entre los 7 y 17° C mientras que el pH se mantiene cercano a 7 (Tabla 2).

La estación E6 registra una temperatura entre 31 y 37° C, mientras que el pH es 7,5 en la campaña de otoño diferenciándose del resto de las campañas del periodo donde alcanza siempre valores cercanos a 3 (Tabla 2).

La estación E7 registró temperaturas muy bajas en tres de sus cuatro campañas (0,1 a 0,6° C), observándose en la campaña de verano un aumento a 10,6° C. El pH es entre 7 y 8 (Tabla 2).

E8 registra temperaturas entre 7 y 18° C, mientras que el pH varía entre 7 y 8 (Tabla 2).

La temperatura en E9 fue de 7 a 12°C, mientras que la temperatura de E10 fue de 0,4 a 6,8°C. Sobre el pH, ambas estaciones registraron valores cercanos a 7 y 8 (Tabla 2).

4.1.2 Diagramas Maucha para Cationes y Aniones

Los diagramas Maucha, los cuales representan la concentración de cationes (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) y aniones (HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}) de cada estación de monitoreo para las campañas⁴ de invierno, primavera y verano, se muestran en el Anexo 1. A continuación se muestran diagramas de cada estación de monitoreo correspondientes a sólo una de las cuatro campañas de cada estación de monitoreo. Lo anterior es con el propósito de resumir información, ya que en todas las campañas cada estación mostró una composición química similar.

⁴ Para la Campaña 1 (otoño) no fue posible determinar (ND) la concentración de HCO_3^- para ninguna estación de monitoreo.

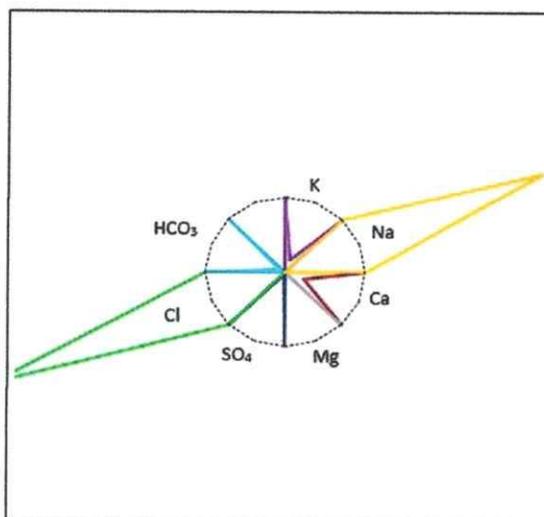


Figura 3. E2 Campaña 2

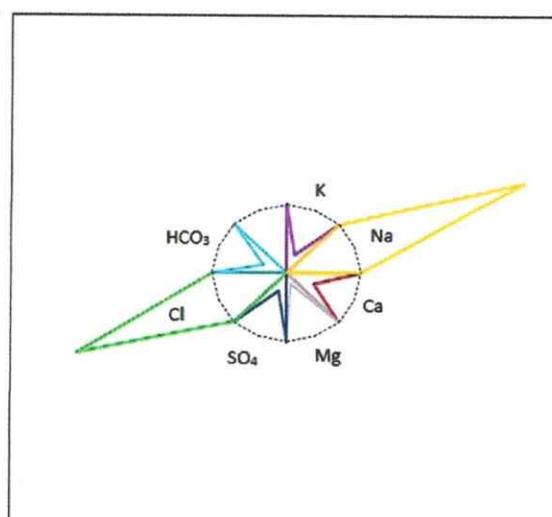


Figura 4. E3 Campaña 2

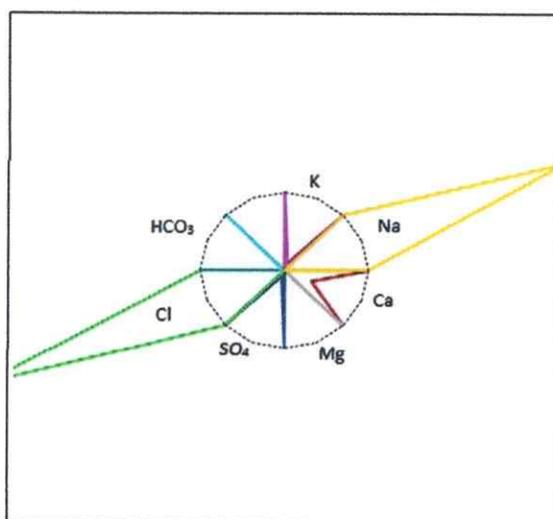


Figura 5. E4 Campaña 2

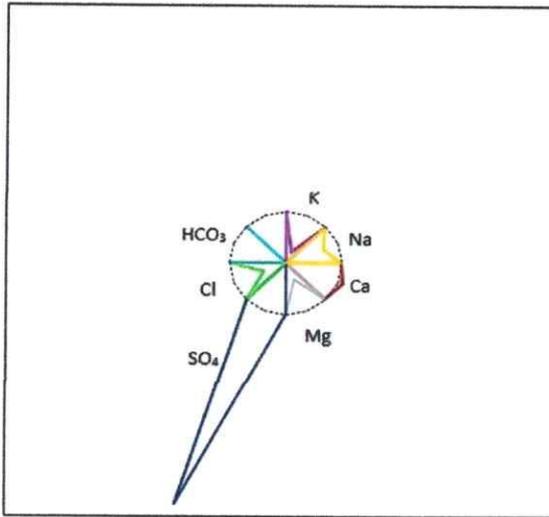


Figura 6. E6 Campaña 2

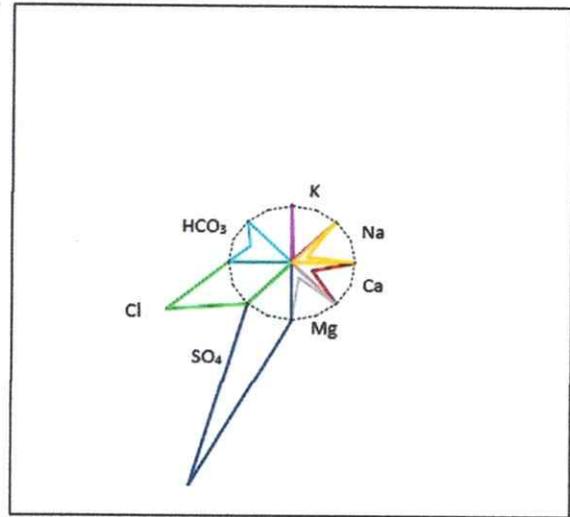


Figura 7. E7 Campaña 2

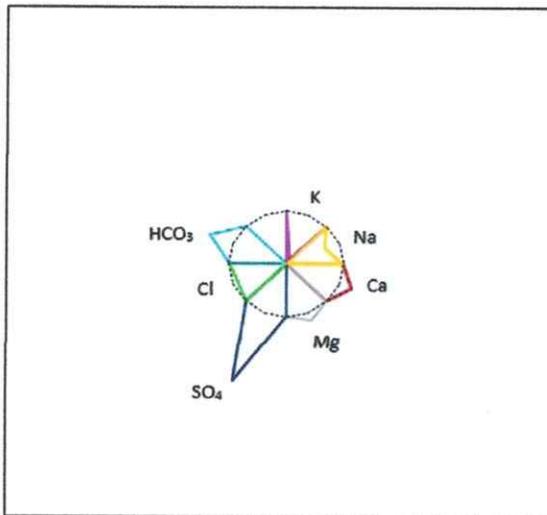


Figura 8. E8 Campaña 2

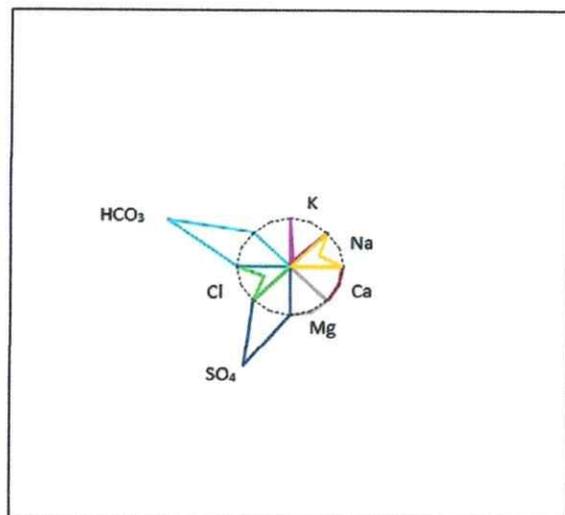


Figura 9. E8 Campaña 4

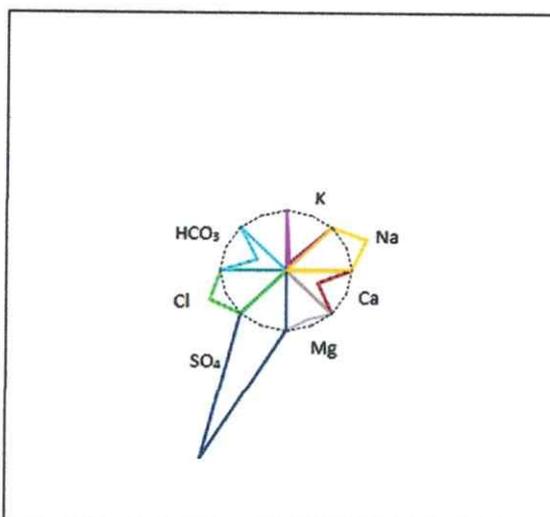


Figura 10. E9 Campaña 2

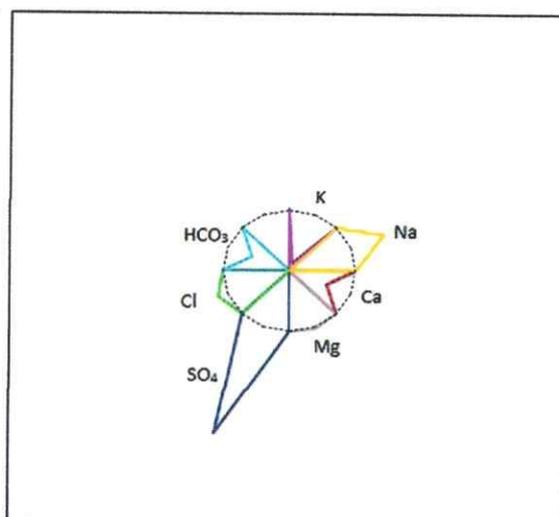


Figura 11. E10 Campaña 3

Las estaciones E2, E3 y E4 poseen una alta concentración de sodio y cloruro (Ver Figura 3, Figura 4 y Figura 5).

En la estación E6 y estación E7, el anión que posee la mayor concentración es el sulfato. El catión que posee mayor concentración es el calcio (Ver Figura 6 y Figura 7).

En la campaña 2 (invierno) y campaña 4 (verano) de la estación E8, el anión con mayor concentración fue el sulfato, mientras que en la campaña de primavera fue el bicarbonato. El catión con mayor concentración en todas las campañas fue el calcio (Ver Figura 8 y Figura 9).

En todas las campañas de las estaciones E9 y E10 el catión con mayor concentración fue el sodio y mientras que el anión con mayor concentración fue el sulfato (Ver Figura 10 y Figura 11).

4.1.3 Análisis Estadísticos de Variables Ambientales

Se realizó un Análisis de Componentes Principales para las variables ambientales, donde el primer eje explica el 95,7% del total de la varianza.

Se observa un patrón espacial de las variables ambientales, no así un patrón temporal (Ver Figura 12).

Se correlacionan con el primer eje las estaciones **E4C1** (La Concha en otoño), **E2C1** (Afluente norte río Salado en otoño), **E2C2** (Afluente norte río Salado en invierno), **E4C2** (La Concha en invierno), **E2C3** (Afluente norte río Salado en primavera), **E4C3** (La Concha en primavera), **E2C4** (Afluente norte río Salado en verano) y **E4C4** (La Concha en verano) (Ver Figura 12), es decir, las estaciones E2 y E4 en todas sus campañas.

Relacionado a lo anterior, la conductividad eléctrica (CE), Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , F^- , B y As^{3-} se correlacionan con el primer eje y con las estaciones E4C1, E2C2, E4C2, E2C3, E4C3, E2C4 y E4C4 (Ver Figura 12).

El SO_4^{-2} se relaciona con **E7C2** (Campamento Corfo), **E9C2** (Vega Putana aguas arriba) y **E10C2** (Vega Putana aguas abajo) (Ver Figura 12).

La temperatura (T) se relaciona con **E3C1**, **E3C3** y **E3C4** (Afluente sur río Salado) (Ver Figura 12).

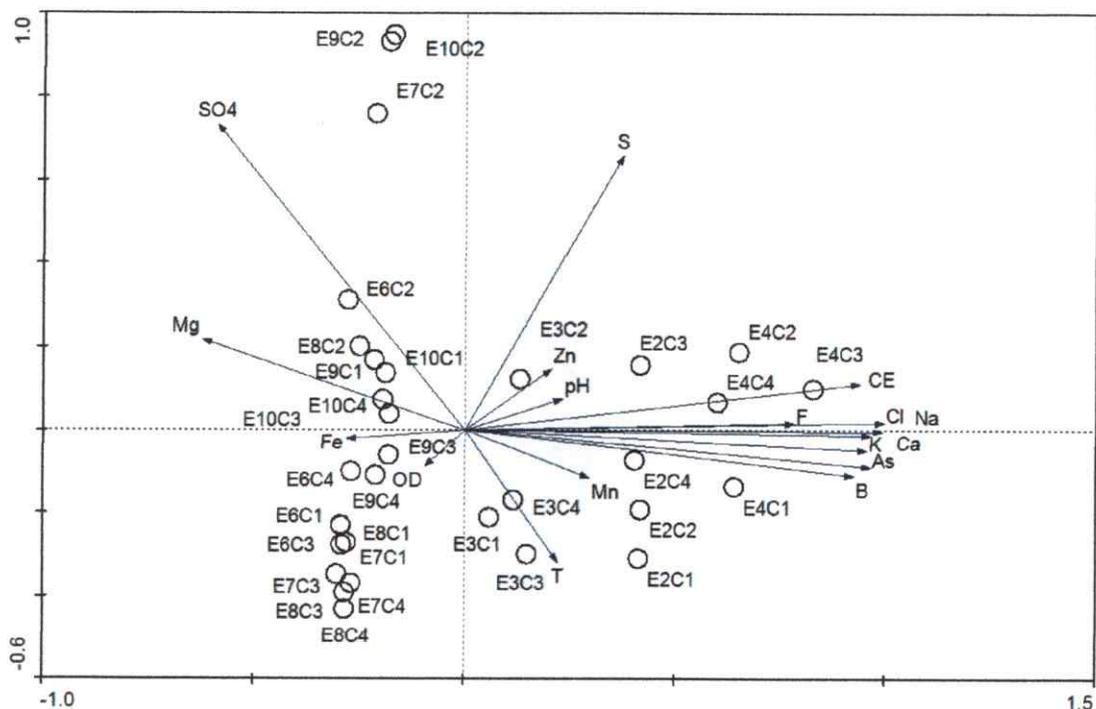


Figura 12. Resultados Análisis de Componentes Principales para variables ambientales

4.2 Diatomeas

4.2.1 Comunidad de Diatomeas

Los ejemplares colectados fueron agrupados en 105 especies durante las cuatro (4) campañas de monitoreo.

El número total de individuos y la riqueza específica variaron entre las distintas estaciones de monitoreo. El valor máximo de abundancia se encontró durante la campaña 1 (otoño) con 18828,30 [cel/mm³], mientras que el mayor número de especies se detectó en la campaña 2 (invierno) con 79 especies.

En todas las campañas se detectaron pocas especies dominantes (Ver Tabla 3).

En la campaña 1 (otoño) las especies dominantes fueron *Nitzschia inconspicua* y *Planothidium lanceolatum*, las cuales alcanzaron su máxima abundancia en E9 (Vega Putana aguas arriba) (Ver Figura 13).

En la campaña 2 (invierno), las especies dominantes fueron *Achnanthes exigua*, *Eolimna minima* y *Nitzschia palea*, las cuales alcanzaron su máxima abundancia en E3 (Afluente sur río Salado), E6 (Área de Plataforma) y E3, respectivamente (Ver Figura 14).

En la campaña 3 (primavera), las especies dominantes fueron *Nitzschia inconspicua* y *Staurosira pinnata*. Las estaciones que concentraron la mayor abundancia de las especies mencionadas fueron E3 y E2, respectivamente (Ver Figura 15).

En la campaña 4 (verano), la especie dominante fue *Nitzschia palea* con su mayor abundancia en E6 (Figura 16).

Tabla 3. Abundancia de especies dominantes

Campaña	Especies Dominantes	Abundancia	Estación de Máxima Abundancia
C1 Otoño	<i>Nitzschia inconspicua</i>	2177,3	E9
	<i>Planothidium lanceolatum</i>	2497,5	E9
C2 Invierno	<i>Achnanthes exigua</i>	819,5	E3
	<i>Eolimna minima</i>	345,8	E6
	<i>Nitzschia palea</i>	287,6	E3
C3 Primavera	<i>Nitzschia inconspicua</i>	379	E3
	<i>Staurosira pinnata</i>	214,2	E2
C4 Verano	<i>Nitzschia palea</i>	1572,7	E6

Los índices mostraron un patrón similar a lo largo de las campañas de monitoreo. El índice de Shannon-Wiener obtuvo valores cercanos a 3 (Ver Tabla 4). Los menores valores para el índice de Evenness se registraron en E3 y E8 durante la campaña 2 (0,49 y 0,46, respectivamente). En el resto de las estaciones de muestro y campañas de monitoreo se registraron valores entre 0,6 y 0,9, lo cual refleja una estructura comunitaria más uniforme.

Tabla 4. Índice de Shannon-Wiener

Estación	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4
E2	3,46	3,38	3,06	3,64
E3	3,10	1,48	2,34	2,17
E4	3,74	3,63	3,23	2,95
E6	2,01	2,49	3,61	2,51
E7	3,56	3,62	3,27	3,67
E8	2,57	1,60	3,29	2,77
E9	3,76	3,35	2,79	3,97
E10	2,99	3,46	3,67	3,37

Tabla 5. Índice de Evenness

Estación	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4
E2	0,75	0,79	0,72	0,76
E3	0,76	0,49	0,74	0,61
E4	0,87	0,87	0,76	0,89
E6	0,67	0,69	0,88	0,73
E7	0,81	0,91	0,91	0,92
E8	0,69	0,46	0,81	0,69
E9	0,83	0,90	0,68	0,82
E10	0,81	0,86	0,92	0,79

4.2.2 Análisis Estadísticos Comunidad de Diatomeas

Análisis de Componentes Principales (PCA)

Los dos primeros ejes del PCA explican el 52% del total de la varianza de las especies. Se observó que las estaciones E9 y E6, de las campañas de otoño y verano respectivamente (E9C1 y E6C4) reflejan la mayor parte de la varianza (Figura 17).

Con el objetivo observar de manera más clara patrones espaciales y temporales en la estructura comunitaria, se realizó un segundo PCA, donde se excluyó las estaciones E9 campaña 1 y E6 campaña 4. Los dos primeros ejes del PCA explicaron sólo el 38,9% del total de la varianza de las especies, lo cual no permite establecer diferencias espaciales ni temporales. Las estaciones E2 (Campaña 1), E4 (Campañas 1 y 2) se correlacionan con el primer eje; mientras que la estación E9 (Campaña 4) (Ver Tabla 1) se correlaciona con el eje 2 (Ver Figura 18).

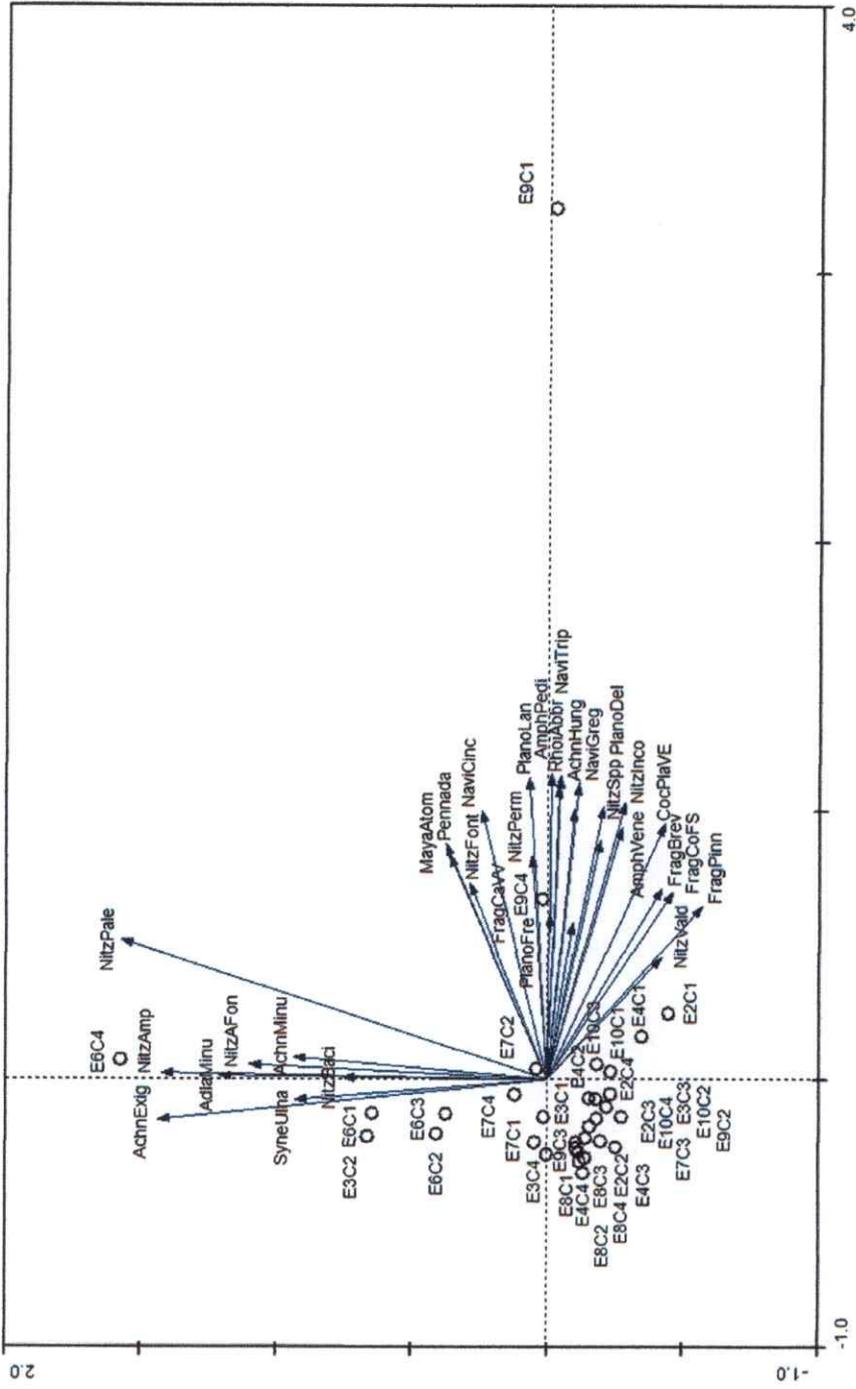


Figura 17. Resultados Análisis de Componentes Principales para especies de diatomeas

Agrupamiento de Estaciones de Monitoreo

La Figura 19 muestra los resultados del análisis de agrupamiento utilizando el índice de similitud de Bray-Curtis representado en el MDS. No se observan agrupamientos con similitud mayor o igual a 80%. Por otro lado, se observan grupos con similitud mayor al 60, 40 y 20% (Ver Figura 19), tal como se describe a continuación.

En la Figura 19 no se aprecia una distribución particular de las estaciones de monitoreo respecto al factor temporal; en cambio, si se observa un orden en la distribución de las estaciones de monitoreo (factor espacial).

Existen dos grupos con porcentaje de similitud mayor a 60%. Uno de ellos es **E7C2** y **E7C3** (Campamento CORFO en invierno y primavera, respectivamente). El otro es **E10C1** y **E10C2** (Vega Putana aguas abajo en otoño e invierno, respectivamente).

Respecto a la similitud de 40%, se observa que los grupos están conformados por la misma estación en diferentes campañas o en algunos casos, de dos a tres estaciones de monitoreo cercanas en el espacio en diferentes campañas.

Acerca de los agrupamientos con el 20% de similitud, se aprecian tres (3) grupos, donde cada uno está conformado por estaciones aledañas en el área de estudio.

Destaca la estación E3 (Afluente sur río Salado), la cual no posee similitud de más del 40% con el resto de las campañas de la misma estación. Algo similar ocurre con E8 (Vega Juana –Tocorpuri) en la campaña de verano la cual no posee 40% de similitud con el resto de las campañas, las cuales si poseen el 40% entre sí para la misma estación de muestreo.

Análisis de Similitud (ANOSIM) Dos Vías

El análisis de similitud (ANOSIM) mostró que no existen diferencias significativas en la diversidad y abundancia de especies de diatomeas entre las campañas de monitoreo (factor tiempo, $R=0,149$; $P=0,056$). En cambio, sí existen diferencias significativas entre las estaciones de monitoreo (factor espacio, $R=0,481$; $P<0,01$).

4.3 Relación entre Comunidad de Diatomeas y Variables Ambientales

Los dos primeros ejes del CCA explican el 17% del total de la varianza de las especies, mientras que explican el 64,1% del total de la varianza de la relación especies-variables físicas y químicas.

Las variables seleccionadas mediante el test de significancia de Monte Carlo (1.000 permutaciones, $p<0,05$) fueron potasio, temperatura, magnesio e hierro.

Respecto a la relación especies-variables físicas y químicas, el primer eje explica el 37,1% y se asocia al potasio ($r^2=0,95$). El segundo eje explica el 27% y está asociado a la temperatura T ($r^2=0,91$) y al hierro ($r^2=0,70$) (Ver Tabla 6, Figura 20).

En la Figura 20 se observan las relaciones entre las especies de diatomeas y las variables físicas y químicas. En el diagrama es posible diferenciar:

Las especies *Navicula cryptotenella*, *Denticula thermalis*, *Denticula subtilis*, *Cymbellonitzschia sp.*, *Amphora coffeaeformis*, *Mastogloia elliptica*, *Navicula salinicola*, *Navicula parinacota*, *Fragilaria brevistriata*, *Fragilaria pinnata*, *Fragilaria construens f subsalina*, *Amphora atacamae*, *Brachysira aponina*, *Navicula sp1*, *Nitzschia latens*, *Navicula veneta*, *Planothidium sp1.*, *Amphora acutiuscula*, *Amphora sp1*, *Denticula valida*, *Denticula elegans* y *Nitzschia pusilla* ($r^2>0,8$ con el eje 1) se relacionan con el potasio.

Un grupo de especies se relacionaron negativamente con eje 1, las cuales fueron: *Eolimna minima* ($r^2=-0,84$), *Fragilaria capucina* ($r^2=-0,88$), *Planothidium frequentissimum* ($r^2=-0,87$), *Planothidium lanceolatum* ($r^2=-0,67$) y *Synedra ulna* ($r^2=-0,91$) lo cual indica que estas especies se relacionan negativamente con el potasio.

Un segundo grupo está conformado por las especies *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia palea* (r^2 , *Nitzschia affonticola* y *Achnantheidium minutissimum*, las cuales se correlacionan con el hierro (Fe).

Achnanthes exigua y *Nitzschia bacillum* se relacionan con la temperatura.

Las especies *Nitzschia perminuta*, *Fragilaria capucina v vaucheriae*, *Planothidium lanceolatum*, *Rhoicosphenia abbreviata*, *Amphora pediculus*, *Planothidium delicatulum*, *Navicula gregaria*, *Navicula tripunctata*, *Cocconeis placentula v euglypta* y *Amphora veneta* se relacionan con el Magnesio.

Tabla 6. Asociación de variables con ejes de ordenación CCA (r^2)

Variable	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4
T	0,19	0,91	0,29	-0,22
K	0,98	-0,02	-0,16	0,04
Mg	-0,50	-0,51	0,70	-0,02
Fe	0,19	0,70	0,11	0,68

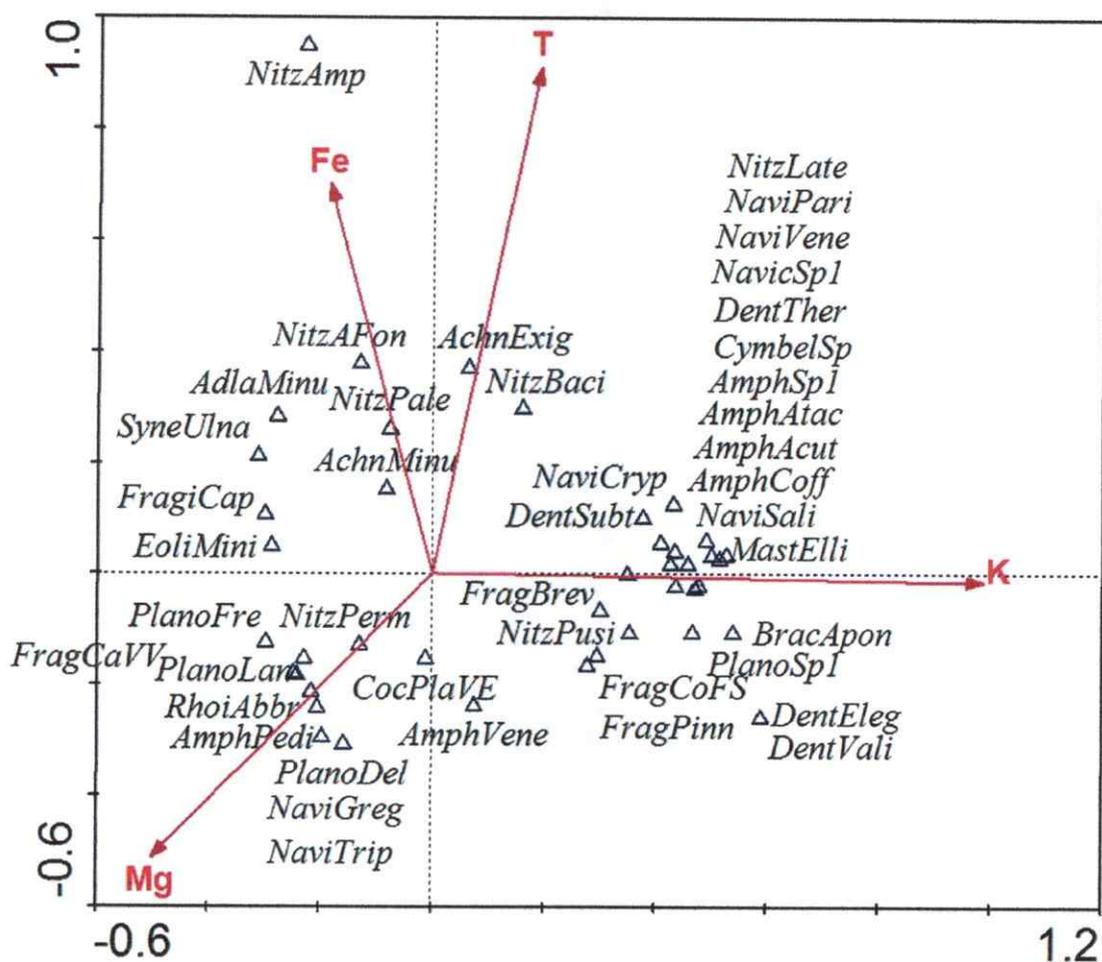


Figura 20. Resultados del Análisis de Correspondencia Canónica relación especies variables ambientales

5 Discusión

5.1 Características del Área de Estudio

Considerando las concentraciones de aniones y cationes de las distintas estaciones de muestreo, fue posible determinar la composición salina de estos sistemas, la cual es alta debido fundamentalmente a la composición de los suelos (Risacher *et al.*, 2003). Así, se pudo observar con los diagramas Maucha que algunas estaciones de monitoreo pertenecen a sistemas con ciertas características como se señala a continuación.

Las estaciones de muestreo E2, E3 y E4 tienen una alta concentración de sodio y cloruros por lo que poseen características de sistemas clorurados sódicos. Por otro lado, las estaciones de muestreo E6 y E7 dan cuenta de un sistema sulfatado cálcico y E9 y E10 pertenecen a un sistema sulfatado sódico (Ver Tabla 1, Figura 3 a Figura 11). En cuanto a E8, se observa una diferencia entre las distintas campañas de monitoreo respecto al anión dominante (Ver Figura 8 y Figura 9) (Wetzel, 2001).

En relación a lo anterior, se observa en el PCA realizado para las variables ambientales que el primer eje explica la mayor parte de la varianza acumulada (95,7%) lo cual refleja principalmente un gradiente de salinidad a través del eje 1 y estaciones de monitoreo que se correlacionan con él, lo cual es consistente con lo representado en los datos y los diagramas Maucha acerca de los sistemas clorurados sódicos que representan las estaciones E2, E3 y E4 (Ver Tabla 1). El PCA para variables físicas y químicas indicó una correlación del eje 1 con las variables CE, Cl, Na, K, F, B y As (Ver Figura 12). Según diversos monitoreos en la cuenca del río Loa y sub-cuenca del río Salado (Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004), se observa una tendencia similar de los valores medios de conductividad eléctrica a través de todas las estaciones del año (verano, otoño, primavera y verano) en el río Loa y en el río Salado. Lo mismo se observa con el cloruro, sulfato, boro y arsénico (Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004). Las estaciones E2, E3, E4, E6 y E7 (Ver Tabla 1) pertenecen a la sub-cuenca del río Salado, de la cuenca del río Loa (Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004) mientras que las estaciones E8, E9 y E10 (Ver Tabla 1) son parte de la cuenca del Salar de Atacama, lo cual explicaría las diferencias en concentraciones de cationes y aniones entre estos dos grupos de estaciones de monitoreo.

La alta salinidad, representada por la alta conductividad eléctrica y gran concentración de iones debe su origen a las características hidrológicas con baja disponibilidad de agua conjuntamente con la alta radiación presente en la zona de altiplano, puna y montaña, lo cual conlleva a una tasa de evaporación elevada, esto aunado además a las características de los suelos (Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004). En el caso de las aguas salobres del río Salado (estaciones E2, E3 y E4), específicamente, su origen se debe a recargas de aguas

subterráneas geotermales y la litología constituida por rocas volcánicas fracturadas que aportan Na/HCO_3^- y Na-Ca-SO_4^{2-} (Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004).

La gran concentración de arsénico (As) y boro (B) registrada en E2, E3 y E4 (Ver Figura 12) es concordante con la descripción de los recursos hídricos de la Región de Antofagasta, los cuales son en su mayoría no potable debido al alto contenido de diversos componentes tóxicos como los mencionados, los cuales se encuentran ligados fundamentalmente a rocas volcánicas, a evaporitas provenientes de salares en la parte alta de la cuenca con alto contenido de bórax y ácido bórico y a recargas subterráneas con aporte de lixiviados del subsuelo donde emergen como vertientes en varios puntos (Romero, Rivera, & Fernandez, 1997; Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 2004). Los solutos provienen mayoritariamente de alteración de rocas volcánicas por reacción con agua a alta y baja temperatura, alteración meteórica e hidrotermal respectivamente. Ello es válido para componentes mayores (sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros y sulfatos) como menores (litio, rubidio, flúor y boro) (Alonso, 1997).

5.2 Comunidad de Diatomeas

Como se observa en la Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16, la dominancia en todas las campañas de monitoreo está dada por un conjunto reducido de especies probablemente tolerantes a las salinidades altas (Risarcher, 2003). Respecto a la salinidad, las especies *Nitzschia inconspicua* y *Eolimna minima* son tolerantes a aguas salobres a dulces. Por otro lado, las especies *Achnanthes exigua* y *Nitzschia palea* son indiferentes a condiciones de disminución de salinidad (Wolf, 1982). *Nitzschia inconspicua*, *Achnanthes exigua* y *Eolimna minima* son especies alcalófilas, mientras que *Nitzschia palea* es indiferente al pH.

Lo anterior es consistente con algunos resultados del PCA para especies que se muestra en la Figura 17, donde se observa que la especie *Nitzschia inconspicua* se relaciona fuertemente con la estación E9 (Vega Putana aguas arriba) en la campaña 1 (otoño), al igual que *Planothidium lanceolatum*. Sin embargo, la estación E9 no posee condiciones especiales respecto a las variables físicas y químicas en comparación al

resto de las estaciones de muestreo, tal como se observa en las Tabla 2, Figura 10 y Figura 12.

Por otro lado, la estación E6 (Área de Plataforma) de la campaña 4 explica gran parte de la varianza en el PCA para especies (Figura 17) y se relaciona con dos de las especies más abundantes en las campañas de muestreo, específicamente en la segunda y cuarta, las cuales son *Achnanthes exigua* y *Nitzschia palea*. Destaca la estación E6 durante la campaña de verano ya que posee el valor más bajo de pH (3,25) en comparación al resto de las estaciones de muestreo, así como la temperatura más alta. Como se mencionó anteriormente, la especie *Achnanthes exigua* habita generalmente en ambientes con pH mayor a 7 (alcalófila), por lo que los presentes resultados podrían estar indicando una situación particular o bien puede estar ampliando el rango de tolerancia de la especie.

Se observó que en el PCA realizado para la comunidad de diatomeas, las estaciones E9 y E6, de las campañas de otoño y verano respectivamente (E9C1 y E6C4), explican la mayor parte de la varianza respecto al resto de las estaciones de muestreo (Figura 17).

Es probable que gran parte de la varianza sea reflejada por E6C4 y E9C1, por lo menos espacialmente, por pertenecer a dos cuencas distintas (Ver sección 5.1 Características del Área de Estudio), donde como se señaló anteriormente hay una diferencia en concentración de cationes y aniones.

Por otro lado, el pH en E6 en verano fue 3,25. En el resto de las campañas el pH de dicha estación también fue de aproximadamente 3, a excepción de la campaña de otoño donde tuvo un valor de 7,57. E9 registró pH=7,75 en otoño. Todas las especies que se relacionan con E6 (aguas extremadamente ácidas) en el PCA 1 (Figura 17) se describen en su mayoría para aguas de preferencia alcalinas, lo que indicaría que estas especies poseen un rango más amplio respecto al pH o bien falta de información en las bases de datos diatomológicas para sistemas de altura.

La temperatura registrada en E6 durante la campaña de verano fue la más alta de la campaña (37,5°C), mientras que la temperatura en E9 en la campaña de otoño fue 9,6°C, una de las más bajas de la campaña (Ver Tabla 2), lo cual es consistente con

los resultados del primer PCA (Figura 17), donde se muestra que las estaciones E9 y E6, de las campañas de otoño y verano respectivamente (E9C1 y E6C4) explican fundamentalmente la varianza respecto al resto de las estaciones de muestreo en estructura y abundancia de la comunidad de diatomeas.

El PCA realizado para variables ambientales muestra que la temperatura (T) se relaciona con la estación E3 (Afluente sur río Salado) durante las campañas de otoño, primavera y verano (Ver Figura 12). No obstante, la temperatura fue alta en E3 en todas las campañas, incluyendo verano; además, E6 también registró temperatura cercana a los 30° C en todas las campañas (Ver Tabla 2).

Variaciones espaciales y temporales en la temperatura en hábitats acuáticos influyen fuertemente en las respuestas biológicas del perifiton (DeNicola, 1996), por lo que la variabilidad en la comunidad de diatomeas entre estaciones de monitoreo, observada en los Análisis de Componentes Principales y con el MDS y ANOSIM, puede estar fuertemente influenciada por la variación de T en las distintas estaciones de monitoreo.

Acerca de la diversidad específica y la abundancia de diatomeas, en E9 durante la campaña 1, éstas alcanzaron valores de 23 y 12.039 cel/mm³, respectivamente. En E6 durante el monitoreo realizado en verano (Campaña 4), se registraron 11 especies y la abundancia total fue 3.510 cel/mm³.

Una vez realizado nuevamente el PCA pero excluyendo E9C1 y E6C4, se observó que la varianza acumulada de los dos primeros ejes se redujo al 38,9%, lo que sugiere que la varianza del primer PCA estuvo concentrada fundamentalmente por las estaciones E9C1 y E6C4.

Sin perjuicio de los PCA anteriores, se realizaron análisis no paramétricos en los cuales como muestra la Figura 19, existe un ordenamiento de las estaciones de monitoreo, donde se forman agrupamientos con por lo menos el 20, 40 y 60% de similitud entre las mismas estaciones en diferentes campañas de monitoreo o entre estaciones cercanas en el espacio; en cambio, no se observó un ordenamiento particular de las distintas campañas de monitoreo (respecto al factor tiempo). El análisis de agrupamiento y MDS reflejan un patrón en la comunidad de diatomeas en relación a las estaciones de muestreo y campañas de monitoreo (espacio y tiempo)

que no es posible apreciar de forma clara con el PCA; no así como sucede con el PCA para variables físicas y químicas.

El ANOSIM demostró que existen diferencias significativas en la comunidad de diatomeas entre estaciones de muestreo ($R = 0,481$; $P < 0,01$) pero no así entre las campañas de monitoreo donde se aprecia que la diferencia no es significativa ($R = 0,149$; $P = 0,056$).

5.3 Relación entre Comunidad de Diatomeas y Variables Ambientales

La varianza acumulada explicada por los dos primeros ejes en el CCA fue de un 64%, lo que indicaría que existen otras variables ambientales no incluidas en el estudio que pueden estar influyendo en la comunidad de diatomeas.

El CCA muestra una correlación del eje 1 con K, luego de haber realizado el test de Monte Carlo con 1000 permutaciones (ver Figura 20). Los resultados del CCA son compatibles con el PCA para variables ambientales (ver Figura 12), donde se puede apreciar una reducción de la cantidad de variables que se correlacionan con el eje 1 y por lo tanto indican que Cl, Na, K, CE, Ca, As y B se relacionan entre sí.

El primer eje en el CCA también se correlacionó con especies características de sistemas de aguas salobres a hypersalinos (Ver Figura 20), las cuales son *N.latens*, *N.parinacota*, *Denticula thermalis*, *Amphora atacamae*, *Amphora acutiuscula*, *Amphora coffeaeformis*, *Mastogloia elliptica* y *Denticula elegans* (Oren, 2002; Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key; Díaz & Maidana, 2005; European Diatom Database).

Las especies *Navicula veneta* y *Cymbellonitzschia sp.* se han registrado para aguas salobres, salinas y además dulces (Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key; Díaz & Maidana, 2005) las cuales también se correlacionan con el Eje 1 y a la vez con el potasio.

Navicula cryptotenella, *Nitzschia pusilla*, *Denticula subtilis*, *Fragilaria brevistriata*, *Fragilaria pinnata*, *Fragilaria construens f subsalina* que también se correlacionaron con el eje 1 y con el potasio se han descrito para sistemas de agua dulce y como especies indiferentes a la disminución de salinidad.

Se ha mencionado que la riqueza específica y la diversidad es menor en aguas salinas que en aguas dulces, donde se ha registrado que el índice de Shannon es generalmente mayor en aguas de baja salinidad (3,7) que en aguas con alta salinidad (0,8) (Servant-Vildary & Roux, 1990). No obstante, en el presente estudio se observó que aun en muestras con alta salinidad (estaciones E2 y E4) el índice de Shannon alcanzó valores cercano a 3 en todas las campañas, así como también en las muestras obtenidas desde ambientes con menor salinidad. Lo anterior indicaría que la proporcionalidad específica sería significativa en los ambientes salinos.

Cabe mencionar que dado que no existe una estandarización de índices para ambientes con las particulares características de la puna chilena, no se puede concluir acerca de si la diversidad específica es alta o baja exclusivamente por el índice de Shannon; así como tampoco se puede concluir sobre la uniformidad de la comunidad con el índice de Evenness.

La temperatura T se correlacionó con las especies *Achnanthes exigua* y *Nitzschia bacillum* (Ver Figura 20). *Achnanthes exigua* habita en aguas templadas según la literatura (Wolf, 1982).

El hierro (Fe) se correlacionó con las especies *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia aff fonticola*, *Nitzschia palea* y *Achnanthidium minutissimum* (Ver Figura 20), las cuales han sido registradas en sistemas con concentraciones de Fe de 20 µg/L, 80,0 µg/L (Sample information Diatom Sample Id: KOL015), 23,33 µg/L (Sample information Diatom Sample Id: SWAP005) y 203,5 µg/L (Sample information Diatom Sample Id: SWAP112), respectivamente.

Un cuarto grupo de especies de diatomeas que se relaciona con el magnesio (Mg) (Ver Figura 20) son *Nitzschia perminuta*, *Fragilaria capucina v vaucheriae*, *Planothidium lanceolatum*, *Rhoicosphenia abbreviata*, *Amphora pediculus*, *Planothidium delicatum*, *Navicula gregaria*, *Navicula tripunctata*, *Cocconeis placentula v euglypta* y *Amphora veneta*; las cuales han sido registradas en muestras con concentración de Mg que van desde los 0,13 a 600 mg/L (Sample information Diatom Sample Id: CAS009P, Sample information Diatom Sample Id: ALPI015, Sample information Diatom Sample Id: CAS021B), Sample information Diatom Sample Id: AFE117, Sample information Diatom Sample Id: SP026, Sample information Diatom Sample Id: SP008, Sample

information Diatom Sample Id: CW003, (Sample information Diatom Sample Id: AFE004, Sample information Diatom Sample Id: SWAP079, Sample information Diatom Sample Id: SCM040).

Un quinto grupo de especies de diatomeas no se correlacionó con ninguna de las variables ambientales estudiadas lo cual indica que otras variables ambientales no incorporadas en este estudio podrían estar influyendo en la estructura y abundancia de la comunidad de diatomeas.

Las variables ambientales señaladas influyeron en parte en la estructura de la comunidad de diatomeas. Cabe señalar sin embargo, que los ensambles de microalgas poseen tasas de renovación mayores a un año (Márquez-García *et al.*, 2009) y que la puna posee características climáticas e hídricas muy variables por lo que es necesario realizar monitoreos a largo plazo para confirmar a las especies bioindicadoras.

6 Conclusiones

La estructura comunitaria de especies de diatomeas de sistemas de altura presenta una riqueza específica alta. Además, esta estructura se asocia a las variables físicas y químicas del agua y con ello es posible detectar cambios ambientales en el agua. Por lo anterior se permite aceptar la hipótesis.

No obstante lo anterior, no fue posible establecer diferencias temporales en la estructura de la comunidad de diatomeas ni en los valores de las variables físicas y químicas a lo largo del monitoreo (cuatro campañas).

En cambio, sí se reflejaron cambios espaciales a través de las estaciones de muestreo, tanto en la estructura de la comunidad de diatomeas como en los valores de las variables físicas y químicas.

En general, el contenido de cationes y aniones del área de estudio es alto, en especial en las estaciones de monitoreo que forman parte de la sub-cuenca del río Salado.

Desde el punto de vista de los cationes y aniones, se observaron tres tipos de sistemas: clorurados sódicos, sulfatados cálcicos y sulfatados sódicos.

La salinidad detectada en el sistema refleja la calidad del suelo de la zona y su hidrología.

Con lo antecedentes expuestos anteriormente, es posible proponer las siguientes especies de diatomeas como bioindicadoras para sistemas en altura con alto contenido salino:

- *Nitzschia latens*, *Navicula parinacota*, *Denticula thermalis*, *Amphora atacamae*, *Amphora acutiuscula*, *Amphora coffeaeformis*, *Mastogloia elliptica*, *Denticula elegans*, *Navicula veneta*, *Cymbellonitzschia sp.*, *Navicula cryptotenella*, *Nitzschia pusilla*, *Denticula subtilis*, *Fragilaria brevistriata*, *Fragilaria pinnata* y *Fragilaria construens f subsalina*.

Por otro lado, se proponen las siguientes especies como bioindicadoras de sistemas de altura con bajo contenido de sales:

- *Eolimna minima*, *Fragilaria capucina*, *Planothidium frequentissimum*, *Planothidium lanceolatum* y *Synedra ulna*.

7 Bibliografía

Aceituno, P. (1997). Aspectos Generales del Clima en el Altiplano Sudamericano. *Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos* , 63-69.

AlgaTerra Information System. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de Ecology: Data on Micro Algae *Eolimna minima* (Grunow) Lange-Bert.: <http://www.algatterra.org/ATDB/Ecology/DiaEcoResult.cfm?19808324>

Alonso, H. (1997). Geoquímica de Aguas en el Altiplano. Una aproximación. *Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos* , 105-107.

Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B. D., & Stribling, J. B. (1999). *Rapid Bioassessment Protocols For Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates, and Fish* (Second Edition ed.). Washington, D.C.: EPA 841-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency; Office of Water.

Bray, R. J., & Curtis, J. I. (1957). An ordination of the upland forest community of Southern Wisconsin. *Ecol. Monogr.* , 27: 325-349.

Centro de Ecología Aplicada. (1999-2002). *Informe Monitoreo Ambiental del Medio Biótico y Físico-químico en el Salar de Atacama. Minera Escondida Ltda.*

Centro de Ecología Aplicada. (2002). *Informe Monitoreo Ambiental del Medio Biótico y Físico-químico en el Salar de Punta Negra. Minera Escondida Ltda.*

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de *Amphora veneta* Kunzing(1844): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13050400.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de *Cocconeis placentula* var. *euglypta* (Ehrenb.) Grunow(1884): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13160102.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de *Nitzschia perminuta* (Grunow in Cleve & Grunow) M. Peragallo(1903): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13541040.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de *Navicula tripunctata* (O.F. Müller) Bory(1822): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13522730.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 27 de Julio de 2010, de *Navicula gregaria* Donkin(1861): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13521070.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de *Planothidium delicatulum* (Kütz.) Round et L.Bukhtiyarova(1996): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13610020.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de *Amphora pediculus* (Kützing) Grunow(1880): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13050290.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de *Rhoicosphenia abbreviata* (Agardh) Lange-Bertalot(1980): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13680010.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de *Planothidium frequentissimum* (Lange-Bert.) Round et L. Bukhtiyarova(1996): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13610070.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 27 de Julio de 2010, de *Nitzschia amphibia* Grunow(1862): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13540090.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 27 de Julio de 2010, de *Nitzschia pusilla* Grunow(1862): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13541130.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 27 de Julio de 2010, de *Mastogloia elliptica* (Agardh) Cleve in Schmidt et al.(1893): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13500050.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 26 de Julio de 2010, de *Navicula veneta* Kützing(1844): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13522850.html>

Common Freshwater Diatoms of Britain and Ireland A multiaccess key. (s.f.). Recuperado el 27 de Julio de 2010, de *Navicula cryptotenella* Lange-Bertalot(1985): <http://craticula.ncl.ac.uk/EADiatomKey/html/taxon13520580.html>

CONAMA. (s.f.). Anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales de la Cuenca del Río Loa. Santiago.

CONAMA. (2010). *Clasificación de los Cuerpos de Agua. Anexos.* Santiago.

CONAMA. (2005). Guía para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas. Chile.

Davis, W. S. (1995). Biological Assessment and Criteria: Building on the Past. En W. S. Davis, & T. P. Simon, *Biological Assessment and Criteria: Tool for Water Resource Planning and Decision Making* (págs. 15-29). Lewis Publishers.

DeNicola, D. M. (1996). Periphyton Responses to Temperature at Different Ecological Levels. En R. Jan Stevenson, M. L. Bothwell, & R. L. Lowe, *Algal Ecology: freshwater benthic ecosystems* (págs. 149-176). San Diego: Academic Press.

Díaz, C. P., & Maidana, N. I. (2005). *Diatomeas de los Salares Atacama y Punta Negra II Región - Chile*.

Díaz-Quirós, C., & Rivera-Rondón, C. A. (2004). Diatomeas de Pequeños Ríos Andinos y su Utilización como Indicadoras de Condiciones Ambientales. *Limnología* , 26(2): 381-394.

Diersing, N. (2009). *Water Quality: Frequently Asked Questions*. PDA. NOAA. Retrieved 2009-08-24.

European Diatom Database. (s.f.). Recuperado el 11 de Octubre de 2010, de Dataset Information Central European dataset: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/datasetdesc.jsp?DatasetId=CEuro>

European Diatom Database. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2010, de Dataset information Combined salinity dataset Navicula minuscula: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/datasetdesc.jsp?DatasetId=Salinity>

European Diatom Database. (s.f.). Recuperado el 27 de Julio de 2010, de Taxon Information Denticula elegans (agg.): <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/taxon.jsp?TaxonId=XXC981>

Johnson, D., Ambrose, S., Bassett, T., Bowen, M., Crummey, D., Isaacson, J., y otros. (1997). Meanings of environmental terms. *Journal of Environmental Quality* , 26, 581-589.

Karr, J. R. (1981). Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities. *Fisheries* , 6, 21-27.

Karr, J. R., & Dudley, D. R. (1981). Ecological Perspective on Water Quality Goals. *Environmental Management* , 5 (1), 55-68.

Kruskal, J. B., & Wish, M. (1978). *Multidimensional Scaling*. Beverly Hills, California: Sage Publications.

- Legendre, P., & Legendre, L. (1998). *Numerical Ecology*. Amsterdam: ELSEVIER.
- Leps, J., & Smilauer, P. (2003). *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lobo, E. A., Callegaro, V., Hermany, G., Bes, D., Wetzel, C. A., & Oliveira, M. A. (2004). Use of epilithic diatoms as bioindicators from lotic systems in southern Brazil, with special emphasis on eutrophication. *Acta Limnol. Bras.* , 16 (1), 25-40.
- Maidana, N. I., & Seeligmann, C. (2006). Diatomeas (Bacillariophyceae) de Ambientes Acuáticos de Altura de la Provincia de Catamarca, Argentina II. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* , 41 (1-2): 1-13.
- Márquez-García, M., Vila, I., Hinojosa, L. F., Méndez, M. A., Carvajal, J. L., & Sabando, M. C. (2009). Distribution and seasonal fluctuations in the aquatic biodiversity of the southern Altiplano. *Limnológica* , 39: 314-318.
- MINSEGPRES. (1994). Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Chile.
- Oren, A. (2002). *Cellular origin and life in extreme habitats. Halophilic Microorganisms and their Environments*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Parlamento Europeo y del Consejo. (23 de Octubre de 2000). *Europa: El Portal de la Unión Europea*. Recuperado el 2 de Agosto de 2011, de Protección y Gestión del Agua (Directiva Marco sobre el Agua): <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2000L0060:20090625:ES:PDF>
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones-Chile. Convenio de cooperación DGA-UCN-IRD. *Vol III, Estudio de Cuencas de la II Región* .
- 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.
- Rivera, P., Parra, O., González, M., Dellarossa, V., & Orellana, M. (1982). *Manual taxonómico del fitoplancton de aguas continentales* (Vol. IV. Bacillariophyceae). Editorial Universidad de Concepción.
- Romero, H., Rivera, A., & Fernandez, P. (1997). Climatología de la Puna de Atacama y su relación con los recursos hídricos. *Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos* , 87-93.
- Salazar, C. (1998). *Comunidades Periféricas: Ecología y Taxonomía*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2011, de Instituto de Zoología Tropical: <http://www.ciens.ucv.ve/instzool/BioGQCS.html>

Sample information Diatom Sample Id: AFE117. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=AFE117&DatasetId=Salinity>

Sample information Diatom Sample Id: BER0805. (s.f.). Recuperado el 17 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=BER0805&DatasetId=pH>

Sample information Diatom Sample Id: CAS018B. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=CAS018B&DatasetId=Caspian>

Sample information Diatom Sample Id: CAS021B. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=CAS021B&DatasetId=Salinity>

Sample information Diatom Sample Id: CW003. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=CW003&DatasetId=TP>

Sample information Diatom Sample Id: FIN035. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=FIN035&DatasetId=pH>

Sample information Diatom Sample Id: FR015. (s.f.). Recuperado el 17 de Octubre de 2010, de Sample information: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=FR015&DatasetId=TP>

Sample information Diatom Sample Id: SCM040. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SCM040&DatasetId=TP>

Sample information Diatom Sample Id: SP008. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SP008&DatasetId=Salinity>

Sample information Diatom Sample Id: SP026. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SP026&DatasetId=Spain>

Sample information Diatom Sample Id: SVAL005. (s.f.). Recuperado el 15 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SVAL005&DatasetId=pH>

Sample information Diatom Sample Id: SVAL023. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SVAL023&DatasetId=pH>

Sample information Diatom Sample Id: SWAP005. (s.f.). Recuperado el 17 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SWAP005&DatasetId=pH>

Sample information Diatom Sample Id: SWAP079. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SWAP079&DatasetId=pH>

Sample information Diatom Sample Id: SWAP112. (s.f.). Recuperado el 17 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SWAP112&DatasetId=SWAP>

Sample information Diatom Sample Id: SWAP150. (s.f.). Recuperado el 2010 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SWAP150&DatasetId=pH>

Sample information Diatom Sample Id: SWED1510. (s.f.). Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de European Diatom Database: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/sampleinfo.jsp?SampleId=SWED1510&DatasetId=pH>

Ter Braak, C. (1986). Canonical correspondence analysis :a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* , 67: 1167-1179.

ter Braak, C. J. (1994). Canonical community ordination. Part I: Basic theory and linear methods. *Ecoscience* , 1 (2): 127-140.

U.S Environmental Protection Agency. (31 de Enero de 2011). *About Biological Integrity and Indicators*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2011, de U.S Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/bioiweb1/html/about.html>

U.S. Environmental Protection Agency. (13 de Mayo de 2011). *Basics: What are Biocriteria and Bioassessment Data?* Recuperado el 9 de Septiembre de 2011, de U.S. Environmental Protection Agency: <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/aqlife/biocriteria/basics.cfm>

U.S. Environmental Protection Agency. (31 de Enero de 2011). *Indicator Species*. Recuperado el 20 de Agosto de 2011, de U.S. Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/bioiweb1/html/indicator.html>

U.S. Environmental Protection Agency. (12 de Septiembre de 2008). *Introduction to the Clean Water Act*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2011, de U.S. Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/owow/watershed/wacademy/acad2000/cwa/>

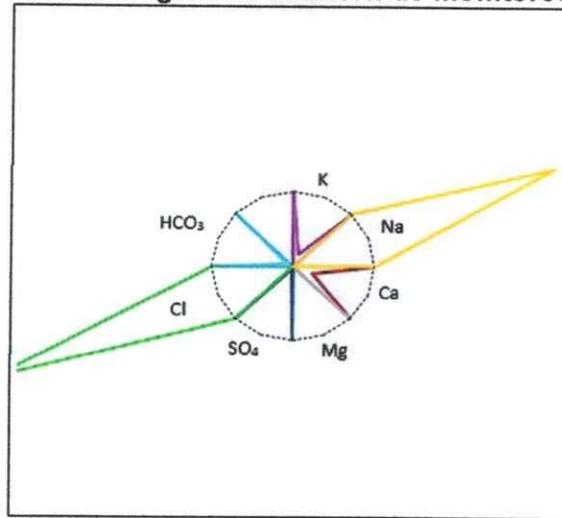
U.S. Environmental Protection Agency. (28 de Septiembre de 2010). *Chapter 2 - Legal Authority*. Recuperado el 9 de Septiembre de 2011, de U.S. Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/bioindicators/html/biol2.html>

Wetzel. (2001). *Limnology* (3rd ed.). Academic Press.

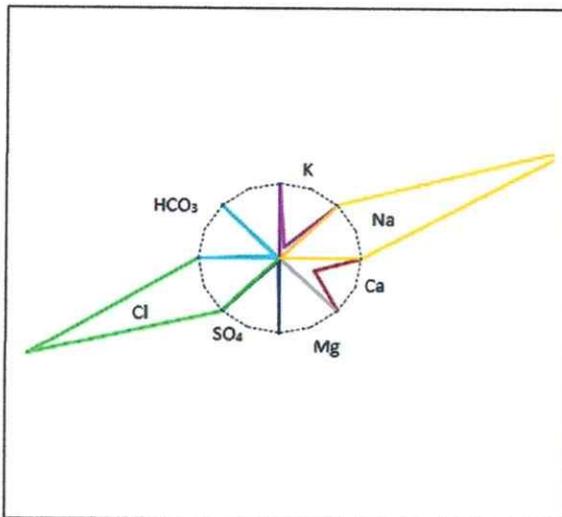
Wolf, H. (1982). Method of coding of ecological data from diatoms for computer utilization. *Rijks Geol. Dienst*.

ANEXO 1
DIAGRAMAS MAUCHA

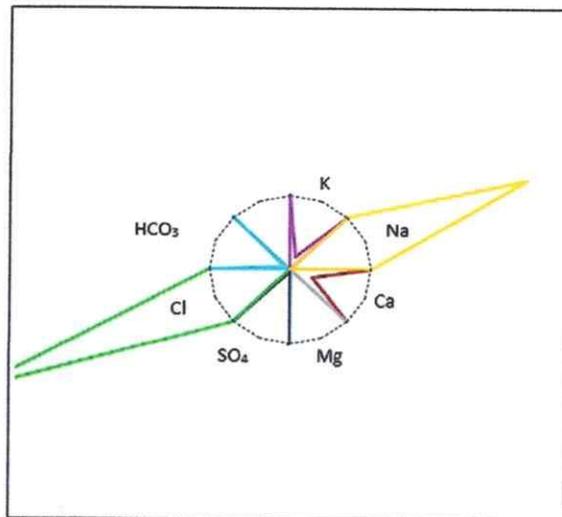
Cuadro 1. Diagramas estación de monitoreo E2



Campaña 2

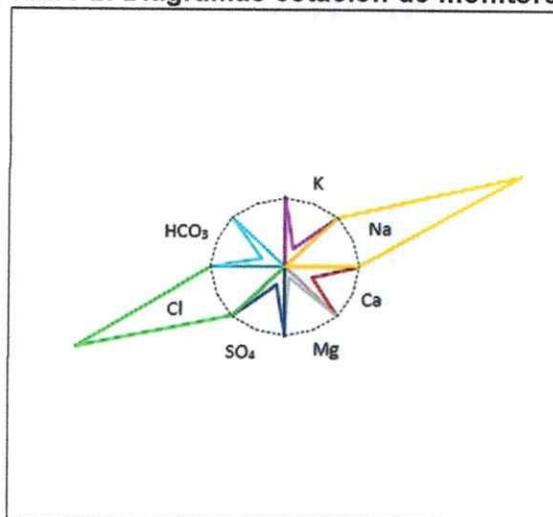


Campaña 3

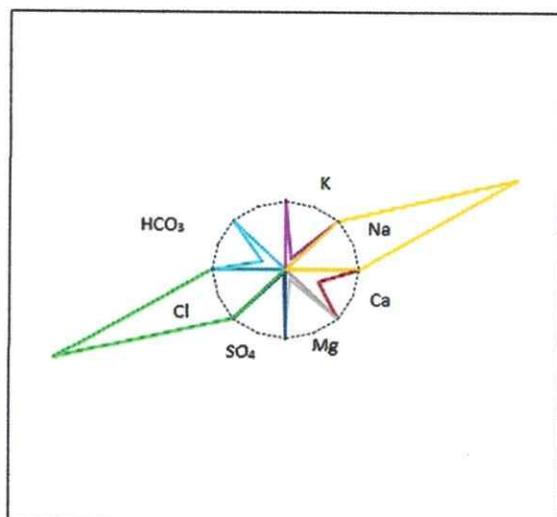


Campaña 4

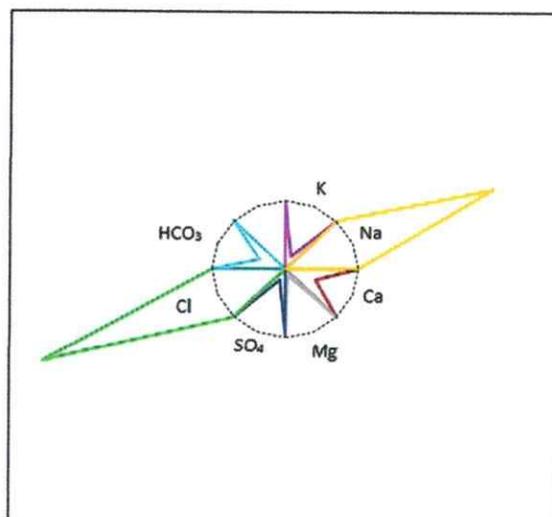
Cuadro 2. Diagramas estación de monitoreo E3



Campaña 2

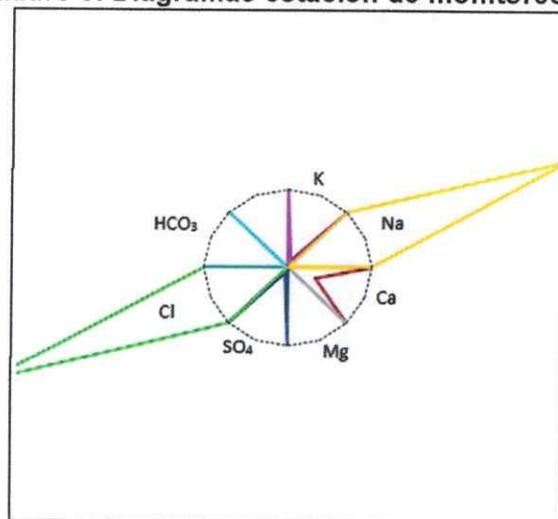


Campaña 3

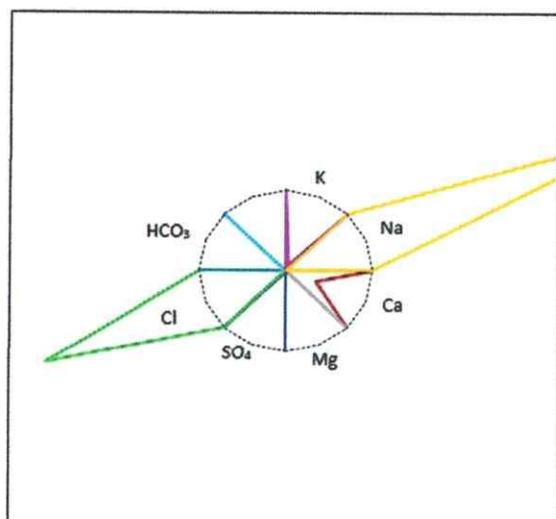


Campaña 4

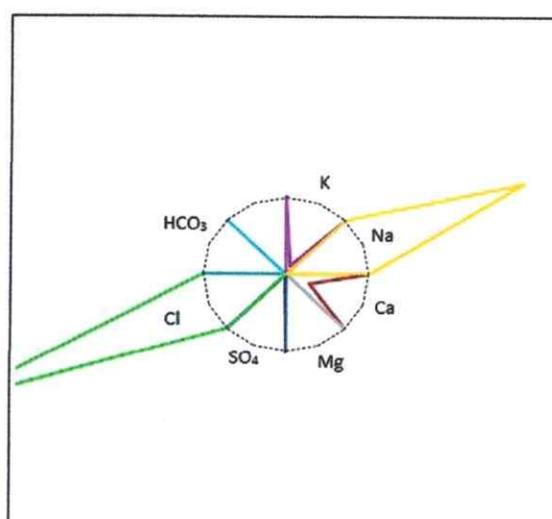
Cuadro 3. Diagramas estación de monitoreo E4



Campaña 2

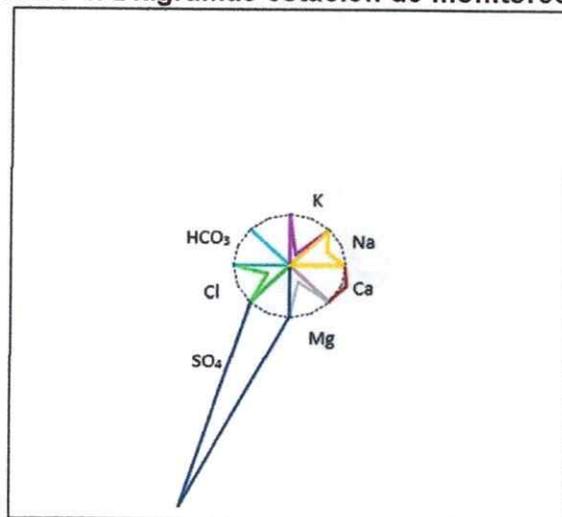


Campaña 3

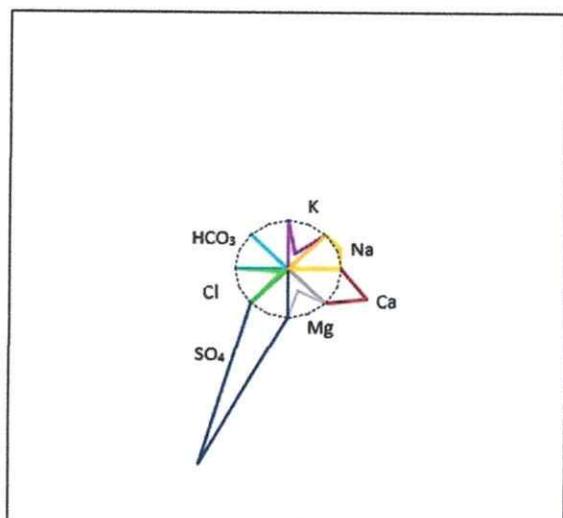


Campaña 4

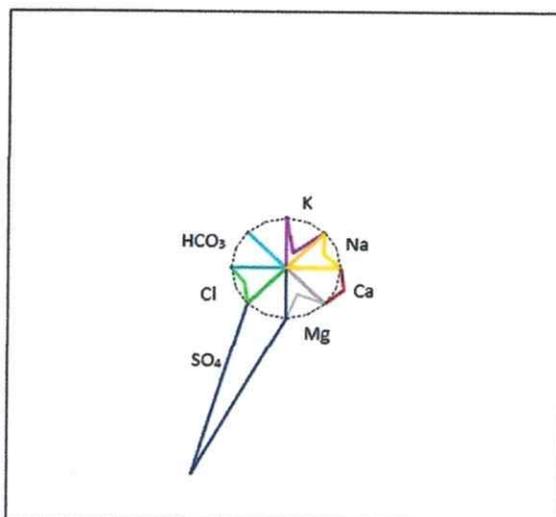
Cuadro 4. Diagramas estación de monitoreo E6



Campaña 2

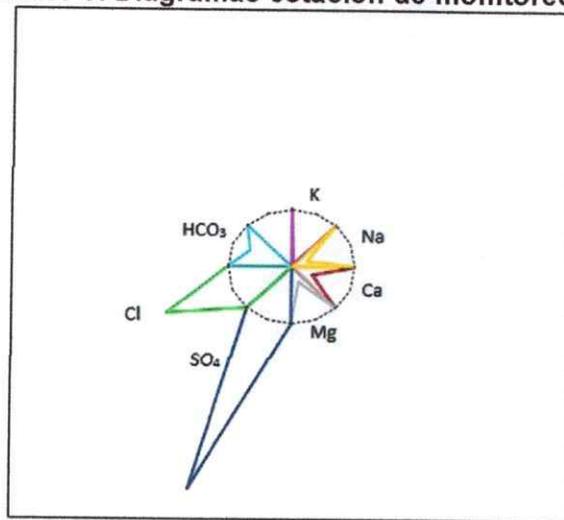


Campaña 3

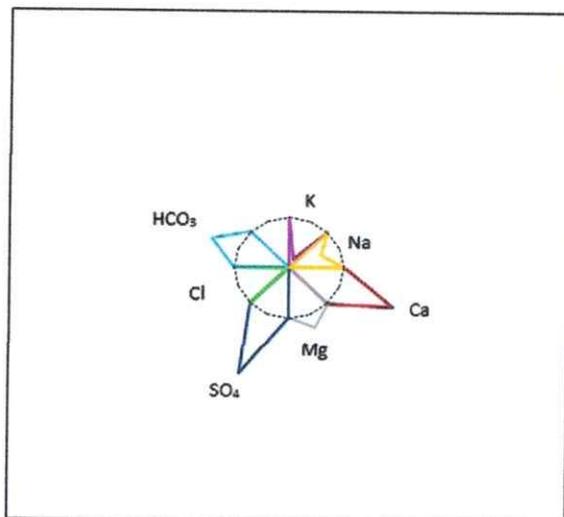


Campaña 4

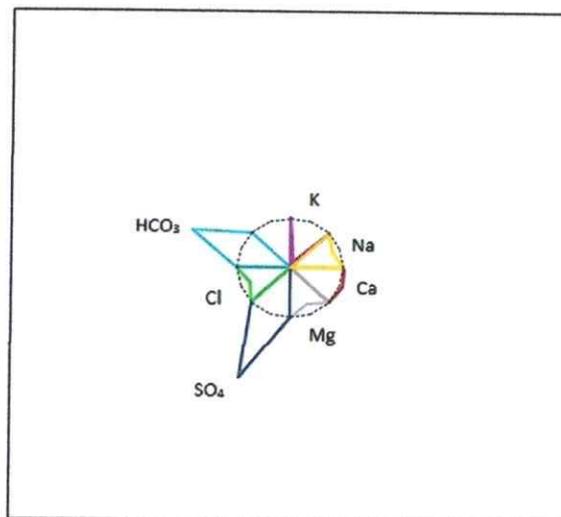
Cuadro 5. Diagramas estación de monitoreo E7



Campaña 2

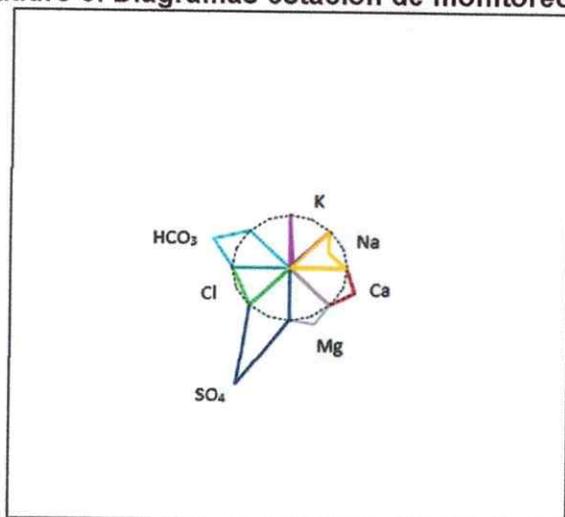


Campaña 3

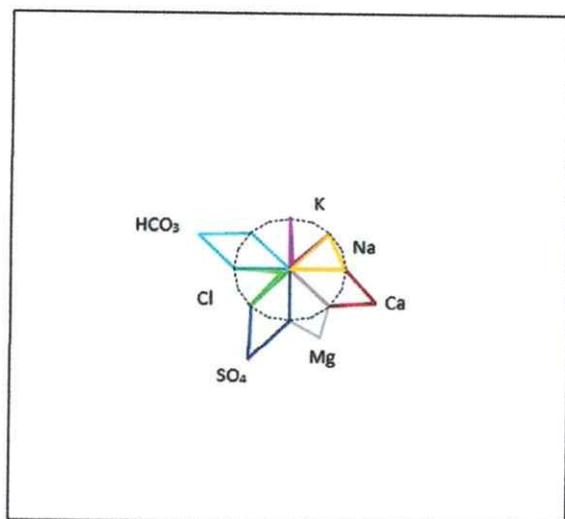


Campaña 4

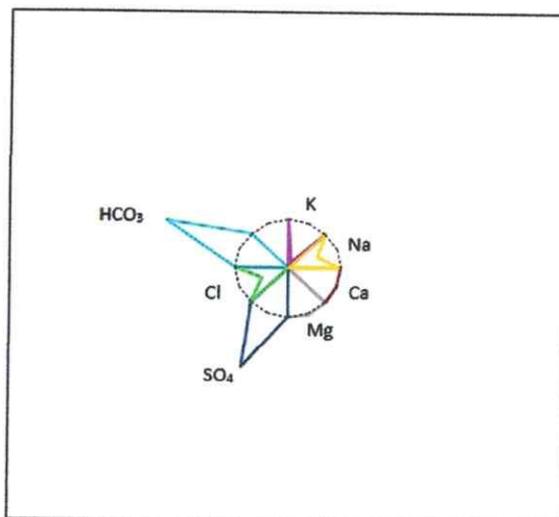
Cuadro 6. Diagramas estación de monitoreo E8



Campaña 2

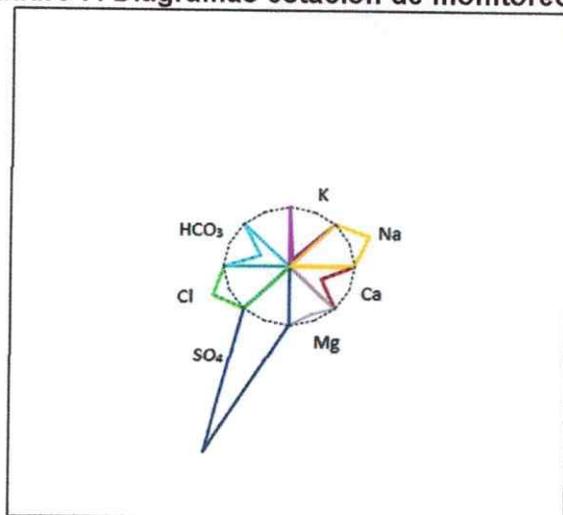


Campaña 3

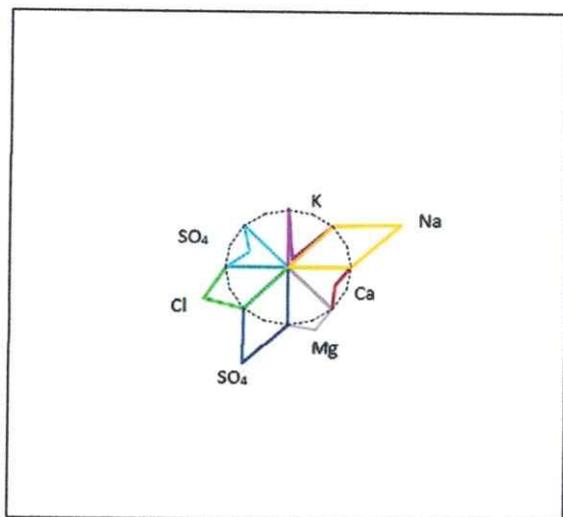


Campaña 4

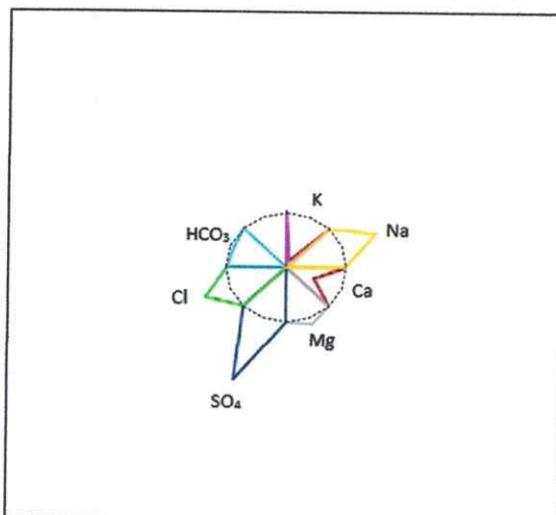
Cuadro 7. Diagramas estación de monitoreo E9



Campaña 2

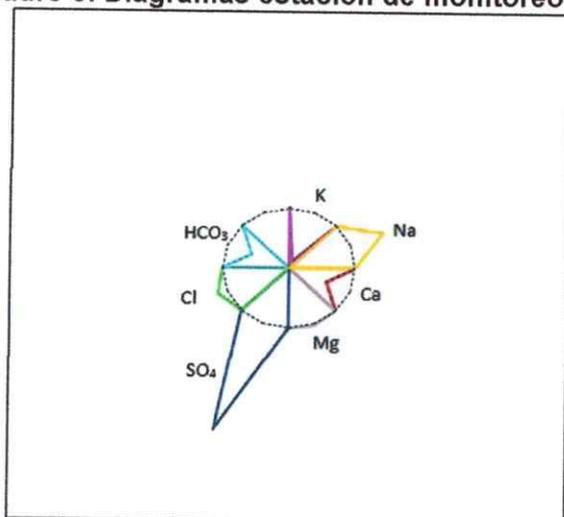


Campaña 3

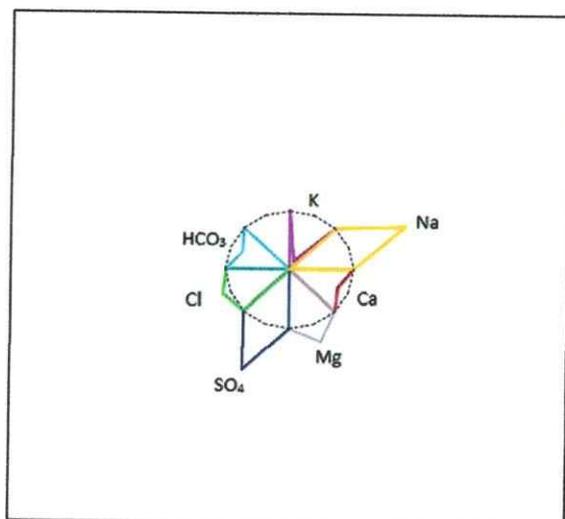


Campaña 4

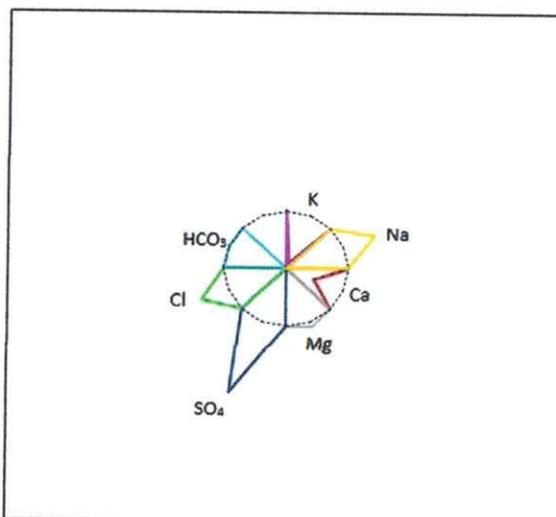
Cuadro 8. Diagramas estación de monitoreo E10



Campaña 2



Campaña 3



Campaña 4